

ВЕСТНИК

ISSN 0869–7698

ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

2

2025



НАУКА

— 1727 —

ВЕСТНИК

Научный журнал

Учредители
РАН
ДВО РАН

Журнал основан в 1932 г.
Издание прекращено в 1939 г.,
возобновлено в 1990 г.

ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО
ОТДЕЛЕНИЯ

РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ
НАУК

2 (240). 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Науки о Земле и окружающей среде

В.Г. БЫКОВ, Т.В. МЕРКУЛОВА. Миграция землетрясений и медленные деформационные волны	5
В.А. БУЛАНОВ. Акустические аномалии в пограничных слоях океана	17
А.Л. ХАРИТОНОВ. Оценка перспектив нефтегазоносных областей на акватории Охотского моря по результатам применения вероятностно-статистического анализа геолого-геофизических данных.....	33
А.М. ЖИРНОВ. О золотом оруденении черносланцевого и карлинского типов в Верхне-Биджанском золотоносном узле Хинганской рудоносной области (Дальний Восток)	45
О.В. ДУДАРЕВ, А.Н. ЧАРКИН, Д.В. ЧЕРНЫХ, А.С. РУБАН, И.И. ПИПКО, С.П. ПУГАЧ, В.А. ДУБИНА, И.П. СЕМИЛЕТОВ. Изменчивость биогеохимического сигнала терригенного материала в нижнем течении и эстуарии реки Амур в годы с различными условиями формирования весеннего половодья.....	57
А.П. КАСАТКИНА, В.Б. ЛОБАНОВ, А.Ф. СЕРГЕЕВ. Находка нового вида щетинкочелюстных <i>Flaccisagitta yamato</i> sp. nov. (Chaetognatha, Sagittoidea) и особенности циркуляции вод в районе возвышенности Ямато Японского моря.....	76
Е.М. ВЕРБИЦКАЯ, З.В. ВЕРБИЦКАЯ, С.О. РОМАНСКИЙ. Анализ данных самолетных наблюдений за атмосферной турбулентностью над Восточной Сибирью и Дальним Востоком.....	90

Биологические науки

Е.Я. ФРИСМАН, О.Л. ЖДАНОВА, Г.П. НЕВЕРОВА. Математические модели, объединяющие экологический и генетический подходы в популяционной биологии.....	102
Д.В. РУСАКОВ, Е.В. КАНАШ, Ю.В. ЧЕСНОКОВ. Неинвазивные оптические методы (спектрометрия, тепловидение) при определении дефицита азота и физиологического состояния пшеницы в полевых условиях	124
И.В. КНЯЗЕВА, А.А. СМИРНОВ. Влияние спектрального состава искусственного освещения на биохимический состав плодов томатов <i>Solanum lycopersicum</i> L.	138
Т.Н. ВЕКЛИЧ, Н.А. КОЧУНОВА. Гербарий Амурского филиала Ботанического сада-института ДВО РАН: история и современность	145

Химические науки

Р.Л. ДАВИДОВИЧ. Структурная химия тетрахлоридных комплексных соединений уранила (обзор).....	156
--	-----

Из истории науки

М.Б. ШТЕЦ. История сотрудничества Дальневосточного отделения РАН и Вьетнамской академии наук и технологий	175
А.А. ХИСАМУТДИНОВ. От ботаники до геологии: русское изучение северо-востока Китая (1946–1954)	186

Главный редактор вице-президент РАН академик РАН Ю.Н. КУЛЬЧИН

Заместитель главного редактора В.С. ЖЕРДЕВ

Ответственный секретарь Л.А. РУСОВА

Редакционная коллегия:

- | | |
|---|---|
| акад. РАН А.В. АДРИАНОВ | – научный руководитель (президент) Национального научного центра морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, Владивосток |
| чл.-корр. РАН Д.Л. АМИНИН | – зав. лабораторией Тихоокеанского института биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН, Владивосток |
| д. б. н. В.Ю. БАРКАЛОВ | – главный научный сотрудник Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток |
| акад. РАН В.В. БОГАТОВ
(зам. главного редактора) | – главный ученый секретарь ДВО РАН, Владивосток |
| чл.-корр. РАН С.Ю. БРАТСКАЯ | – зав. лабораторией Института химии ДВО РАН, Владивосток |
| чл.-корр. РАН Б.А. ВОРОНОВ | – научный руководитель Института водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск |
| чл.-корр. РАН С.В. ГНЕДЕНКОВ | – директор Института химии ДВО РАН, Владивосток |
| чл.-корр. РАН А.А. ГОНЧАРОВ | – директор Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток |
| акад. РАН Е.И. ГОРДЕЕВ | – научный руководитель Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский |
| акад. РАН Н.А. ГОРЯЧЕВ | – директор Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан |
| акад. РАН М.А. ГУЗЕВ | – директор Института прикладной математики ДВО РАН, Владивосток |
| акад. РАН Г.И. ДОЛГИХ | – директор Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток |
| д.г.-м.н. О.В. ДУДАРЕВ | – главный научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток |
| акад. РАН Ю.Н. ЖУРАВЛЁВ | – научный руководитель Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток |
| д.х.н. А.И. КАЛИНОВСКИЙ | – главный научный сотрудник Тихоокеанского института биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН, Владивосток |
| акад. РАН А.Г. КЛЫКОВ | – зав. отделом Федерального научного центра агроботехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, Уссурийск |
| акад. РАН Н.Н. КРАДИН | – директор Института истории, археологии и этнографии народов Дальнего Востока ДВО РАН, Владивосток |
| чл.-корр. РАН П.В. КРЕСТОВ | – директор Ботанического сада-института ДВО РАН, Владивосток |
| чл.-корр. РАН С.П. КРЫЖАНОВСКИЙ | – заместитель председателя ДВО РАН, Владивосток |
| акад. РАН В.Л. ЛАРИН | – научный руководитель Института истории, археологии и этнографии народов Дальнего Востока ДВО РАН, Владивосток |
| д. б. н. А.С. ЛЕЛЕЙ | – зав. лабораторией Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток |
| д.х.н. А.Г. МИРОЧНИК | – зав. лабораторией Института химии ДВО РАН, Владивосток |
| чл.-корр. РАН А.Ю. ОЗЕРОВ | – директор Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский |
| чл.-корр. РАН Ю.М. ПЕРЕЛЬМАН | – зам. директора по научной работе Дальневосточного научного центра физиологии и патологии дыхания, Благовещенск |
| чл.-корр. РАН С.В. ПРАНЦ | – зав. отделом Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток |
| акад. РАН В.И. СЕРГИЕНКО | – советник РАН, Владивосток |
| акад. РАН В.А. СТОНИК | – научный руководитель Тихоокеанского института биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН, Владивосток |
| чл.-корр. РАН Е.Я. ФРИСМАН | – научный руководитель Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан |
| акад. РАН А.И. ХАНЧУК | – научный руководитель Дальневосточного геологического института ДВО РАН, Владивосток |
| д.г.-м.н. Р.Б. ШАКИРОВ | – зам. директора по научной работе Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток |

© Российская академия наук, 2025

© Дальневосточное отделение РАН, 2025

VESTNIK

Scientific journal

OF THE FAR EAST BRANCH

Founders
RAS
FEB RAS

OF THE RUSSIAN
ACADEMY
OF SCIENCES

The journal was found in 1932
The publication was discontinued in 1939,
was resumed in 1990

2 (240). 2025

CONTENTS

Earth and Environment Sciences

V.G. BYKOV, T.V. MERKULOVA. Earthquake migration and slow strain waves.....	5
V.A. BULANOV. Acoustic anomalies in the boundary layers of the ocean	17
A.L. KHARITONOV. Assessment of the prospects of oil and gas-bearing areas in the waters of the Sea of Okhotsk based on the results of the application of probabilistic and statistical analysis of geological and geophysical data	33
A.M. ZHIRNOV. About gold mineralization of black-shale and karlin types in the Upper Bijan gold bearing node of the Khingan ore bearing region (Far East).....	45
O.V. DUDAREV, A.N. CHARKIN, D.V. CHERNYKH, A.S. RUBAN, I.I. PIPKO, S.P. PUGACH, V.A. DUBINA, I.P. SEMILETOV. Spring freshet fluxes of terrigenous matter from Amur River to the estuary in surrounding Okhotsk and Japan Seas.....	57
A.P. KASATKINA, V.B. LOBANOV, A.F. SERGEEV. Discovery of a new species <i>Flaccisagitta yamato</i> sp. nov. (Chaetognatha, Sagittoidea) and features of water circulation in the Yamato Rise region of the Sea of Japan	76
E.M. VERBITSKAYA, Z.V. VERBITSKAYA, S.O. ROMANSKIY. Analysis of the aircraft observations related to atmospheric turbulence in Eastern Siberia and Russian Far East	90

Biological Sciences

E.YA. FRISMAN, O.L. ZHDANOVA, G.P. NEVEROVA. Mathematical models combining ecological and genetic approaches in population biology	102
D.V. RUSAKOV, E.V. KANASH, Yu.V. CHESNOKOV. Non-invasive optical methods (spectrometry, thermal imaging) when determining nitrogen deficiency and the physiological state of wheat in the field conditions	124
I.V. KNYAZEVA, A.A. SMIRNOV. The influence of the spectral composition of artificial lighting on the biochemical composition of tomato fruits <i>Solanum lycopersicum</i> L.	138
T.N. VEKLICH, N.A. KOCHUNOVA. Herbarium of the Amur Branch of the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences: history and contemporaneity.....	145

Chemical Sciences

R.L. DAVIDOVICH. Structural chemistry of tetrachloride complexes of uranyl (review)	156
---	-----

From history of science

M.B. SHTETS. The history of cooperation between the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and the Vietnam Academy of Science and Technology.....	175
A.A. KHISAMUTDINOV. From botany to geology: Russian study of northeast China (1946–1954).....	186

Chief Editor Yu.N. KULCHIN, Academician of RAS, Vice-President of RAS

Deputy Chief Editor V.S. ZHERDEV

Executive Secretary L.A. RUSOVA

Editorial staff:

A.V. ADRIANOV, Academician of RAS	– Research Supervisor (President), A. V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology, FEB RAS, Vladivostok
D.L. AMININ, Corresponding Member of RAS	– Chief of Laboratory, G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
V.Y. BARKALOV, Doctor of Biological Sciences	– Principal Researcher, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok
V.V. BOGATOV, Academician of RAS (Deputy Chief Editor)	– Chief Scientific Secretary, FEB RAS, Vladivostok
S.Yu. BRATSKAYA, Corresponding Member of RAS	– Chief of Laboratory, Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
G.I. DOLGIKH, Academician of RAS	– Director, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok
O.V. DUDAREV, Doctor of Geological-Mineralogical Sciences	– Chief Researcher, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok
E.Ya. FRISMAN, Corresponding Member of RAS	– Research Supervisor, Institute of Complex Analysis of Regional Problems, FEB RAS, Birobidzhan
S.V. GNEDENKOV, Corresponding Member of RAS	– Director, Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
A.A. GONCHAROV, Corresponding Member of RAS	– Director, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok
E.I. GORDEEV, Academician of RAS	– Research Supervisor, Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky
N.A. GORYACHEV, Academician of RAS	– Director, N. A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan
M.A. GUZEV, Academician of RAS	– Director, Institute of Applied Mathematics, FEB RAS, Vladivostok
A.I. KALINOVSKY, Doctor of Chemistry	– Principal Researcher, G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
A.I. KHANCHUK, Academician of RAS	– Research Supervisor, Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok
A.G. KLYKOV, Academician of RAS	– Head of the Department, Federal Scientific Center of Agrobiotechnology in the Far East named after A.K. Chaika, Ussuriysk
N.N. KRADIN, Academician of RAS	– Director, Institute of History, Archaeology and Ethnology of the Peoples of the Far East, FEB RAS, Vladivostok
P.V. KRESTOV, Corresponding Member of RAS	– Director, Botanical Garden-Institute, FEB RAS, Vladivostok
S.P. KRYZHANOVSKIY, Corresponding Member of RAS	– Deputy Chairman of FEB RAS, Vladivostok
V.L. LARIN, Academician of RAS	– Research Supervisor, Institute of History, Archaeology and Ethnography of the Peoples of the Far East, FEB RAS, Vladivostok
A.S. LELEJ, Doctor of Biological Sciences	– Chief of Laboratory, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok
A.G. MIROCHNIK, Doctor of Chemistry	– Chief of Laboratory, Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
A.Yu. OSEROV, Corresponding Member of RAS	– Director, Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky
Yu.M. PERELMAN, Corresponding Member of RAS	– Deputy Director for Science, Far Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration, Blagoveshchensk
S.V. PRANTS, Corresponding Member of RAS	– Head of the Department, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok
V.I. SERGIENKO, Academician of RAS	– Advisor of RAS, Vladivostok
R.B. SHAKIROV, Doctor of Geological-Mineralogical Sciences	– Deputy Director for Research, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok
V.A. STONIK, Academician of RAS	– Research Supervisor, G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok
B.A. VORONOV, Corresponding Member of RAS	– Research Supervisor, Institute of Water and Ecological Problems, FEB RAS, Khabarovsk
Yu.N. ZHURAVLEV, Academician of RAS	– Research Supervisor, Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok

Обзорная статья

УДК 550.34+551.242

DOI: 10.31857/S0869769825020019

EDN: GFTUMG

Миграция землетрясений и медленные деформационные волны

В.Г. Быков✉, Т.В. Меркулова

Виктор Геннадьевич Быков

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия

bykov@itig.as.khb.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0637-0112>

Татьяна Владимировна Меркулова

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия

merkulova@itig.as.khb.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1283-5032>

Аннотация. Исследования миграции сейсмичности дают представление о физических механизмах передачи тектонических напряжений и новые возможности для оценки опасности и прогнозирования разнообразных природных катастроф, связанных с современной геодинамической активностью. В обзоре кратко представлены основные результаты исследований миграции сейсмичности и фундаментальной проблемы переноса тектонических напряжений, полученные в Институте тектоники и геофизики ДВО РАН в последнее десятилетие.

Ключевые слова: современная геодинамика, сейсмология, деформация земной коры, скрытые разломы, миграция землетрясений, медленные деформационные волны

Для цитирования: Быков В.Г., Меркулова Т.В. Миграция землетрясений и медленные деформационные волны // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 5–16. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020019>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания № 122041100034-6 Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН.

Earthquake migration and slow strain waves

V.G. Bykov, T.V. Merkulova

Victor G. Bykov

Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Chief Researcher
Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS, Khabarovsk, Russia
bykov@itig.as.khb.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0637-0112>

Tatjana V. Merkulova

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher
Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, FEB RAS, Khabarovsk, Russia
merkulova@itig.as.khb.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1283-5032>

Abstract. Research of seismicity migration provide insight into the physical mechanisms of tectonic stress transmission and new opportunities for hazard assessment and prediction of various natural disasters associated with recent geodynamic activity. The review briefly presents the main results of studies of seismicity migration and the fundamental problem of tectonic stress transfer, obtained at the Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences in the last decade.

Keywords: recent geodynamics, seismology, crustal deformation, hidden faults, earthquake migration, slow strain waves

For citation: Bykov V.G., Merkulova T.V. Earthquake migration and slow strain waves. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2): 5–16. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020019>

Funding. This work was performed as part of the State Assignment № 122041100034-6 for the Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far East Branch, Russian Academy of Sciences.

Введение

В науках о Земле в последние годы получила развитие концепция деформационных волн Земли или волновая динамика медленных деформационных процессов, скорости которых на много порядков меньше скоростей обычных сейсмических волн. Первоосновой этой концепции служит миграция сильных землетрясений – последовательное возникновение землетрясений, образующих упорядоченную структуру в определенном направлении. Постепенно наступило понимание, что главным механизмом направленной миграции является распространение фронта деформирования, вызывающего дополнительную тектоническую нагрузку и сейсмические подвижки в сегментах разломов. Отсюда и возникли представления о волнах миграции землетрясений.

Именно с попыток объяснить причину миграции землетрясений, обнаруженной в 1958 г. в Северо-Анатолийском разломе в Турции, началось формирование концепции медленных деформационных волн Земли. В дальнейшем было установлено, что направленная миграция землетрясений распространена на Земле повсеместно.

Современная сейсмичность Азиатского континента в значительной мере определяется тектоническими процессами – Индо-Евразийской коллизией и Западно-Тихоокеанской субдукцией. Западно-Тихоокеанская зона субдукции является наиболее сейсмоактивной в Восточной Азии. Здесь возникают самые сильные землетрясения, очаги которых находятся в относительно узких зонах активных разломов – Японском, Курильском и Камчатском глубоководных желобах.

Впервые обнаруженная в области Японской островной дуги и направленная от океана к побережью миграция сдвиговой деформации [1] привела к предположению, что одним из возможных источников медленных деформационных волн, вызывающих миграцию землетрясений, являются зоны субдукции – зоны погружения океанической плиты под континентальную. Сейсмическая активность передается как вдоль, так и поперек границ литосферных плит. Перенос деформаций в виде миграции землетрясений из Западно-Тихоокеанской зоны субдукции в сторону Азиатского континента исследован недостаточно, и особенно это относится к миграции землетрясений из глубоководных желобов.

Установленные направления и скорости миграции могут быть использованы для выявления и сопоставления относительного вклада тектонических структур в современные глобальные и региональные геодинамические процессы и в вероятностном прогнозировании сейсмической опасности.

В России и за рубежом на качественно новом уровне активизировались исследования направленной миграции землетрясений. Это связано с созданием уникальных баз данных и новых методик исследования сейсмического процесса, с применением современных информационно-вычислительных технологий для обработки и анализа огромных объемов исходной информации. Все это дает возможность получать новые количественные оценки параметров миграции землетрясений для построения волновых моделей сейсмического режима Земли. В России наиболее значительных успехов в изучении миграции деформаций и землетрясений, а также в объяснении сопутствующих эффектов достигли исследователи из ИФЗ РАН, ИО РАН, ИТПЗ РАН, ИЗК СО РАН, ИФПМ СО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИМГиГ ДВО РАН. Занимаются этой проблемой и сотрудники лаборатории сейсмологии и сеймотектоники Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН (ИТиГ) в г. Хабаровске. Некоторые наиболее важные и интересные научные результаты ИТиГ по этому направлению исследований, имеющие как фундаментальное, так и практическое значение, представлены ниже.

Миграция сейсмичности на границах литосферных плит

В зоне взаимодействия Амурской и Евразийской литосферных плит (от Южной Якутии до Охотоморского побережья) региональная миграция сейсмической активности практически не была исследована, и это было учтено при выборе территории для статистического анализа и геодинамического моделирования миграции сейсмичности. В отличие от стандартного регионального подхода в ходе исследований ИТиГ был применен комплексный анализ перемещения эпицентров землетрясений, включающий традиционные статистические методы и методы кластерного анализа, адаптированные для градации геодинамических зон. Впервые на строго количественной основе была проведена градация геодинамических зон по сейсмическим, геоморфологическим и тектоническим критериям и особенностям.

Для изучения динамики сейсмичности и сопоставления результатов в отдельных областях исследуемая зона вдоль северной и северо-восточной частей границы Амурской и Евразийской литосферных плит была разделена на отдельные кластеры (рис. 1). При выделении кластеров принимался критерий группирования землетрясений вблизи активных разломов, геоморфологические и тектонические особенности территории. Установлено, что миграция максимумов сейсмической активности от меридионального восточного обрамления Амурской плиты до меридиональной Тукурингра-Джагдинской сейсмической зоны происходит с постоянной скоростью 16,2 град/год (2,5 км/сут). В упорядоченных по долготе кластерах максимумы сейсмической активности смещаются в течение года с востока на запад и образуют пространственные циклы (рис. 1). Период пространственной синхронизации сейсмической активности равен 7,26 градусов и точно соответствует удвоенной линейной протяженности тектонических неоднородностей [2].

Сотрудники ИТиГ в ходе исследования динамики сейсмичности вдоль северной границы Амурской плиты получили примечательный результат (рис. 2). Оказалось, что здесь миграция эпицентров слабых землетрясений ($2 \leq M \leq 4$) инициируется перемещением фронта

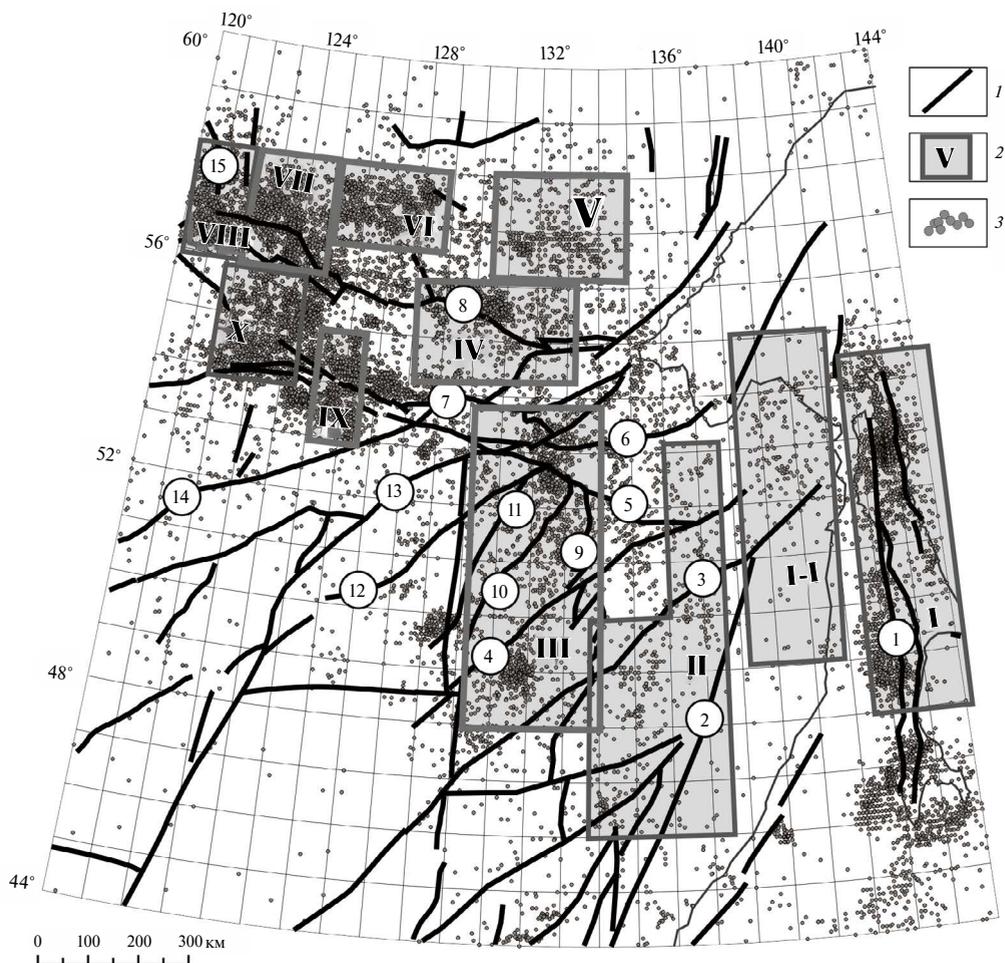


Рис. 1. Распределение очагов землетрясений в пределах северной, северо-восточной и восточной границ Амурской плиты. 1 – разломы, 2 – эпицентры землетрясений; 3 – условные границы кластеров. Условные сейсмоактивные блоки: I – Сахалин, I-I – приграничная восточная зона, II – восточная зона Тан-Лу, III – западная зона Тан-Лу, IV – юго-восточная зона Олекмо-Становой сейсмической зоны (ОСЗ), V – северо-восточная зона ОСЗ, VI – центральная зона ОСЗ, VII – западная зона ОСЗ, VIII – восточное замыкание Байкальской рифтовой зоны, IX – центральная зона южной ветви ОСЗ, X – западная зона южной ветви ОСЗ. Разломы (цифры в кружках): 1 – Центрально-Сахалинский; 2 – Центрально-Сихотэ-Алинский; 3 – Ишу-Харпинский; 4 – Хинганский; 5 – Пауканский; 6 – Тугурский; 7 – Северо-Тукурингский; 8 – Становой; 9 – Тастахский; 10 – Мельгинский; 11 – Западно-Туранский; 12 – Селемджинский; 13 – Буссе-Норский; 14 – Синлунгоу; 15 – Темулякитский

деформационной волны с востока на запад со средней скоростью около 1000 км/год [3, 4]. Эта волна модулируется медленным деформационным процессом со скоростью порядка 10–20 км/год, который зарождается в Японско-Курило-Камчатском сегменте Тихоокеанской зоны субдукции. При этом происходят синхронные квазипериодические изменения сейсмической активности в равноотстоящих зонах с пространственными периодами 360–420 км, которые сравнимы с длиной медленных деформационных волн (250–450 км), выделенных на территории Приамурья и Прибайкалья [5].

При изучении взаимосвязи геофизических полей с активными тектоническими структурами и сейсмичностью были обнаружены совпадающие по времени и по направлению перемещения аномалий полей силы тяжести и магнитных полей вблизи северной границы Амурской плиты. Миграция аномалий происходит со скоростью от 200 до 1200 км/год, сопоставимой со скоростью миграции слабой сейсмической активности ($2 \leq M \leq 4$), что может

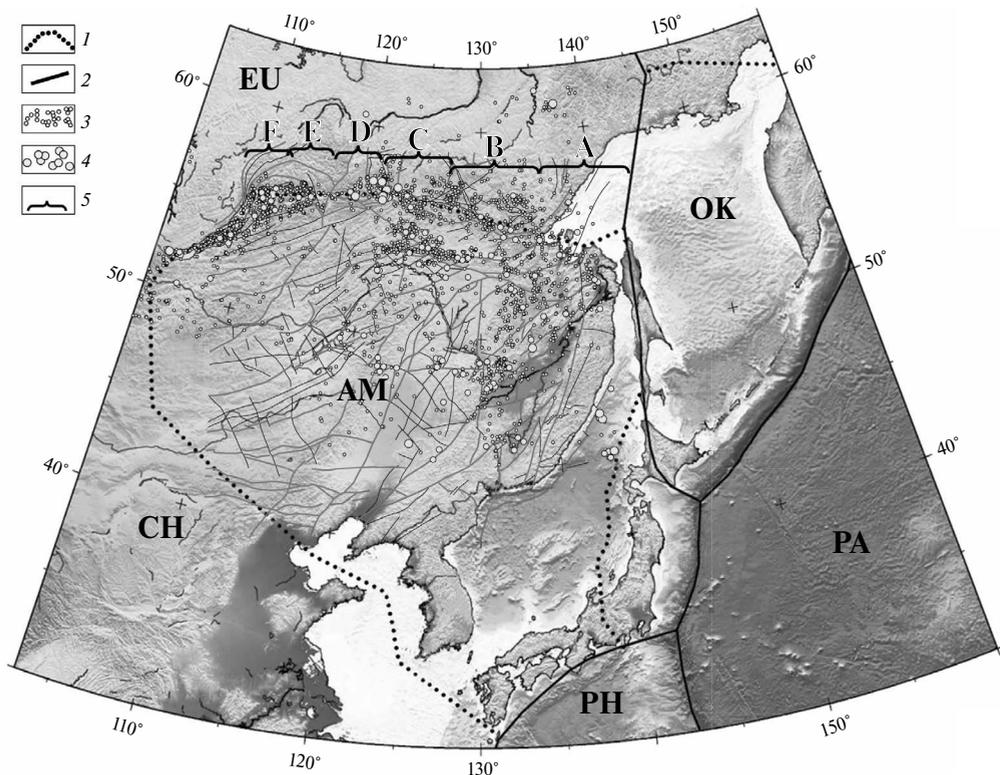


Рис. 2. Распределение эпицентров землетрясений вдоль северной границы Амурской плиты. 1 – границы литосферных плит; 2 – эпицентры землетрясений с магнитудой $M > 3$; 3 – эпицентры землетрясений с магнитудой $M > 5$; 4 – основные тектонические нарушения; 5 – пространственные циклы сейсмической активности. Литосферные плиты: EU – Евразийская, PA – Тихоокеанская, PH – Филиппинская, CH – Китайская, AM – Амурская, ОК – Охотская

означать движение единого внутреннего источника возмущений напряженного состояния земной коры, вызывающего тектономагнитные, гравитационные и сейсмические эффекты. Этим источником может быть миграция деформаций земной коры в виде медленных волн, которые оказывают влияние на разломные зоны и, тем самым, модулируют изменение слабой сейсмической активности в течение года.

Выявленные тенденции в картине миграции эпицентров землетрясений в региональном масштабе, например, пространственные циклы с фазовым смещением максимумов сейсмической активности, позволили идентифицировать динамику сейсмичности в пределах зоны взаимодействия Амурской, Евразийской и Охотской литосферных плит как волновой процесс.

Миграция сейсмичности из Японского и Курило-Камчатского глубоководных желобов вглубь Азиатского континента

На основе данных об исторических землетрясениях на территории Китая, Японии и Кореи выявлена миграция сильнейших землетрясений ($M \sim 8$) с востока на запад из Японского и Нанкайского глубоководных желобов в континентальную часть Китая на расстояние 2600 км [6]. Миграция продолжалась в течение 130 лет (1610–1740 гг.) и представляла собой поперечную миграцию, направление которой совпадало с направлением субдукции Тихоокеанской плиты. Скорость миграции постепенно уменьшалась от желоба к континенту и составляла 20 км/год от Нанкайского желоба до Чангбайшана, 14 км/год – от Чангбай-

шана до Удалянчи, 22 км/год – от Нанкайского желоба до Танчэна, 16 км/год – от Танчэна до Иньчуаня. В этом регионе известны еще два аналогичных события поперечной миграции со скоростью 36 и 34 км/год, которые произошли с 1498 по 1556 г. и с 1843 по 1927 г. соответственно [6].

Миграция землетрясений очень похожа на распространение фронтов деформации от желоба во внутреннюю часть Японии [1, 2], т.е. также с востока на запад, но только более значительного масштаба. Скорость миграции деформации составляла 14–22 км/год [6], что сравнимо со скоростью миграции деформации земной коры в Японии (10–100 км/год [1, 7]) и скоростью миграции сейсмичности от Японской дуги в Северо-Восточный Китай через Корейский полуостров (20–30 км/год [8]).

Не менее значительный результат состоит в установлении переноса деформаций в виде миграции землетрясений субширотного направления из Западно-Тихоокеанской зоны субдукции в сторону Азиатского континента (рис. 3) [9]. Скорость миграции землетрясений по профилю АВ п-ов Камчатка – Охотск составляет от 18 до 40 км/год. Скорость миграции землетрясений ($M \geq 4,5$) через северную часть о-ва Сахалин на разных глубинных уровнях имеет значения от 20 до 40 км/год. по профилю EF, пересекающему о-в Хоккайдо, миграция землетрясений ($M \geq 4,0$) проходит со скоростью 15–23 км/год, что хорошо согласуется с данными [6, 8]. Результаты расчетов современной миграции землетрясений из зоны Японско-Курило-Камчатского глубоководного желоба вглубь Азии и выявленная японскими учеными в Восточной Азии медленная миграция деформаций с востока на запад со скоростью 10–140 км/год предполагают волновой механизм геодинамического воздействия Западно-Тихоокеанской субдукции на Азиатский континент [10].

Проведены расчеты миграции землетрясений ($M \geq 6,5$) из Японского и Курило-Камчатского желобов в сторону Азиатского континента во временном интервале с 1960 по 2015 г. по профилям, расположенным севернее тех сегментов Японского желоба, где ранее уже проводились исследования миграции деформаций и землетрясений. Расстояние между параллельными профилями составляет около 1220 км, а их протяженность достигает 3000 км по профилю, пересекающему о-в Хоккайдо, миграция землетрясений происходит со скоростью около

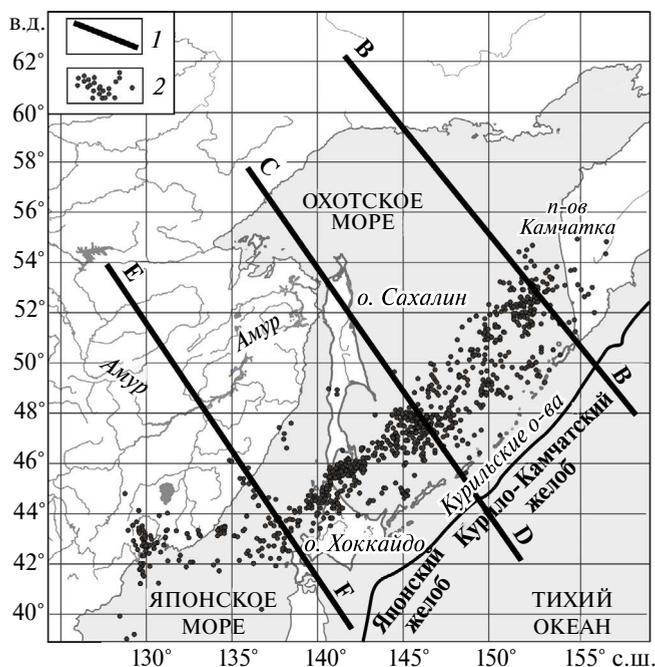


Рис. 3. Распределение сильных землетрясений в Курило-Камчатской зоне субдукции и профили исследования миграции землетрясений. 1 – положение профилей, 2 – землетрясения с $M \geq 6,0$

20 км/год, скорость миграции из Курило-Камчатского желоба через о-в Сахалин на разных глубинных уровнях имеет значения 30–40 км/год [11]. Индо-Евразийская коллизия генерирует на территории Азиатского континента последовательности землетрясений меридионального направления, а Западно-Тихоокеанская субдукция – субширотного направления [9].

Миграция сейсмичности и скрытые разломы Приамурья

В сейсмоактивных районах довольно часто связь сейсмических событий с разломами, выделенными по геологическим данным, не фиксируется, и поэтому возникает проблема выделения скрытых разломов, не вышедших на поверхность Земли, но способных генерировать интенсивные сейсмические колебания и опасные геологические явления. Скрытые разломы представляют серьезную сейсмическую опасность для многих районов Приамурья и Приморья с развитой экономикой и инфраструктурой. При этом отсутствует общепринятая методика обнаружения сейсмогенерирующих разломов указанного типа.

Сейсмическая миграция на территории Дальнего Востока была достаточно подробно исследована в северо-западной части Тихого океана [12] и в Сахалино-Японском сейсмическом поясе [13]. Миграция сейсмичности на территории Приамурья практически не изучалась, если не считать фрагментарные исследования территории Восточного Приамурья, прилегающей к Тан-Лу-Курской зоне сейсмоактивных разломов [14], и поиски зон современной деструкции литосферы и отдельных групп активных разломов Приамурья [5].

На основе двух методов (анализ векторной направленности в миграции эпицентров сильных землетрясений и смещения максимумов сейсмической энергии с построением пространственно-временных диаграмм) установлен ряд общих тенденций миграции региональной сейсмичности и возможность идентификации скрытых разломов по параметрам миграции землетрясений на территории Приамурья.

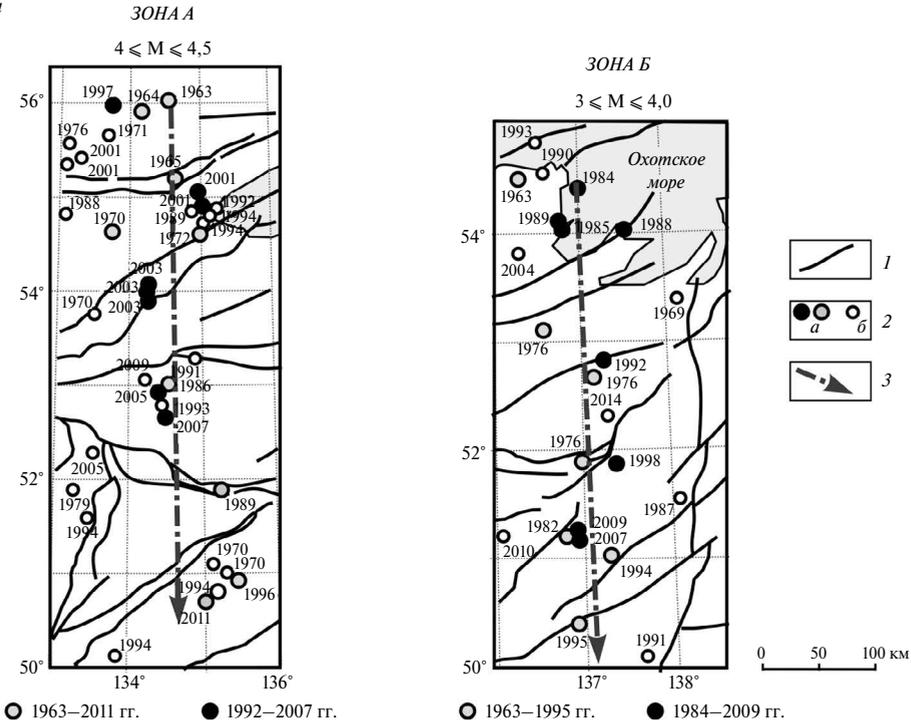
В ходе исследований предложен комплексный подход, в котором данные о миграции землетрясений служат первоосновой для выделения скрытых разломов, а геофизические и морфоструктурные данные привлекаются в качестве дополнительной информации для подтверждения полученных результатов. Детально изучены тенденции миграции землетрясений с оценкой ее направленности, скорости и на этой основе установлена тектоническая нарушенность территории Приамурья; выделены скрытые разломы и их сегменты с устойчиво выраженной миграцией сейсмичности (рис. 4). В большинстве случаев скорость миграции землетрясений Приамурья составляет от 7 до 45 км/год и сопоставима со скоростями миграции в прилегающих сейсмоактивных областях. Полученные данные о направлении миграции эпицентров указывают, что миграционные цепочки с запада вызваны воздействием сжатия, а миграция с востока обусловлена влиянием деформационных процессов в Западно-Тихоокеанской зоне субдукции [15].

Знание скорости миграции сейсмичности и ее направления дает возможность сделать вероятностную оценку времени и места следующего землетрясения, а также установить геодинамические источники активизации разломов Приамурья.

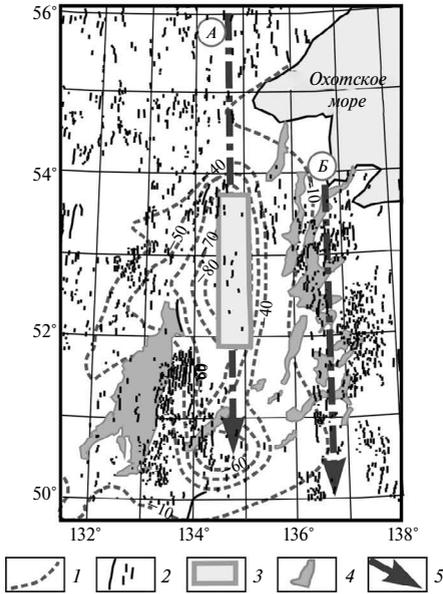
Сопоставление местоположения выделенных на территории Приамурья зон, где направленная миграция очагов землетрясений продолжается далеко за границы установленных разломов или вообще не соответствует геологическим разломам на дневной поверхности, с доступными данными (аномалии магнитного и гравитационного полей, профили ГСЗ, МТЗ) об известных геолого-геофизических признаках тектонической нарушенности позволяет с уверенностью утверждать, что направление миграции землетрясений может служить первоосновой для выделения скрытых разломов. Разломы такого типа, обнаруженные по миграции землетрясений в Приамурье, имеют преимущественно северо-западное и субмеридиональное простирание.

Каталоги землетрясений дают возможность выделять цепочки направленной миграции эпицентров землетрясений и таким образом определять расположение скрытых разломов в тестовом режиме без непосредственного проведения сейсмологических наблюдений. Однако использование данных только о миграции землетрясений не всегда может дать надежное выделение и масштабы скрытых разломов.

а



б



в

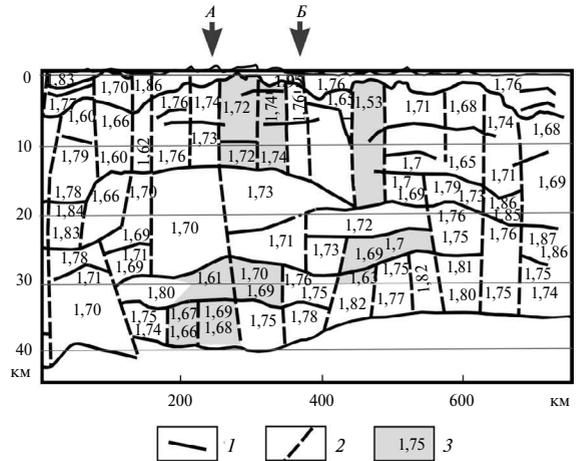


Рис. 4. Миграция землетрясений и признаки скрытых разломов субмеридионального направления. а – миграция землетрясений в зонах А и Б: 1 – региональные разломы; 2 – землетрясения (а – миграционные цепочки, б – прочие); 3 – миграционная цепочка и ее направление. б – признаки разломов субмеридионального направления: 1 – изолинии регионального аномалии гравитационного поля; 2 – оси аномалий магнитного поля; 3 – зона аномально низких значений V_p/V_s ; 4 – осадочные впадины; 5 – миграционные цепочки. в – зоны миграции 3 и 4 в структуре земной коры по профилю ГСЗ: 1 – сейсмические границы; 2 – тектонические нарушения; 3 – области пониженных значений V_p/V_s

Волновая динамика медленных деформационных процессов

Волновая динамика медленных деформационных процессов включает перенос локализованной деформации и медленных возмущений геодинамических полей, вызывающих миграцию землетрясений.

Актуальность этого направления исследований определяется не только его фундаментально-поисковым характером, но и необходимостью разработки методов анализа сейсмической активизации и выделения новых прогностических признаков разнообразных природных катастроф, связанных с современной геодинамической активностью.

Основные наблюдаемые эффекты переноса локализованной деформации – волны скольжения на контакте блоков горных пород – воспроизведены в ИТиГ с применением обобщенного уравнения \sin -Гордона [16]. Предложенная модель учитывает все основные факторы неустойчивого скольжения (трение, шероховатость контакта и «зацепление» выступов) и объясняет природу уединенных деформационных волн, фиксируемых на контакте блоков. Из расчетов следует, что прохождение уединенной волны, так же, как и в лабораторных опытах [17], ослабляет контакт, что при неизменной внешней нагрузке вызывает динамическую подвижку – смещение блоков или бортов разлома. Прохождение волны вдоль разлома как бы «раздвигает» на некоторое время его борта, сжатые статическим напряжением, что приводит к скольжению блоков по разлому. Происходит так называемое дилатансионное разрыхление контакта бортов разлома [18].

Совсем недавно были рассмотрены возможные режимы переноса локализованной деформации в разломно-блоковой системе и выяснены физические условия перехода системы из нелинейного (солитонного или автоволнового) режима скольжения в режим, при котором наступает обычное диффузионное рассеяние напряжения [19]. Основным результатом состоит в том, что формирование режимов скольжения в разломах непосредственно связано с наличием в геологической среде медленной динамики, т.е. существенно более медленных, чем сейсмические, волновых процессов. Именно медленная динамика управляет скольжением в разломах, а значит, и миграцией землетрясений.

Заключение

В основе концепции миграции сейсмичности лежит идея о главенствующей роли деформационных процессов, вызывающих изменения физических параметров геологической среды, которые проявляются в геофизических полях разной природы.

Накопилось немало сведений о пространственной корреляции сейсмической и вулканической активности и миграции деформаций, на основе которых можно с полной уверенностью утверждать, что сейсмичность и извержения вулканов управляются неким волновым процессом внутри Земли и являются его проявлением на земной поверхности.

Проблема миграции сейсмичности имеет мировоззренческий характер и дает возможность построить целостное представление о коллективном поведении блоков, разломов и землетрясений, которое определяется многочисленными неразделимыми и одновременно протекающими на больших пространственно-временных масштабах процессами. Эти процессы невозможно полностью воспроизвести в лабораторных опытах или при математическом моделировании. Поэтому при решении задач современной геодинамики и физики землетрясений нужны дополнительные представления или инструменты, которые дают возможность количественно оценить поведение исследуемой системы в целом.

На наш взгляд, представления о медленных деформационных волнах (деформационных волнах Земли) являются «подходящим инструментом» для описания широкого спектра наблюдаемых особенностей обычных и «медленных» землетрясений, миграции медленного скольжения и сейсмического тремора; для понимания природы миграции сейсмичности и механизмов перераспределения и переноса тектонических напряжений. Эти представления дают возможность уже сегодня решать конкретные задачи геодинамики и сейсмологии [20–22] и даже проблемы планетарного масштаба (такие как потепление климата и разрушение ледников в полярных областях Земли [23, 24]).

Результаты исследований сотрудников ИТиГ, представленные в этом кратком обзоре, подтверждают волновой характер медленных деформационных процессов. Перечисленные достижения соответствуют современному мировому уровню научных исследований, востребованы при решении проблем современной геодинамики, служат информационной основой для выявления сейсмогенерирующих тектонических структур и уточнения природных опасностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kasahara K. Migration of crustal deformation // *Tectonophysics*. 1979. Vol. 52, No. 1–4. P. 329–341.
2. Трофименко С.В., Быков В.Г., Меркулова Т.В. Миграция сейсмической активности в зоне конвергентного взаимодействия Амурской и Евразийской литосферных плит // *Вулканология и сейсмология*. 2015. № 3. С. 66–80.
3. Bykov V.G., Trofimenko S.V. Slow strain waves in blocky geological media from GPS and seismological observations on the Amurian plate // *Nonlin. Processes Geophys*. 2016. Vol. 23, No. 6. P. 467–475.
4. Trofimenko S.V., Bykov V.G., Merkulova T.V. Space-time model for migration of weak earthquakes along the northern boundary of the Amurian microplate // *J. Seismol*. 2017. Vol. 21, No. 2. P. 277–286.
5. Шерман С.И. Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // *Геодинамика и тектонофизика*. 2013. Т. 4, № 2. С. 83–117.
6. Zhao G., Yao L. Earthquake migration in East Asia mainland (I) – the migration of huge earthquakes and volcanic activity from West Pacific trench to the Chinese mainland // *Acta Seismologica Sinica*. 1995. Vol. 8, No. 4. P. 541–549.
7. Ishii H., Sato T., Tachibana K., Hashimoto K., Murakami E., Mishina M., Miura S., Sato K., Takagi A. Crustal strain, crustal stress and microearthquake activity in the northeastern Japan arc // *Tectonophysics*. 1983. Vol. 97, No. 1–4. P. 217–230.
8. Mino K. Migration of great earthquake along the subduction zone, of Japan Archipelago // *J. Seismol. Soc. Japan*. 1988. Vol. 41, No. 3. P. 375–380.
9. Bykov V.G., Merkulova T.V. Stress transfer and the impact of the India-Eurasia Collision and the Western Pacific Subduction on the geodynamics of the Asian Continent // *Open J. Earthquake Res*. 2022. Vol. 11, No. 4. P. 73–88.
10. Bykov V.G., Merkulova T.V., Andreeva M.Y. Stress transfer and migration of earthquakes from the Western Pacific subduction zone toward the Asian continent // *Pure Appl. Geophys*. 2022. Vol. 179, No. 11. P. 3931–3944.
11. Быков В.Г., Меркулова Т.В. Волновое геодинамическое воздействие тектонических процессов на Амурскую плиту // *Тихоокеан. геология*. 2021. Т. 40, № 4. С. 72–86.
12. Викулин А.В. Миграция очагов сильнейших Камчатских и Северо-Курильских землетрясений и их повторяемость // *Вулканология и сейсмология*. 1992. № 1. С. 46–61.
13. Викулин А.В. Миграция и осцилляции сейсмической активности и волновые движения земной коры // *Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений: I Российско-японский семинар (Хабаровск, 26–29 сентября 2000 г.)*. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. С. 205–224.
14. Бормотов В.А., Войтенко А.А. Закономерности миграции землетрясений Приамурья // *Тихоокеан. геология*. 1998. Т. 17, № 2. С. 51–60.
15. Быков В.Г., Меркулова Т.В. Миграция сейсмичности и скрытые разломы в Приамурье // *Тихоокеан. геология*. 2020. Т. 39, № 4. С. 38–52.
16. Bykov V.G. Sine-Gordon equation and its application to tectonic stress transfer // *J. Seismol*. 2014. Vol. 18, No. 3. P. 497–510.
17. Rubinstein S.M., Cohen G., Fineberg J. Detachment fronts and the onset of dynamic friction // *Nature*. 2004. Vol. 430, No. 7003. P. 1005–1009.
18. Николаевский В.Н. Геомеханика. Современные главы. М.: ИФЗ РАН, 2014. 484 с.
19. Быков В.Г. Формирование режимов скольжения в разломах и медленные деформационные волны // *Физическая мезомеханика*. 2019. Т. 22, № 4. С. 39–46.
20. Антоновская Г.Н., Конечная Я.В., Басакина И.М. Влияние срединно-океанических хребтов на сейсмичность архипелага Новая Земля // *Геотектоника*. 2023. № 6. С. 78–93.

21. Владимирова И.С. Исследование особенностей сейсмогенной активизации Чилийской субдукционной зоны в начале XXI в. // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507, № 2. С. 309–315.
22. Соколов С.Ю., Абрамова А.С., Шкарубо С.И., Ананьев Р.А., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А. Неотектоника восточной части шельфа Баренцева моря: сейсмичность, разломы и воздействие Атлантико-Арктической рифтовой системы // Вулканология и сейсмология. 2024. № 1. С. 73–89.
23. Лобковский Л.И. Возможный сейсмогенно-триггерный механизм резкой активизации эмиссии метана и потепления климата в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3 (39). С. 62–72.
24. Лобковский Л.И., Баранов А.А., Владимирова И.С., Алексеев Д.А. Сильнейшие землетрясения и деформационные волны как возможные триггеры потепления климата в Арктике и разрушения ледников в Антарктике // Вестник РАН. 2023. Т. 93, № 6. С. 526–538.

REFERENCES

1. Kasahara K. Migration of crustal deformation. *Tectonophysics*. 1979;52(1–4):329–341.
2. Trofimenko S.V., Bykov V.G., Merkulova T.V. Seismicity Migration in the Zone of Convergent Interaction between the Amur Plate and the Eurasian Plate. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2015;9(3):210–222.
3. Bykov V.G., Trofimenko S.V. Slow strain waves in blocky geological media from GPS and seismological observations on the Amurian plate. *Nonlinear Processes Geophysics*. 2016;23(6):467–475.
4. Trofimenko S.V., Bykov V.G., Merkulova T.V. Space-time model for migration of weak earthquakes along the northern boundary of the Amurian microplate. *Journal of Seismology*. 2017;21(2):277–286.
5. Sherman S.I. Deformation waves as a trigger mechanism of seismic activity in seismic zones of the continental lithosphere. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2013;4(2):83–117.
6. Zhao G., Yao L. Earthquake migration in East Asia mainland (I) – the migration of huge earthquakes and volcanic activity from West Pacific trench to the Chinese mainland. *Acta Seismologica Sinica*. 1995;8(4):541–549.
7. Ishii H., Sato T., Tachibana K., Hashimoto K., Murakami E., Mishina M., Miura S., Sato K., Takagi A. Crustal strain, crustal stress and microearthquake activity in the northeastern Japan arc. *Tectonophysics*. 1983;97(1–4):217–230.
8. Mino K. Migration of great earthquake along the subduction zone, of Japan Archipelago. *Journal of the Seismological Society of Japan*. 1988;41(3):375–380.
9. Bykov V.G., Merkulova T.V. Stress transfer and the impact of the India-Eurasia Collision and the Western Pacific Subduction on the geodynamics of the Asian Continent. *Open Journal of Earthquake Research*. 2022;11(4):73–88.
10. Bykov V.G., Merkulova T.V., Andreeva M.Y. Stress transfer and migration of earthquakes from the Western Pacific subduction zone toward the Asian continent. *Pure and Applied Geophysics*. 2022;179(11):3931–3944.
11. Bykov V.G., Merkulova T.V. The wave geodynamic impact of tectonic processes on the Amurian plate. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2021;15(4):345–358.
12. Vikulin A.V. Migratsiya ochagov sil'neyshikh Kamchatskikh i Severo-Kuril'skikh zemletryaseniy i ikh povtoryayemost'. *Vulkanologiya i Seysmologiya*. 1992;(1):46–61.
13. Vikulin A.V. Migration and oscillations seismic activity and wave motions of the Earth's crust. In: *Problems of geodynamics and earthquake forecasting*, The I Russian-Japanese workshop (Khabarovsk, September 26–29, 2000). Khabarovsk: ITiG FEB RAS; 2001. P. 205–224.
14. Bormotov V.A., Voitenok A.A. Patterns of earthquake migration in Priamurie Region. *Geology of the Pacific Ocean*. 2000;15(2):291–306.
15. Bykov V.G., Merkulova T.V. Earthquake migration and hidden faults in the Priamurye Region. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2020;14(4):326–339.
16. Bykov V.G. Sine-Gordon equation and its application to tectonic stress transfer. *Journal of Seismology*. 2014;18(3):497–510.
17. Rubinstein S.M., Cohen G., Fineberg J. Detachment fronts and the onset of dynamic friction. *Nature*. 2004;430(7003):1005–1009.
18. Nikolayevskiy V.N. Geomekhanika. Sovremennyye glavy. Moscow: IFZ RAN; 2014. 484 s. (In Russ.).

19. Bykov V.G. Development of sliding regimes in faults and slow strain waves. *Physical Mesomechanics*. 2020;23(3):271–278.
20. Antonovskaya G.N., Konechnaya Ya.V., Basakina I.M. The Influence of Mid-Oceanic Ridges on the Seismicity of the Novaya Zemlya Archipelago. *Geotectonics*. 2023;57(6):759–773.
21. Vladimirova I.S. Study of the features of seismogenic activation of the Chilean Subduction Zone at the beginning of the 21st century. *Doklady Earth Sciences*. 2022;507(2):1112–1117.
22. Sokolov S.Yu., Abramova A.S., Shkarubo S.I., Ananiev R.A., Moroz E.A., Zaraiskaya Yu.A. Neotectonics of the Barents Sea Shelf Eastern Part: Seismicity, Faults and Impact of the Atlantic–Arctic Rift System. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2024;18(1):64–77.
23. Lobkovsky L.I. Possible seismogenic trigger mechanism of abrupt activation of methane emission and climate warming in the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*. 2020;39(3):62–72.
24. Lobkovsky L.I., Baranov A.A., Vladimirova I.S., Alekseev D.A. The strongest earthquakes and deformation waves as possible triggers of climate warming in the Arctic and the destruction of glaciers in Antarctica. *Vestnik of the RAS*. 2023;93(6):526–538.

Научная статья
УДК 534.222-551.463
DOI: 10.31857/S0869769825020021
EDN: GFQKTG

Акустические аномалии в пограничных слоях океана

В.А. Буланов

Владимир Алексеевич Буланов
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия
bulanov@poi.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-5504-9042>

Аннотация. Большую роль в структуре океана играют пограничные слои – приповерхностный и придонный. Вовлечение пузырьков в толщу морской воды в поверхностных волнах приводит к появлению пузырьковых облаков, которые при сильном ветре могут достигать значительных глубин. Пузырьки могут также содержаться в придонных слоях в районах выхода подводных газовых факелов. Часто их сопоставляют с наличием газогидратных месторождений либо с выходом газов через трещины в земной коре вблизи активных вулканов. В работе обсуждаются методы и экспериментальные результаты по акустике пограничных слоев в океане, содержащих двухфазную жидкость с газовыми пузырьками, а также методы их диагностики. Показаны возможности акустического зондирования для визуализации сложной структуры, динамики и диагностики аномалий физических свойств пограничных слоев. Представлены и обсуждены типичные экспериментальные результаты, полученные в дальневосточных морях.

Ключевые слова: океан, акустика, пограничный слой, пузырьки, зондирование

Для цитирования: Буланов В.А. Акустические аномалии в пограничных слоях океана // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 17–32. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020021>

Финансирование. Госзадание 124022100075-6; РНФ № 22-22-00499.

Acoustic anomalies in the boundary layers of the ocean

V.A. Bulanov

Vladimir A. Bulanov

Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Chief Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

bulanov@poi.dvo.ru

<http://orcid.org/0000-0002-5504-9042>

Abstract. Boundary layers – the near-surface and bottom layers – play an important role in the structure of the ocean. The involvement of bubbles in the sea water column in surface waves leads to the appearance of bubble clouds, which can reach significant depths in strong winds. Bubbles may also be contained in the bottom layers in the areas of the outlet of underwater gas flares. They are often compared with the presence of gas hydrate deposits, or with the release of gases through cracks in the earth's crust near active volcanoes. The paper discusses methods and experimental results on the acoustics of boundary layers in the ocean containing a two-phase liquid with gas bubbles, as well as methods for their diagnosis. The possibilities of acoustic sounding for visualization of complex structure, dynamics and diagnostics of anomalies of physical properties of boundary layers are shown. Typical experimental results obtained in the Far Eastern seas are presented and discussed.

Keywords: ocean, acoustics, boundary layer, bubbles, sounding

For citation: Bulanov V.A. Acoustic anomalies in the boundary layers of the ocean. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2): 17–32. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020021>

Funding. State assignment 124022100075-6; RNF No. 22-22-00499.

Введение

Важное значение для понимания динамики и свойств океанской среды имеют знания о пограничных слоях океана – приповерхностном и придонном. Вовлечение пузырьков в толщу морской воды в поверхностных волнах приводит к появлению пузырьковых облаков, которые при сильном ветре могут достигать значительных глубин. Пузырьки могут также содержаться в придонных слоях в районах выхода подводных газовых факелов.

Приповерхностный слой водной толщи океана существенно изменяется при сильном ветре и развитом поверхностном волнении [1–15]. В этих условиях он характеризуется развитой турбулентностью, аномально высокими концентрациями газовых пузырьков, газонасыщенности воды и большим газообменом между океаном и атмосферой [1, 3, 4, 8–11]. Одновременно также изменяются акустические характеристики, такие, как коэффициенты рассеяния, поглощения и дисперсии скорости звука, параметр нелинейности морской воды, которые становятся зависимыми от наличия воздушных пузырьков и образуемых при обрушении ветровых волн пузырьковых структур [1, 2, 5, 6, 12–15]. Эти структуры при достаточной концентрации влияют в том числе на дальнейшее распространение звука в океане [13, 16–18].

В 1980-х гг. были открыты новые объекты в океане – подводные газовые (пузырьковые) факелы, образованные газовыми пузырьками, выходящими из дна моря [19–22]. Подводные газовые факелы (ГФ) повсеместно встречаются в районах выброса газов вблизи подводных грязевых вулканических образований, подводных газовых и нефтяных месторождений, подводных залежей газогидратов в толще морских осадков, в районах выгрузки газа при

таянии вечной мерзлоты в арктических морях, и к ним проявляется все большее внимание. Большую роль для обнаружения ГФ и изучения их структуры играют акустические методы зондирования на основе рассеяния звука [14, 23–26].

Измерение концентрации пузырьков и их распределения по размерам $g(R)$ в море проводилось различными методами, и результаты представлены в большом количестве работ [1, 2, 5, 6, 10–12]. Тем не менее остались неясными многие вопросы распределения пузырьков по глубине и закономерности эволюции функции $g(R)$ во времени после прохождения различных возмущений, включая эффекты обрушения ветровых волн и их релаксации к невозмущенному состоянию [8–11, 14].

Основная цель настоящей работы – показать возможности акустического зондирования для визуализации сложной структуры, динамики и диагностики аномалий физических свойств пограничных слоев с высоким пространственным разрешением, а также представить краткую информацию о типичных характеристиках рассеяния и распространения звука во взаимосвязи с распределением пузырьков в приповерхностном слое моря и в подводных газовых факелах, исходящих из дна и все чаще встречающихся в океане.

Методы

Теоретические основы акустической спектроскопии. Наиболее часто используемым методом изучения структуры водной толщи является метод акустической спектроскопии на основе обратного рассеяния высоконаправленных пучков звука, который к тому же позволяет дистанционно визуализировать неоднородности структуры [1–3, 6, 12–14]. Имея информацию об амплитудах падающей на объем V волны P_i и рассеянной этим объемом в обратном направлении P_{bs} , можно в Борновском приближении определить коэффициент объемного рассеяния m_V в виде [1, 14]

$$m_V = \frac{2}{\pi\theta^2 c\tau} \left(\frac{P_{bs}}{P_i} \right)^2, \quad (1)$$

где θ – ширина характеристики направленности излучателя, c – скорость звука, τ – длительность импульса звука, $p_i(r) \approx A \exp(-\alpha r) / r$, A – калибровочное значение амплитуды излучаемого звука, α – коэффициент поглощения звука, когда поглощение звука на расстоянии r невелико. Величина P_{bs} измеряется непосредственно в эксперименте.

Важным параметром является концентрация – количество пузырьков в единице объема жидкости N , которая связана с функцией распределения пузырьков по размерам $g(R)$

формулой $N = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} g(R) dR$, где R_{\min} и R_{\max} – минимальный и максимальный размеры

пузырьков в воде. Отличительным свойством пузырьков является наличие резонанса при рассеянии звука на пузырьках, частота которого связана с радиусом пузырька по формуле Миннерта $R_\omega(\omega) = \sqrt{3\gamma P_0 / \rho} / \omega$ [5, 6] и позволяет по частотной зависимости коэффициента рассеяния звука $m_V(\omega)$ определить $g(R)$ в условиях, когда основной вклад в рассеяние звука вносят резонансные пузырьки $g(R_\omega) = 2\delta_\omega m_V(\omega) / \pi R_\omega^3$, где δ_ω – коэффициент резонансного затухания на частоте ω , P_0 – гидростатическое давление, γ – постоянная адиабаты газа внутри пузырька (для воздуха $\gamma \approx 1.4$), ρ – плотность жидкости. При наличии наряду с резонансными пузырьками других нерезонансных включений суммарный коэффициент рассеяния звука от единицы объема среды m_V следует записать в виде [14] $m_V = m_V^{(b)} + m_V^{(c)}$, и тогда для определения $g(R)$ требуется предварительно отделить вклад резонансных пузырьков. Такое разделение возможно при учете нестационарности при раскатке пузырька на резонансе, что приводит к зависимости $m_V^{(b)}$ от длительности импульса τ [18]:

$$m_V^{(b)}(\tau) = m_V^{(b)}(\infty) F(\tau/\tau_0), \quad m_V^{(b)}(\infty) = (\pi/2) R^3 g^{(b)}(R) / \delta(R) \quad (2)$$

$$F(\tau/\tau_0) = 1 - [1 - \exp(-\tau/\tau_0)]/(\tau/\tau_0), \quad \tau_0 = 1/\omega\delta = Q/\omega. \quad (3)$$

Функция $F(\tau/\tau_0)$ помогает на практике отделять резонансное рассеяние от нерезонансного фона, а также определять добротность пузырьков на различных частотах по формуле (3). Коэффициент рассеяния на нерезонансных включениях можно определить по формуле

$m_V^{(s)} = m_V(\tau \ll \tau_0)$. Применение перестраиваемых по частоте излучателей позволяет найти функцию $g(R)$ в виде

$$g^{(b)}(R) = (2\delta / \pi R^3)[m_V(\infty) - m_V(0)]. \quad (4)$$

Обозначения $m_V(\infty)$ и $m_V(0)$ отвечают условиям $\tau \gg \tau_0$ и $\tau \ll \tau_0$ соответственно. Таким образом, функция распределения пузырьков по размерам может быть определена по данным обратного линейного рассеяния акустических импульсов большой и малой длительности.

Формула (4) наиболее часто используется в области высоких частот, соответствующих резонансному рассеянию на маленьких пузырьках. На низких частотах обычно наблюдается нерезонансное рассеяние звука, которое наиболее ярко проявляется на пузырьках, составляющих подводные газовые факелы, спектр которых обычно достаточно узкий – га-

уссовского типа $g(R) = A_g \exp[-(R - \bar{R})^2/\sigma_R^2]$, где \bar{R} – средний размер пузырьков, σ_R – средний разброс размеров. Тогда вклад нерезонансного фона дает величину $A_g = 2N/\sqrt{\pi}\sigma_R$, откуда

можно получить выражение для коэффициента нерезонансного рассеяния звука в виде

$m_V^{(s)} = A_g \sqrt{\pi/2}\sigma_R \bar{R}^2 = N \bar{R}^2$. В итоге в нерезонансном случае можно написать соотношение, устанавливающее взаимосвязь между объемной концентрацией газа в пузырьках, объемной концентрацией пузырьков и средним размером пузырьков в виде

$$x = \frac{4}{3}\pi \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} R^3 g(R) dR \approx (4\pi/3) N \bar{R}^3 = (4\pi/3) m_V \bar{R}. \quad (5)$$

Для оценок можно использовать распределения пузырьков в рамках моделей с подгонными параметрами [14, 25], измеренными в эксперименте. Многочисленные экспериментальные результаты, показанные ниже, позволили записать функцию $g(R)$ в виде [14]

$$g(R, z) = A_g R^{-n(z)} \exp\left[-m\left(\frac{R_p}{R} + \frac{R}{R_m}\right)\right] e^{-z/L}, \quad (6)$$

где $L \sim (2 \div 4) \cdot 10^{-3} U_{10}^{2.5}$ (здесь L дается в метрах, скорость ветра на высоте 10 м U_{10} дается в метрах в секунду). Обычно при умеренных состояниях моря $A_g \approx 10^{-8} \text{ см}^{n-4}$, $n(z) \approx 3,5 \div 4$ [14, 18], показатель m зависит от состояния моря, для умеренного и спокойного волнения $m = 1$. Параметры R_p и R_m отвечают соответственно максимуму $g(R)$ и максимальному размеру пузырьков. В качестве этих параметров для пузырьковых облаков в приповерхностных слоях моря выбирают значения $R_p = 0,01$ мм, $R_m = 7$ мм [14, 18]. Преимуществом записи $g(R)$ в виде (6) является практичность и быстрота вычислений различных параметров среды.

Эффективные акустические параметры. Для описания акустических свойств микро-неоднородной жидкости часто используют эффективные акустические параметры, которые определяют в рамках гомогенной модели сплошной среды [2, 14]. Здесь для формулировки модели важен учет резонансных и релаксационных откликов пузырьков на воздействие

внешней силы, и в общем случае сжимаемость одиночного пузырька K оказывается сложной функцией размеров пузырька и частоты звука $K = K(R, \omega)$. Эффективная комплексная скорость звука \tilde{c}_e в жидкости с пузырьками может быть вычислена на основе обобщения формулы Вуда [14, 18], при этом вещественная часть $c_e = \text{Re}(\tilde{c}_e)$ определяет фазовую скорость волны, а мнимая часть с помощью эффективного волнового числа дает коэффициент затухания звука, $\alpha = \text{Im}k_e = \omega \text{Im}(1/\tilde{c}_e)$ в виде

$$c_e/c \approx 1 - \left(2\pi r c^2 / 3\gamma P_0\right) \text{Re} G_\omega, \quad \alpha \approx \left(2\pi r \omega c / 3\gamma P_0\right) \text{Im} G_\omega, \quad (7)$$

где $G_\omega = \int_0^\infty dR g(R) / \left[1 - (R/R_\omega)^2 (1 + i/Q_\omega)\right]$, $Q_\omega = 1/\delta_\omega$ – добротность пузырька радиуса R_ω .

Экспериментальные методы и аппаратура. Функциональная схема типичного аппаратного комплекса, используемая в морских экспедициях на НИС «Академик М.А. Лаврентьев» и НИС «Профессор Гагаринский» показана на рис. 1. Цифровые генераторы синхроимпульсов и сигналов ГСПФ-053 формировали сложные импульсы с требуемой частотой и длительностью от 1 до 4 мс. Для усиления сигналов на частотах ниже 100 кГц использовался усилитель мощности либо фирмы Behringer, NX6000D, мощностью 6 кВт, либо QSC RMX 5050 мощностью 5 кВт. На более высоких частотах до 800 кГц использовался специально разработанный в ТОИ ДВО РАН усилитель БИП мощностью 600 Вт. Прием сигналов проводился с применением селективного усилителя SN 233, который обеспечивал усиление 10^4 при фильтрации сигналов в зависимости от длительности импульсов и дальности в различной полосе 54, 36 и 18 дБ/октаву. Усиленный сигнал оцифровывался 12-разрядной АЦП L873 фирмы Л-Кард (Москва) с максимальной частотой оцифровки до 1.3 МГц.

Для долговременного изучения структуры приповерхностных слоев моря в бух. Витязь зал. Петра Великого Японского моря в 2008 г. была установлена донная система, оснащенная излучателями с различными частотами: 138, 216, 519 кГц, а также 200, 145 и 60 кГц [14, 18]. с помощью этой системы, установленной на глубине около 12 м и на удалении 100 м от береговой черты, были получены результаты по динамике и структуре пузырьковых слоев вблизи поверхности моря при различных гидрометеорологических условиях. На рис. 2 показана функциональная схема донной системы. Режимы излучения задаются из лабораторного помещения по кабелю, программируются цифровым генератором сигналов специальной формы ГСПФ-053, усиливаются и передаются на излучатель.

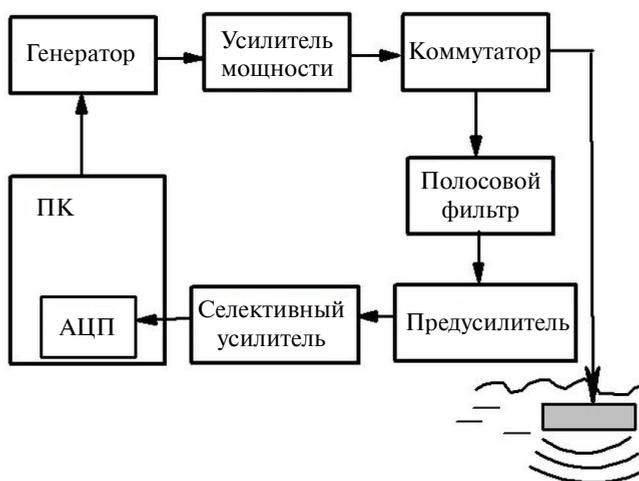


Рис. 1. Функциональная схема аппаратного комплекса для измерения рассеяния звука на различных частотах

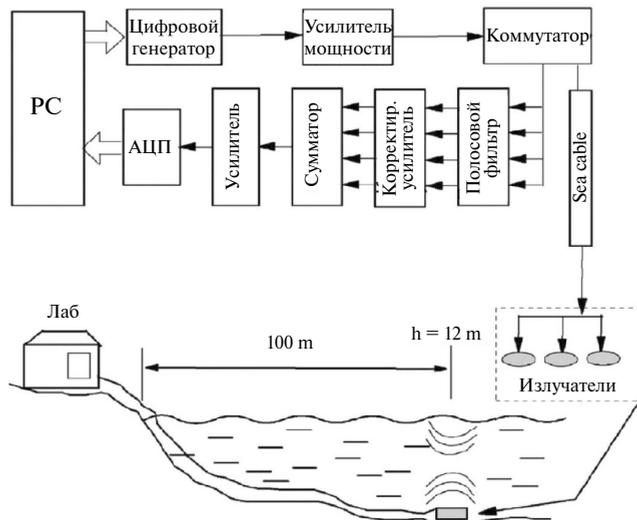


Рис. 2. Функциональная схема донной системы

Результаты и обсуждение

Рассеяние звука в приповерхностном слое моря. Большое влияние на структуру приповерхностного пузырькового слоя оказывает поверхностное волнение, вызванное ветровыми напряжениями. Изучение изменчивости во времени структуры приповерхностного слоя регулярно проводилось с помощью акустических систем на донной станции в бух. Витязь Японского моря. На рис. 3 представлена подробная картина рассеяния звука частоты 145 кГц на приповерхностных пузырьковых облаках. Здесь же показано одновременное рассеяние звука на планктонных сообществах, вовлеченных в динамику внутренних волн. Слева сверху и справа внизу на рис. 3 представлены соответственно горизонтальный и вертикальный профили коэффициента рассеяния звука m_V вдоль линий, показанных на рисунке. Более подробная картина волновой динамики планктона представлена на верхней врезке. Видно, что вблизи поверхности наблюдается мощный слой пузырьков, простирающийся до глубины около 4–5 м.

Распределения пузырьков в приповерхностных слоях. Полученные данные по рассеянию звука с помощью формул (1), (3) позволяют получить данные по распределению пузырьков

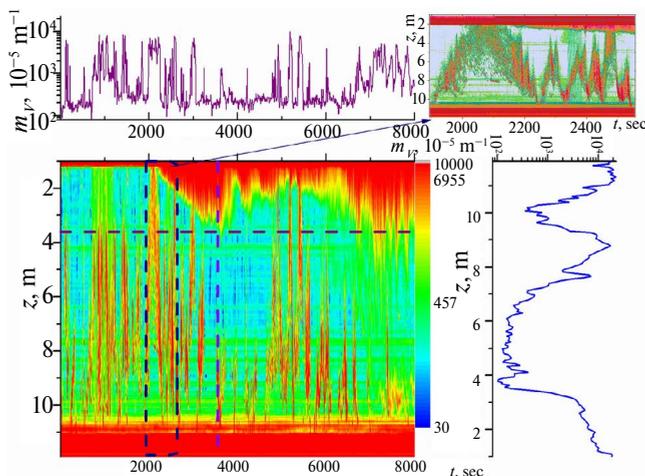


Рис. 3. Рассеяние звука на приповерхностных пузырьковых облаках и одновременное рассеяние звука на зоопланктоне

в приповерхностных слоях моря. Отметим, что на практике вместо величины $g(R)$, имеющей размерность $[\text{см}^{-4}]$, часто пользуются величиной $N(R)$, имеющей размерность $[\text{м}^{-3}\text{мкм}^{-1}]$, которая связана с $N(R)$ соотношением $N(R) = 10^2 g(R)$. Экспериментальные данные по широкополосному рассеянию звука с помощью формул (5)–(7) позволили получить функции $N(R)$, которые для различных глубин представлены на рис. 4 для различных состояний моря. Из рис. 4 видно, что в периоды без шторма наблюдается максимум функции $g(R, z)$, который располагается при $R_p > 10$ мкм, при этом величина R_p зависит от глубины. В целом оказалось возможным предложить формулу (6), которая неплохо описывала полученные экспериментальные результаты. Измерения $g(R)$ на большом фактическом материале в сходных условиях умеренного состояния моря дают значения n в интервале $n \approx 3,3 \div 3,8$ [3–6, 8–11, 14], что достаточно близко к оценке $n \sim 3,3$, полученной для инерционного интервала между размерами R_p, R_m , следующей из теории Гаррета–Ли–Фармера ГЛФ [7].

Важным для практических применений является информация о газосодержании и структуре пузырьковых облаков, возникающих за счет обрушения поверхностных волн. Используя рассеяние звука, можно получить данные по изменению во времени средней объемной концентрации газа $x(t)$, заключенного в пузырьках во всей толще слоя морской воды. Типичное изменение $x(t)$ при скорости ветра, меняющегося в пределах от 9 до 13 м/с, представлено на рис. 5, а. Частотный спектр x_f функции концентрации газа $x(t)$ изображен на рис. 5, б. Видно, что концентрация пузырьков достаточно велика, при этом следует отметить значительную изменчивость во времени $x(t)$ средней концентрации газа, заключенного в пузырьках. Она обусловлена периодическим обрушением ветровых поверхностных волн и образованием

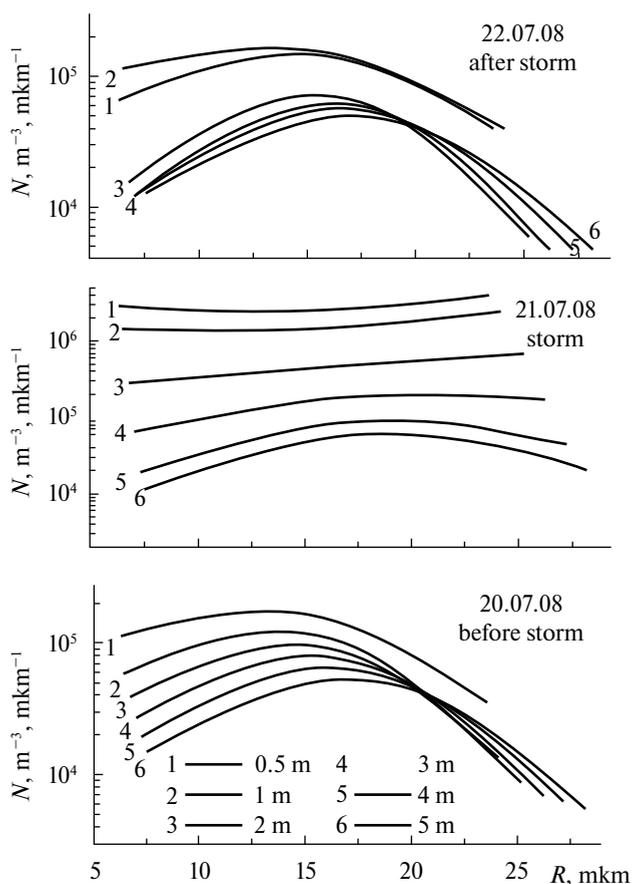


Рис. 4. Функция распределения пузырьков по размерам $g(R)$ на различных глубинах в различные периоды развития шторма

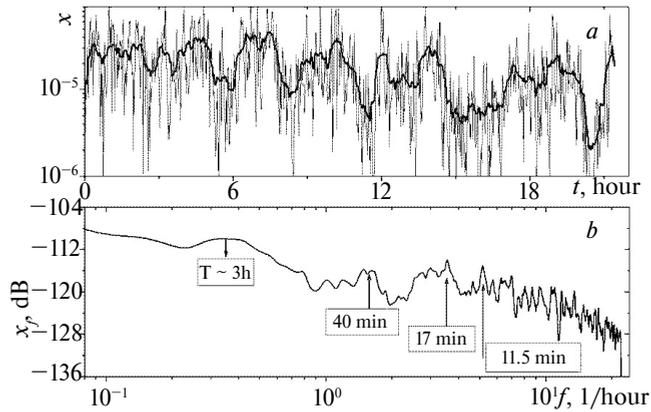


Рис. 5. Изменчивость во времени средней объемной концентрации газа $x(t)$, заключенного в пузырьках (а), и спектр функции концентрации газа (b) при наличии пузырьковых облаков, образующихся при обрушении ветровых волн

пузырьковых облаков, которые достигают глубины 7–8 м. Из рис. 5, b видны характерные спектральные пики, отвечающие периодам усиления ветра над поверхностью моря.

Акустические аномалии и распространение звука. Появление пузырьковых облаков в приповерхностных слоях моря приводит к повышенной диссипации акустических волн. На рис. 6 представлены данные для коэффициента поглощения звука на частоте 145 кГц в приповерхностном слое пузырьков при скорости ветра от 9 до 13 м/с примерно в течение суток. Видно значительное избыточное поглощение звука в пузырьковом слое. Вблизи поверхности моря поглощение звука в 100 раз превышает поглощение звука в чистой воде $\alpha_0 \approx 10^{-6}$ 1/м, в то время как на больших глубинах поглощение звука стремится к значению поглощения звука в чистой воде.

Для изучения влияния приповерхностного слоя пузырьков на дальнейшее распространение звука было проведено численное моделирование для мелкого моря при использовании приближения нормальных мод [18, 27]. Для простоты анализа была выбрана модель простейшего горизонтально однородного, без пузырьков изоскоростного подводного звукового канала с абсолютно отражающими границами (верхняя граница – мягкая, нижняя – жесткая). Звуковое давление представляется в виде суммы нормальных мод. Дополнительное затухание, вызванное наличием пузырькового слоя, описывается мнимой частью собственных значений мод. Расчеты звукового поля были выполнены по программе KRAKENC [27]

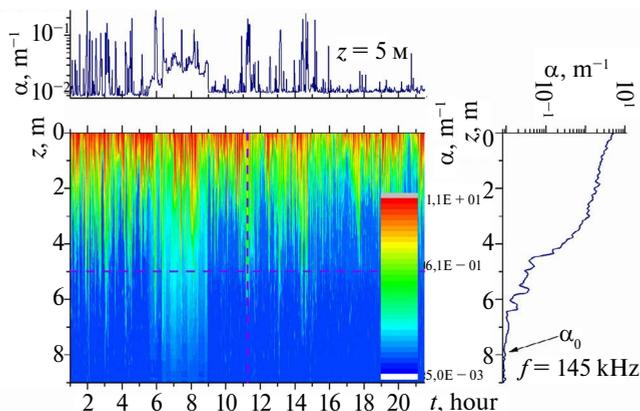


Рис. 6. Изменения во времени коэффициента поглощения звука на частоте 145 кГц при скорости ветра от 9 до 13 м/с

для взаимодействующих мод. Толщина слоя пузырьков выбиралась равной 7 м. Излучатель с частотой 1 кГц располагался на глубине 10 м при глубине моря 42 м.

На рис. 7 представлено 2D изображение акустического поля для различных концентраций пузырьков в приповерхностном слое. Видно сильное изменение структуры акустического поля при превышении концентрации пузырьков, равной 10^{-7} . При этой концентрации пузырьков акустическое поле вблизи поверхности затухает на расстоянии около 400 м. Одновременно резко изменяется общая структура акустического поля в толще волновода.

Ослабление акустического поля в глубоком море с отрицательным градиентом скорости звука, типичным для северных морей, показано на рис. 8, где изображена функция $|P(r)|$

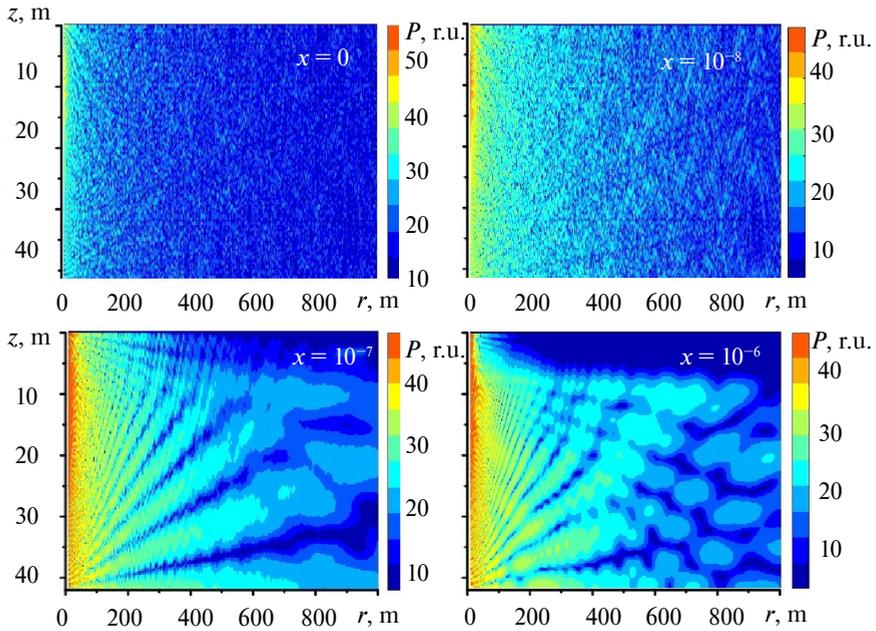


Рис. 7. Структура акустического поля с частотой $f = 1$ кГц в канале с приповерхностным слоем пузырьков толщиной 7 м при различной концентрации пузырьков: $x = 0$, $x = 10^{-8}$, $x = 10^{-7}$, $x = 10^{-6}$. Излучатель на глубине 10 м

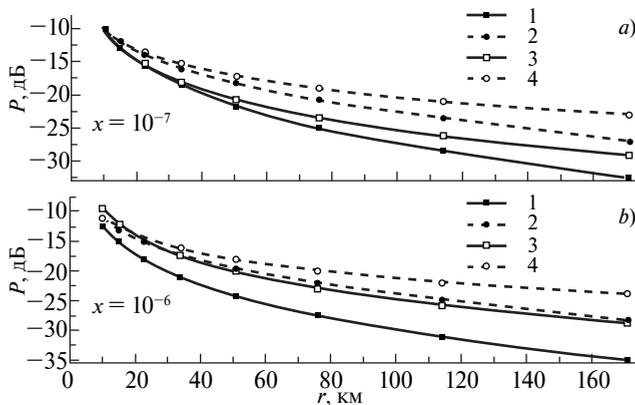


Рис. 8. Пространственный спад акустического поля при наличии и отсутствии приповерхностного слоя пузырьков на частотах 800 Гц (кривые 1, 2) и 100 Гц (кривые 3, 4) при различной концентрации пузырьков: а) $x = 10^{-7}$, б) $x = 10^{-6}$

при излучении звука различной частоты на глубине 100 м в море без пузырьков и в присутствии слоя пузырьков.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что влияние приповерхностного слоя пузырьков заключается в своеобразной экранировке поля распространяющегося звука на близких дистанциях. Именно здесь наблюдается дополнительный спад поля, вызванный затуханием звука, распространяющегося вдоль лучей при малых углах скольжения. Вся энергия, сосредоточенная в поле при малых углах, постепенно затухает и на больших расстояниях не дает никакого вклада в суммарное поле. Пузырьковый слой создает экранировку на близких дистанциях, и на больших расстояниях остаются только те лучи, которые практически не заходят в пограничные слои с пузырьками.

Пузырьковые факелы на шельфе Охотского моря. Пузырьковые облака встречаются не только вблизи поверхности моря, но также возникают в областях массового появления пузырьковых факелов, выходящих из донных осадков [21, 22]. В 2004 и 2006 гг. на паруснике «Надежда» были проведены экспедиции ТОИ ДВО РАН совместно с МГУ им. адм. Г.И. Невельского по изучению подводных пузырьковых газовых аномалий на северо-восточном шельфе Сахалина в зал. Пильтун вблизи нефтяной платформы «Моликпак». На рис. 9 представлены выходы газа в виде многочисленных факелов, которые были зарегистрированы методом обратного рассеяния звука при движении судна вдоль шельфа. На врезке рис. 9 представлена сила слоя $S_s(r)$ в пузырьковых аномалиях толщиной 12 м.

Одновременно велись исследования распространения звука на различных частотах. Излучение звука проводилось с движущегося судна на фиксированной частоте 400 Гц, а также методом частотной модуляции на частотах в интервале 2–3,5 кГц. Прием акустических сигналов осуществлялся на стационарные донные приемные станции ИО РАН (зав. лаб. А.И. Веденев) с автономной записью сигналов [14]. На рис. 10 представлены экспериментальные результаты изменения уровня звука на частоте 2 кГц, полученные на донной приемной станции, находящейся вблизи границы пузырькового облака.

Оказалось, что на всех частотах имеется большой спад поля. Здесь же представлены результаты моделирования распространения звука, которое показало, что для получения соответствия с экспериментальными результатами следует задать коэффициент затухания звука на частоте 2 кГц равным $\beta = 4,4$ дБ/км ($0,5 \text{ м}^{-1}$). Для сравнения укажем, что экспериментальные значения коэффициента затухания звука $\beta = 3,5$ дБ/км, они хорошо соответствуют результатам численного моделирования. Следует обратить внимание, что данные величины на порядок превышают значения коэффициентов поглощения звука, полученных различными авторами для морских условий без пузырьковых облаков [1].

Акустические аномалии в придонных слоях. Весной 2021 г. были проведены исследования рассеяния звука на частоте 25 кГц вблизи о-ва Парамушир и о-ва Атласова. На врезке

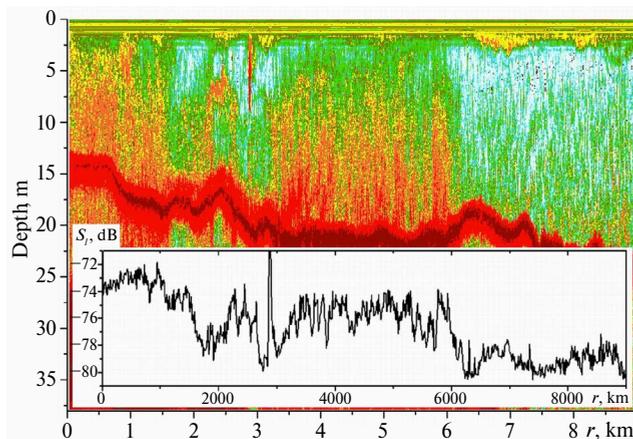


Рис. 9. Акустическое изображение пузырьковых факелов в районе зал. Пильтун (Охотское море) на частоте 100 кГц. На врезке показана сила звукорассеивающего пузырькового слоя

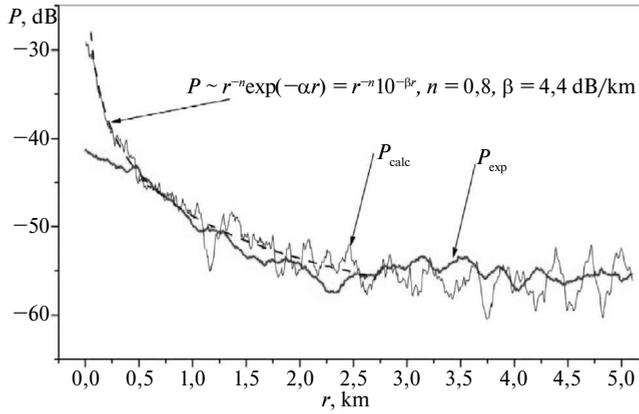


Рис. 10. Экспериментальные и теоретические зависимости затухания звука на частоте 2 кГц при распространении через пузырьковые факелы

рис. 11 показаны типичные трассы, по которым проводились непрерывные исследования рассеяния звука. Очень часто вдоль трасс наблюдаются придонные пузырьковые неоднородности достаточно больших размеров, достигающих в высоту 40–60 м, как это видно из рис. 11. Экспериментальные результаты по измерениям коэффициента рассеяния звука на частоте 25 кГц позволили оценить концентрацию пузырьков и объемную концентрацию свободного газа, заключенного в придонных неоднородностях. За основу были взяты предположения, что размеры пузырьков вблизи дна достаточно большие ~0,5–7 мм; а также имеется одновременно как нерезонансное высокочастотное рассеяние, так и резонансное рассеяние на высокочастотной ветви функции распределения пузырьков $g(R)$, отвечающей формуле (6). Для оценок были взяты 2 типа функции $g(R)$ – гауссовская и полуэмпирическая вида (6). Оценки показали, что основной вклад в результаты вносит нерезонансное рассеяние, позволяющее сделать оценки коэффициента рассеяния звука, количества пузырьков со средним размером $\bar{R} \sim 4$ мм и объемной концентрации газа в пузырьках x по формулам (5), (6).

Результаты вычислений объемной концентрации газа в пузырьках x , представленные на рис. 12, показывают, что в пределах 30–40 м над дном величина x превышает фоновую концентрацию и непосредственно вблизи дна может достигать значений $x \sim 10^{-7} \div 10^{-6}$.

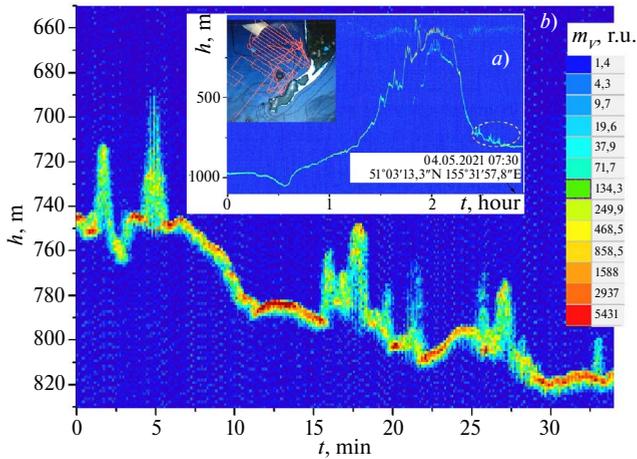


Рис. 11. Глубоководные аномалии рассеяния звука частоты 25 кГц, зарегистрированные вблизи о-ва Атласова 04.05.2021 г.

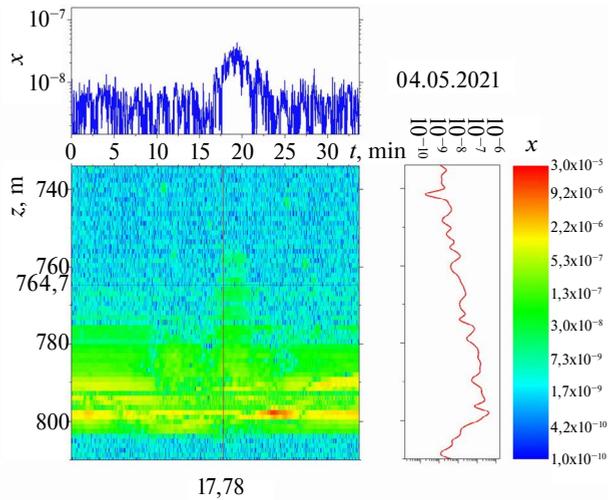


Рис. 12. Распределение объемной концентрации газа в пузырьках x в неоднородности вблизи дна

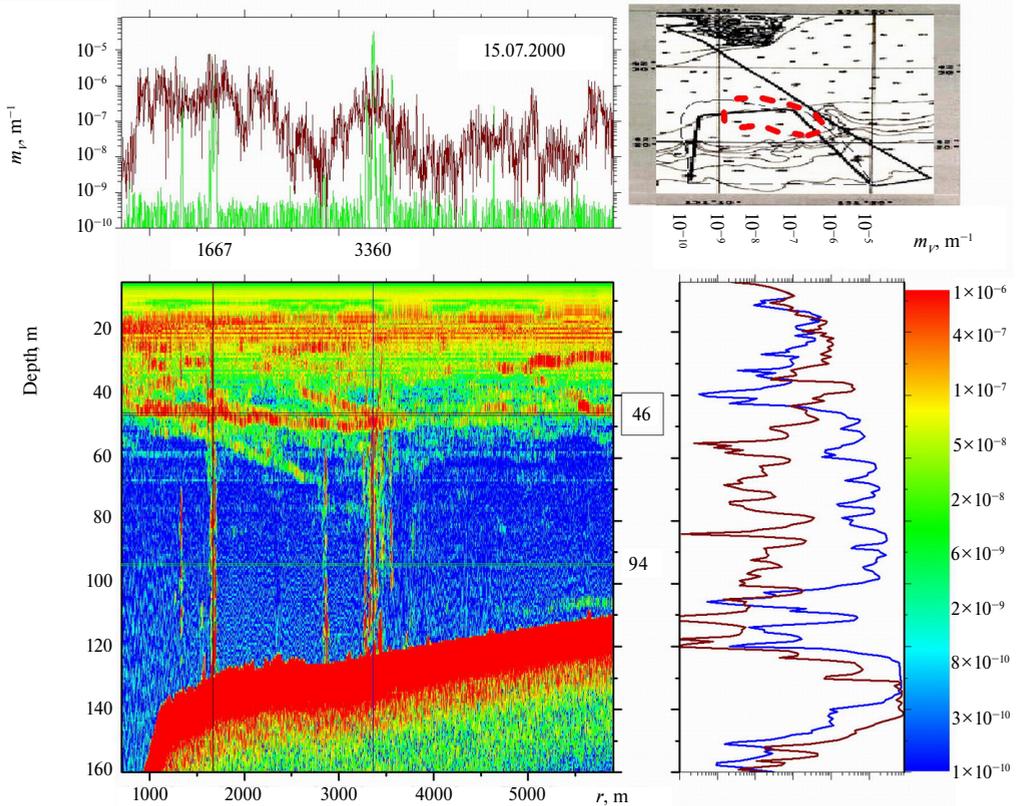


Рис. 13. Распределение рассеяния звука частоты 12,4 кГц на пузырьковых структурах на шельфе Японского моря в 15.07.2000 г. на НИС «Профессор Гагаринский»

Подводные пузырьковые факелы на шельфе Японского моря. Многочисленные подводные пузырьковые факелы ГФ были обнаружены также на шельфе Японского моря. В экспедициях НИС «Профессор Гагаринский» (рейс № 29, 15.07.2000 г., рейс № 83, 20–23.10.2022 г.) с использованием рассеяния звука на частоте 12,4 кГц пузырьковые факелы

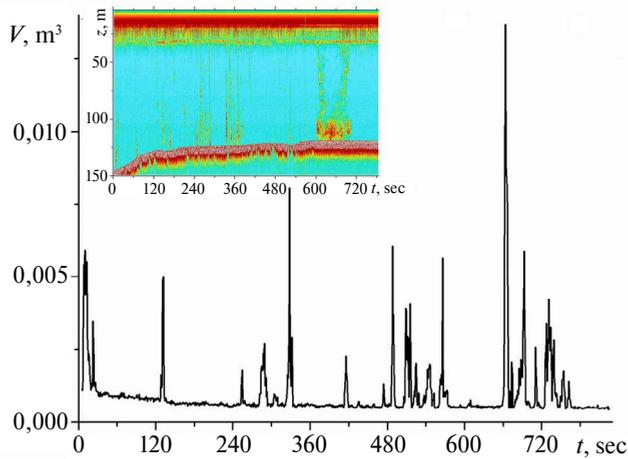


Рис. 14. Зависимость объема выходящих газов в пузырьках, составляющих ГФ, от времени вдоль трассы. На врезке – распределение коэффициента рассеяния звука частоты 12,4 кГц в зал. Петра Великого Японского моря (20–23.10.2022 г.)

были зарегистрированы недалеко от морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН на мысе Шульца, располагающейся в бух. Витязь зал. Петра Великого.

На рис. 13 и на врезке рис. 14 показано типичное распределение коэффициента рассеяния звука на пузырьковых структурах ГФ, полученное 20–23.10.2022 г. и 15.07.2000 г. на НИС «Профессор Гагаринский». Во врезке на рис. 13 показана схема маршрута НИС 15.07.2000 г. от бух. Витязь (МЭС ТОИ ДВО РАН на мысе Шульца) через область расположения ГФ, выделенную пунктирной линией. Таким образом, в указанном районе пузырьковые факелы наблюдаются в течение длительного периода. Можно оценить их вклад в долю переноса газа через поверхность океана в атмосферу. Вблизи дна моря типичные пузырьки, составляющие пузырьковые факелы, известные из литературы, имеют размеры 0,5–7 мм [20, 22, 26]. Для поверхности моря это соответствует резонансным частотам от 460 Гц до 6,4 кГц. Учитывая зависимость от глубины в формуле Миннерта, можно видеть, что на большой глубине резонанс смещается в сторону увеличения частоты [14]. В этом случае вклад в результаты может вносить резонансное рассеяние при зондировании на низкой частоте 12 кГц.

Из данных на рис. 14 можно определить суммарный объем выходящих газов в пузырьках, образующих факелы. Если предполагать, что основу содержимого пузырьков составляет метан, можно получить оценку массы выходящего метана в течение 840 с $M_2 = 0,3$ кг. Таким образом, производительность выделения газа пузырьковым факелом составляет 0,49 л/с, или 0,35 г/с. В сутки выброс метана может составить величину 42,3 м³, или 30 кг. Учитывая, что регистрация проводилась вдоль трассы протяженностью около 1 км с поперечным захватом зондирования около 20 м, можно оценить выход метана в районе зарегистрированных ГФ, приходящийся на 1 км², примерно величиной 2100 м³/сут·км², или 1,5 т/сут·км².

Заключение

Представлены акустические методы на основе широкополосного обратного рассеяния звука, позволяющие осуществлять акустическую спектроскопию гетерогенных неоднородностей. Показана аномальная структура рассеяния и распространения звука в приповерхностном слое моря, связанная с наличием пузырьковых облаков при сильном ветре. Пузырьковые облака могут увеличивать потери звука и изменять структуру акустического поля.

Представлены акустические оценки газа в пузырьковых факелах, выходящих из дна моря, которые согласуются с результатами других авторов, полученных в том числе неакустическими методами *in situ*.

Важно обратить внимание на то, что пузырьковые неоднородности наиболее сильно влияют на структуру низкочастотных полей, для которых эффективная скорость звука определяется нерезонансными пузырьками и в пределе низких частот для них пропадает частотная зависимость.

Метод рассеяния звука позволяет выполнять оценки структуры неоднородностей различного масштаба морской среды непосредственно на ходу судна с высоким пространственным разрешением. Мониторинг структуры морской среды по данным рассеяния звука особенно важен вблизи резких границ неоднородностей, когда характеристики среды изменяются на небольшом расстоянии и поэтому никакие контактные методы не позволяют осуществлять подробную пространственную съемку структуры среды вблизи таких границ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007. 370 с.
2. Hovem J.M. Marine Acoustics: The Physics of Sound in Underwater Environments. Newport Beach, CA, USA: Peninsula Publishing, 2012. 656 p.
3. Thorpe S.A. The effect of Langmuir circulation on the distribution of submerged bubbles caused by breaking wind waves // *J. Fluid Mech.* 1984. Vol. 142. P. 151–170.
4. Deane G.B. Sound generation and air entrainment by breaking waves in the surf zone // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997. Vol. 102. P. 2671–2689.
5. Medwin H. Acoustical determination of bubble size spectra // *J. Acoust. Soc. Am.* 1977. Vol. 62. P. 1041–1044.
6. Акуличев В.А., Буланов В.А., Кленин С.А. Акустическое зондирование газовых пузырьков в морской среде // *Акуст. журн.* 1986. Т. 32, № 3. С. 289–295.
7. Garrett C., Li M., Farmer D. The Connection between Bubble Size Spectra and Energy Dissipation Rates in the Upper Ocean // *J. Phys. Ocean.* 2000. Vol. 30. P. 2163–2171.
8. Thorpe S.A., Osborn T.R., Farmer D.M., Vagle S. Bubble Clouds and Langmuir Circulation // *J. Phys. Oceanogr.* 2003. Vol. 33, No. 9. P. 2013–2031.
9. Baschek B., Farmer D.M. Gas Bubbles as Oceanographic Tracers // *J. of Atmosph. and Oceanic Technol.* 2010. Vol. 27. P. 241–245.
10. Vagle S., McNeil C., Steiner N. Upper ocean bubble measurements from the NE Pacific and estimates of their role in air-sea gas transfer of the weakly soluble gases nitrogen and oxygen // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. C12054. DOI: 10.1029/2009JC005990.
11. Deane G.B., Preisig J.C., Lavery A.C. The suspension of large bubbles near the seafloor by turbulence and their role in absorbing forward-scattered sound // *IEEE Journ. of Oceanic Eng.* 2013. Vol. 38, No. 4. P. 632–641. DOI: 10.1109/JOE.2013.2257573.
12. Ainslie M., Leighton T. Review of scattering and extinction cross-sections, damping factors, and resonance frequencies of a spherical gas bubble // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. Vol. 130. P. 3184–3208.
13. Апресян Л.А. Об одном «парадоксе» в теории рассеяния // *Журнал технической физики.* 2023. Т. 93, Вып. 3. С. 332–338.
14. Акуличев В.А., Буланов В.А. Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской среде. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. 414 с. URL: <https://www.poi.dvo.ru/node/470> (дата обращения: 10.04.2024).
15. Macaulay G.J., Chu D., Ona E. Field measurements of acoustic absorption in seawater from 38 to 360 kHz // *J. Acoust. Soc. Am.* 2020. Vol. 148. P. 100–107. DOI: 10.1121/10.0001498.
16. Ainslie M.A. Effect of wind-generated bubbles on fixed range acoustic attenuation in shallow water at 1–4 kHz // *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. Vol. 118, No. 6. P. 3513–3523.
17. Liu R., Li Z. The Effects of Bubble Scattering on Sound Propagation in Shallow Water // *J. Mar. Sci. Eng.* 2021. Vol. 9. 1441.
18. Bulanov V.A., Bugaeva L.K., Storozhenko A.V. On sound scattering and acoustic properties of the upper layer of the sea with bubble clouds // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. Vol. 10. 872.
19. Зоненшайн Л.П., Мурдмаа И.О., Варанов В.В., Кузнецов А.П., Кузин В.С., Кузьмин М.И., Авдейко Г.П., Стунжас П.А., Лукашин В.П., Бараш М.С., Валяшко Г.М., Демина Л.Л. Подводный газовый источник к западу от о-ва Парамушир // *Океанология.* 1987. Т. 27, № 5. С. 795–800.

20. Leifer I., Judd A.G. Oceanic methane layers: the hydrocarbon seep bubble deposition hypothesis // *Terra Nova*. 2002. Vol. 14. P. 417–424.
21. Обжиров А.И. История открытия газогидратов в Охотском море // *Подводные исследования и робототехника*. 2006. № 2. С. 72–80.
22. Дмитриевский А.Н., Баланюк И.Е. Газогидраты морей и океанов. М.: ИРЦ Газпром, 2009. 416 с.
23. Саломатин А.С., Юсупов В.И., Верещагина О.Ф., Черных Д.В. Акустическая оценка концентрации метана в водной толще в областях его пузырьковой разгрузки // *Акуст. журн.* 2014. Т. 60, № 6. С. 636–644
24. Weidner E., Weber T.C., Mayer L., Jakobsson M., Chernykh D., Semiletov I. A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux // *Cont. Shelf Res.* 2019. Vol. 173. P. 104–115.
25. Буланов В.А., Валитов М.Г., Корсков И.В., Шакиров Р.Б. о глубоководных акустических неоднородностях в придонных слоях в Охотском и Японском море // *Подводные исследования и робототехника*. 2022. № 3 (41). С. 67–78.
26. Саломатин А.С., Юсупов В.И. Акустические исследования газовых «факелов» Охотского моря // *Океанология*. 2011. Т. 51, № 5. С. 911–919.
27. Porter M.B., Reiss E.L. A numerical method for bottom interacting ocean acoustic normal modes // *J. Acoust. Soc. Am.* 1985. Vol. 77. P. 1760–1767. URL: <http://oalib.hlsresearch.com/Modes/index.html> (date of application: April 10, 2024).

REFERENCES

1. Brekhovskikh L.M., Lysanov Y.P. *Fundamentals of Ocean Acoustics*. Berlin, Germany: Springer; 2013. 250 p.
2. Hovem J.M. *Marine Acoustics: The Physics of Sound in Underwater Environments*. Newport Beach, CA, USA: Peninsula Publishing; 2012. 656 p.
3. Thorpe S.A. The effect of Langmuir circulation on the distribution of submerged bubbles caused by breaking wind waves. *J. Fluid Mech.* 1984;142:151–170.
4. Deane G.B. Sound generation and air entrainment by breaking waves in the surf zone. *J. Acoust. Soc. Amer.* 1997;102:2671–2689.
5. Medwin H. Acoustical determination of bubble size spectra. *J. Acoust. Soc. Am.* 1977;62:1041–1044.
6. Akulichev V., Bulanov V., Klenin S. Acoustic sensing of gas bubbles in the ocean medium. *Soviet Physics. Acoustics*. 1986;32(3):177–180.
7. Garrett C., Li M., Farmer D. The Connection between Bubble Size Spectra and Energy Dissipation Rates in the Upper Ocean. *J. Phys. Ocean.* 2000;30:2163–2171.
8. Thorpe S.A., Osborn T.R., Farmer D.M., Vagle S. Bubble Clouds and Langmuir Circulation. *J. Phys. Oceanogr.* 2003;33(9):2013–2031.
9. Baschek B., Farmer D.M. Gas Bubbles as Oceanographic Tracers. *J. of Atmosph. and Oceanic Technol.* 2010;27:241–245.
10. Vagle S., McNeil C., Steiner N. Upper ocean bubble measurements from the NE Pacific and estimates of their role in air-sea gas transfer of the weakly soluble gases nitrogen and oxygen. *J. Geophys. Res.* 2010;115. C12054. DOI: 10.1029/2009JC005990.
11. Deane G.B., Preisig J.C., Lavery A.C. The suspension of large bubbles near the seasurface by turbulence and their role in absorbing forward-scattered sound. *IEEE Journ. of Oceanic Eng.* 2013;38(4):632–641. DOI: 10.1109/JOE.2013.2257573.
12. Ainslie M., Leighton T. Review of scattering and extinction cross-sections, damping factors, and resonance frequencies of a spherical gas bubble. *J. Acoust. Soc. Am.* 2011;130:3184–3208.
13. Apresyan L.A. Ob odnom “paradokse” v teorii rasseyaniya. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2023;93(3):332–338. (In Russ.). DOI: 10.21883/JTF.2023.03.54843.254-22.
14. Akulichev V.A., Bulanov V.A. Akusticheskie issledovaniya melkomasshtabnykh neodnorodnostei v morskoi srede = [Acoustic study of small-scale heterogeneities in the marine environment]. Vladivostok: TOI DVO RAN; 2017. 414 s. (In Russ.). URL: <https://www.poi.dvo.ru/node/470> (date of application: April 10, 2024).
15. Macaulay G.J., Chu D., Ona E. Field measurements of acoustic absorption in seawater from 38 to 360 kHz. *J. Acoust. Soc. Am.* 2020;148:100–107. DOI: 10.1121/10.0001498.

16. Ainslie M.A. Effect of wind-generated bubbles on fixed range acoustic attenuation in shallow water at 1–4 kHz. *J. Acoust. Soc. Am.* 2005;118(6):3513–3523.
17. Liu R., Li, Z. The Effects of Bubble Scattering on Sound Propagation in Shallow Water. *J. Mar. Sci. Eng.* 202;9. 1441.
18. Bulanov V.A., Bugaeva L.K., Storozhenko A.V. On sound scattering and acoustic properties of the upper layer of the sea with bubble clouds. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022;10. 872.
19. Zonenshain L.P., Murdmaa I.O., Varanov V.V., Kuznetsov A.P., Kuzin V.S., Kuz'min M.I., Avdeiko G.P., Stunzhas P.A., Lukashin V.P., Barash M.S., Valyashko G.M., Demina L.L. Podvodnyi gazovyi istochnik k zapadu ot o-va Paramushir. *Okeanologiya.* 1987;27(5):795–800. (In Russ.).
20. Leifer I., Judd A.G. Oceanic methane layers: the hydrocarbon seep bubble deposition hypothesis. *Terra Nova.* 2002;14:417–424.
21. Obzhairov A.I. Istoriya otkrytiya gazogidratov v Okhotskom more. *Podvodnye Issledovaniya i Robototekhnika.* 2006;2:72–80. (In Russ.).
22. Dmitrievskii A.N., Balanyuk I.E. Gazogidraty morei i okeanov. Moscow: IRTS Gazprom; 2009. 416 s. (In Russ.).
23. Salomatin A.S., Yusupov V.I., Vereshchagina O.F., Chernykh D.V. Akusticheskaya otsenka kontsentratsii metana v vodnoi tolshche v oblastiakh ego puzyr'kovoi razgruzki. *Akust. Zhurn.* 2014;60(6):636–644. (In Russ.).
24. Weidner E., Weber T.C., Mayer L., Jakobsson M., Chernykh D., Semiletov I. A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux. *Cont. Shelf Res.* 2019;173:104–115.
25. Bulanov V.A., Valitov M.G., Korskov I.V., Shakirov R.B. O glubokovodnykh akusticheskikh neodnorodnostyakh v pridonnykh sloyakh v Okhotskom i Yaponskom more // *Podvodnye Issledovaniya i Robototekhnika.* 2022;41(3):67–78. (In Russ.).
26. Salomatin A.S., Yusupov V.I. Acoustic investigations of gas “Flares” in the Sea of Okhotsk. *Oceanology,* 2011;51(5):857–865.
27. Porter M.B., Reiss E.L. A numerical method for bottom interacting ocean acoustic normal modes. *J. Acoust. Soc. Am.* 1985;77:1760–1767. URL: <http://oalib.hlsresearch.com/Modes/index.html> (date of application: April 10, 2024).

Научная статья
УДК 550.81, 550.83
DOI: 10.31857/S0869769825020036
EDN: GF1KNV

Оценка перспектив нефтегазоносных областей на акватории Охотского моря по результатам применения вероятностно-статистического анализа геолого-геофизических данных

А.Л. Харитонов

Андрей Леонидович Харитонов

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, РАН, Москва, Россия
ahariton@izmiran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0843-452X>

Аннотация. В статье представлены результаты применения вероятностно-статистического метода прогноза перспективности нефтегазоносных областей на акватории Охотского моря. Метод построен на основе использования предварительного анализа статистических рядов нескольких различных видов геолого-геофизических параметров. Объектом исследования служат локальные концентрические структуры на акватории Охотского моря; предметом исследования – прогноз нефтегазоносных областей. Рассмотрены результаты использования вероятностно-статистического метода прогноза перспективности нефтегазоносных областей по четырем видам различных геолого-геофизических данных (мощности земной коры, мощности литосферы, мощности пород осадочного слоя, значений теплового потока), измеренных в пределах расположения пятнадцати локальных концентрических структур на акватории Охотского моря. По этим данным предварительно были построены статистические гистограммы пространственного распределения значений мощности земной коры, мощности литосферы, значений теплового потока по измерениям в основных нефтедобывающих областях Охотского, Черного, Каспийского морей. В результате с помощью вероятностного метода прогноза были рассчитаны значения плотностей распределения вероятностей по данным различных четырех геолого-геофизических параметров. По рассчитанным значениям вероятностей для пятнадцати концентрических структур Охотского моря по четырем видам геолого-геофизических параметров была составлена сводная таблица данных и выявлены восемь локальных концентрических структур, перспективных для поисков новых месторождений нефти и газа.

Ключевые слова: Охотское море, вероятностно-статистический метод, прогноз, нефтегазоносные области

Для цитирования: Харитонов А.Л. Оценка перспектив нефтегазоносных областей на акватории Охотского моря по результатам применения вероятностно-статистического анализа геолого-геофизических данных // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 33–44.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020036>

Благодарности. Автор искренне благодарит докторов геолого-минералогических наук А.И. Тимурзиева, Р.Б. Сейфуль-Мулюкова, В.Л. Сывороткина – организаторов ежегодных конференций «Кудрявцевские чтения» за их огромную работу по организации этих конференций и за возможность проанализировать замечания, поступившие при изложении доклада и устранить их в рамках данной статьи.

Original article

Assessment of the prospects of oil and gas-bearing areas in the waters of the Sea of Okhotsk based on the results of the application of probabilistic and statistical analysis of geological and geophysical data

A.L. Kharitonov

Andrey L. Kharitonov

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Leading Researcher
Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
ahariton@izmiran.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0843-452X>

Abstract. The article presents the results of the application of the probabilistic and statistical method of forecasting the prospects of oil and gas-bearing areas in the waters of the Sea of Okhotsk. The method is based on the use of a preliminary analysis of statistical series of several different types of geological and geophysical parameters. The object of the study of this article is the local concentric structures in the waters of the Sea of Okhotsk. The subject of this article is the forecast of oil and gas bearing areas. The results of using a probabilistic statistical method for predicting the prospects of oil and gas-bearing areas for four types of different geological and geophysical data (crustal thickness, lithosphere thickness, sedimentary rock thickness, heat flux values) measured within the location of fifteen local concentric structures in the Sea of Okhotsk are considered. Based on these data, statistical histograms of the spatial distribution of the values of the thickness of the earth's crust, the thickness of the lithosphere, and the values of heat flux were previously constructed according to measurements in the main oil-producing regions of the Okhotsk, Black, and Caspian Seas. As a result, using the probabilistic forecasting method, the values of the probability distribution densities were calculated according to the data of various four geological and geophysical parameters. According to the calculated probability values for fifteen concentric structures of the Sea of Okhotsk, according to four types of geological and geophysical parameters, a summary data table was compiled and eight local concentric structures promising for the search for new oil and gas fields were identified.

Keywords: Sea of Okhotsk, probabilistic and statistical method, forecast, oil and gas bearing areas

For citation: Kharitonov A.L. Assessment of the prospects of oil and gas-bearing areas in the waters of the Sea of Okhotsk based on the results of the application of probabilistic and statistical analysis of geological and geophysical data. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2):33–44. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020036>

Acknowledgements. The author sincerely thanks doctors of geological and mineralogical sciences A.I. Timurziev, R.B. Seiful-Mulyukov, V.L. Syvorotkin – organizers of the annual conferences “Kudryavtsev Readings” for their enormous work in organizing these conferences and for the opportunity to analyze the comments received during the presentation of the report and to eliminate them within the framework of this article.

Введение

Известно [1–4], что в результате постоянной дегазации мантии Земли, происходившей в течение многих миллионов лет эволюционных тектоно-магматических процессов на Земле [1–9], поступали газотермальные и гидротермальные потоки геофлюидов различного химического состава (метан и другие природные углеводороды), которые, проникая через сеть тектонических разломов и трещин в пределах расположения концентрических структур (КС), постепенно могли сформировать месторождения углеводородов на акватории Охотского моря (рис. 1).

Как можно видеть из рис. 1, концентрические изолинии мощности земной коры связаны с расположением достаточно крупных по диаметру (более 100 км) КС на акватории Охотского моря, которые пространственно коррелируют с расположением нефтегазоносных областей (НГО).

Исходные материалы

В акватории шельфовых зон Охотского моря недавно выявлено несколько нефтеперспективных концентрических структур (Северо-Сахалинская, Южно-Сахалинская, Западно-Камчатская, Магаданская, Шантарская, Дерюгинская, Тинровская, Гольгинская, Южно-Охотская, Срединно-Курильская, Центрально-Охотская и др.). Но насколько эти КС будут перспективны для поисков месторождений нефти и газа, еще предстоит оценить. В настоящее время в нашей стране в геологических фондах накоплено значительное количество различных геолого-геофизических данных в виде карт разных масштабов, созданных с помощью 5 основных геофизических методов геологоразведки (сейсморазведка, гравиразведка, магниторазведка, геотермия, электроразведка), поэтому в данной статье предлагается рассмотреть вероятностно-статистическую методику, использующую несколько геолого-геофизических параметров, которые могут использоваться для оценки нефтегазовых перспектив некоторых КС, выявленных на акватории Охотского моря. На основании изложенных в [1–9] данных можно предположить, что это будут значения: 1) мощности земной коры (H_k); 2) мощности литосферного слоя (H_d), которые характеризуют наличие глубоких «корней» мантийных диапиров [2; 7, 8], позволяющих через них идти процессам дегазации мантии из коровых и литосферных линз частичного плавления пород мантии; 3) мощности пород осадочного слоя (H_o); 4) аномалий теплового потока (Q), часто расположенных в зонах мантийных диапиров и подводных вулканов, через тектонические структуры которых идет ускоренный тепломассоперенос геофлюидов в осадочный слой земной коры. Почему были выбраны именно эти геолого-геофизические параметры (H_k , H_d , H_o , Q) для прогноза нефтегазовой перспективности КС на акватории Охотского моря? Из ранее проведенных автором исследований на акватории Каспийского и Черного морей стало известно [10], что многие месторождения нефти и газа связаны с несколько повышенной мощностью пород земной коры (рис. 1) и литосферы (рис. 2), которые часто встречаются в зонах расположения КС.

Поскольку большая часть КС [6] сформирована мантийными диапирами с глубокими «корнями» [2, 7, 8, 12], то обычно под действием повышенного тепломассопереноса горячего мантийного вещества в этих зонах – частичное плавление пород земной коры и мантии и вследствие этого происходит некоторое увеличение мощности земной коры (H_k) и мощности литосферы (H_d) в целом, отличающиеся от остальных регионов верхней мантии. Поэтому для поисков новых нефтеперспективных КС в Охотоморском регионе, по-видимому, было бы целесообразно, чтобы в первую очередь были проанализированы

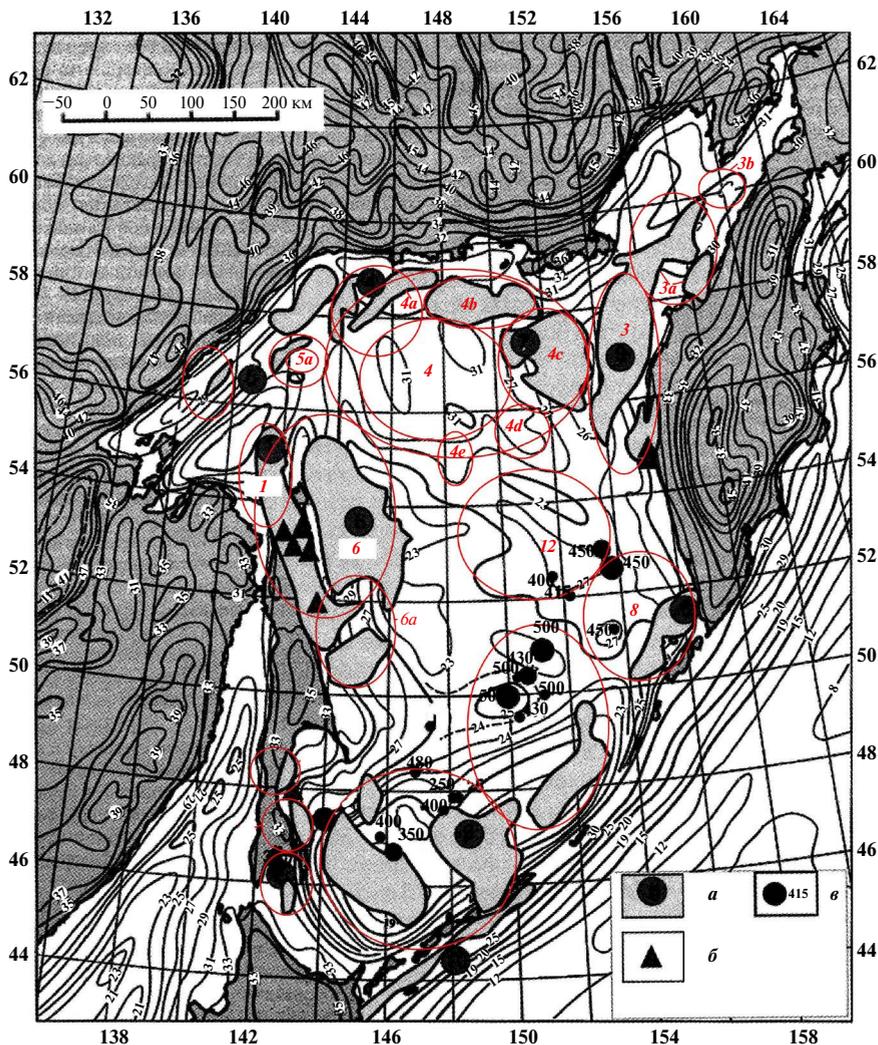


Рис. 1. Карта мощности земной коры Охотоморского региона [9, с дополнениями автора]. Условные обозначения: *a* – прогнозируемые нефтегазоносные области (НГО) на акватории Охотского моря, связанные с концентрическими структурами (КС); *b* – наиболее крупные месторождения нефти и газа на акватории Охотского моря; *v* – эпицентры глубинных землетрясений, произошедших с 1965 г., с указанием их глубины (км). Размеры знаков отражают магнитуду (4.0–6.5) землетрясений; Окружностями выделены зоны расположения КС, связанные с прогнозируемыми НГО на акватории Охотского моря: 1 – Северо-Сахалинская; 2 – Южно-Сахалинская; 3 – Западно-Камчатская; 4 – Магаданская; 5 – Шантарская; 6 – Дерюгинская; 7 – Тинровская; 8 – Голыгинская; 9 – Южно-Охотская; 10 – Срединно-Курильская; 11 – Центрально-Охотская; 12 – Татарская

данные о значениях мощности земной коры (рис. 1) [9], мощности литосферы [11] (рис. 2), мощности осадочного слоя [13] (рис. 3) и теплового потока [14] (рис. 3).

Известно [2, 7, 8], что через зоны мантийных диапиров и сформированных ими КС [6] на поверхности кристаллического фундамента земной коры в течение многих миллионов лет шел, а в некоторых регионах и сейчас продолжается интенсивный теплоперенос и миграция углеводородных геофлюидов из мантии [3, 4]. Поэтому при подготовке настоящей статьи были проанализированы также значения теплового потока (Q) (в диапазоне от $Q < 17$ до $Q > 117$ мВт/м²) [14] в пределах всех известных нефтеперспективных областей [9] на акватории Охотского моря по данным, представленным на соответствующей карте (рис. 3).

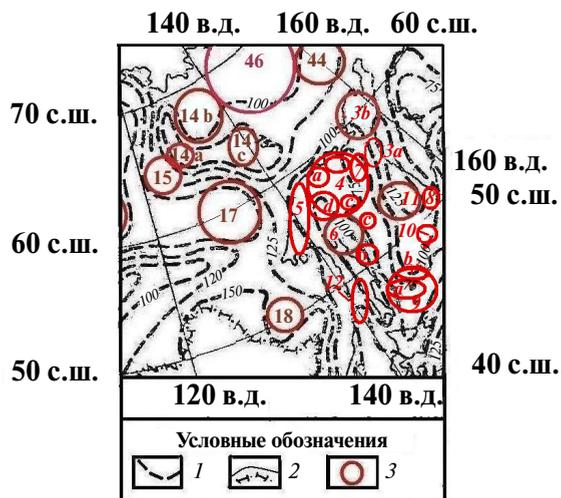


Рис. 2. Фрагмент карты изолиний мощности литосферы ($H_{л}$) для территории Охотоморского региона [11, с дополнениями автора]. Условные обозначения: 1 – изолинии значений мощности литосферы; 2 – государственная граница Российской Федерации; 3 – место расположения КС. Номера и названия КС см. в подписи к рис. 1

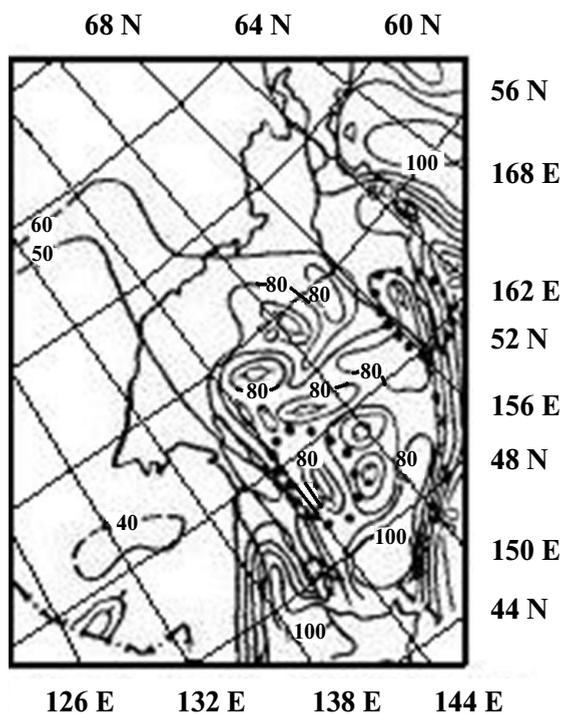


Рис. 3. Фрагмент карты теплового потока Российской Федерации [14, с дополнениями автора]

Методы исследования

В качестве методики прогноза нефтегазовой перспективности КС, расположенных на акватории Охотского моря, предлагается использовать элементы теории вероятности и математической статистики [15–17]. В настоящей статье на основании разрабатываемой методики вероятностного анализа [15–17] с использованием четырех разных видов

геолого-геофизических данных: значениями мощности земной коры (H_k) [9] и мощности литосферы (H_l) [11], мощности пород осадочного слоя (H_o) [13], значениями геотермальной энергии (Q) [14]. Все критерии принятия решений о наличии (или отсутствии) определенных значений геолого-геофизических параметров (H_k, H_l, H_o, Q), характерных для НГО в пределах нескольких акваторий морей РФ, в этой статье базируются на теории проверки статистических гипотез (I и II рода) [15–17]. При этом необходима информация, содержащаяся в данных гистограмм $N(\Phi)$ и графиках плотностей распределения для гипотезы наличия $p(\Phi/H_i)$ и отсутствия $p(\Phi/H_o)$ определенного вида значений (так называемые аномалии) в анализируемых видах ГГД. Поэтому на основе рядов цифровых ГГД, снятых с карт [9, 11, 13–14], были произведены расчет и построение гистограмм $N(\Phi_i)$ по значениям четырех видов ГГД (H_k, H_l, H_o, Q). Гистограмма, так же, как и понятие классической вероятности, описывает распределение частот $N(\Phi) = (m/n)$, определяемых для каждого из n – общего количества значений (Φ) ряда случайных величин определенного вида ГГД [15–17]. Обозначим фиксированную выборку ряда из n исследуемых значений $f(x_j)$ какого-либо вида ГГД ($\Phi(x_j)$) как

$$\Phi_i(x_j) = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)]. \quad (1)$$

На рис. 4 представлены гистограммы распределения значений рядов следующих видов ГГД: вертикальной мощности земной коры $N(H_k)$ [9], вертикальной мощности литосферы $N(H_l)$ [11], вертикальной мощности осадочного слоя $N(H_o)$ [13], теплового потока на поверхности морского дна $N(Q)$ [14], зафиксированных в пределах всех КС, расположенных в одноименных перспективных НГО на акватории Охотского моря.

Из представленной на (рис. 4, А) гистограмме $N(H_k)$ видно, что многие перспективные НГО на акватории Охотского моря (рис. 1) [9] расположены в регионах, где наблюдаются в среднем несколько повышенные значения мощности субокеанической коры ($H_k = 27$ км) по сравнению со средними значениями этого параметра по всему Охотскому морю в целом ($H_k = 25$ км). На акватории российской части Берингова моря, соседнего с Охотским морем, среднее значение мощности океанической коры составляет еще меньшую величину ($H_k = 10$ км). На построенной гистограмме $N(H_l)$ (рис. 4, Б) выделяется экстремальное значение мощности литосферы в центральной части Охотского моря, равное 75 км, которое зафиксировано в пределах всех перспективных и уже эксплуатируемых НГО на акватории Охотского моря. Как видно из гистограммы на рис. 4, В, в прибрежных зонах Охотоморского региона и в пределах о-ва Сахалин, т.е. в переходной зоне от субокеанической литосферы

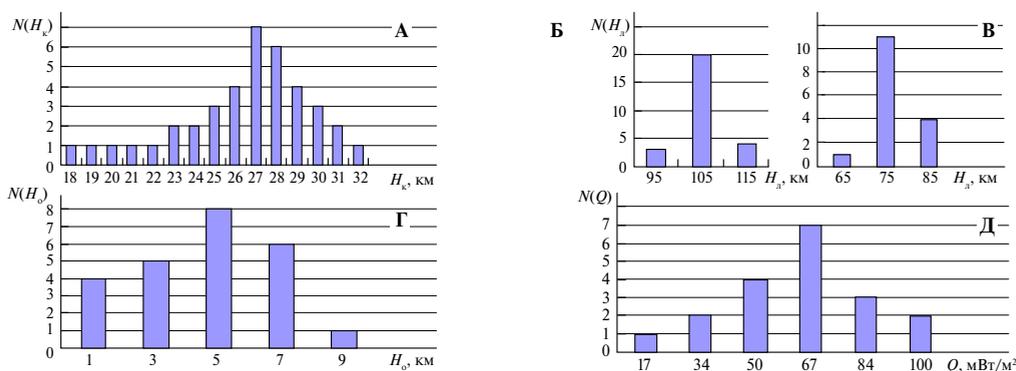


Рис. 4. Гистограммы, характерные для всех вместе перспективных НГО на акватории Охотского моря (включая эксплуатируемые месторождения Северо-Сахалинской НГО), построенные по следующим видам ГГД: А – мощность земной коры $N(H_k)$ по данным оцифрованной карты [9]; Б – мощность литосферы $N(H_l)$ в западной части Охотского моря по данным оцифрованной карты [11]; В – мощность литосферы $N(H_l)$ в центральной и восточной частях Охотского моря по данным оцифрованной карты [11]; Г – мощность пород осадочного слоя по данным оцифрованной карты [13]; Д – значения теплового потока $N(Q)$ по данным оцифрованной карты [14]

к континентальной, мощность литосферы резко возрастает до экстремальных значений 105 км. Из гистограммы, представленной на рис. 4, Г, видно, что экстремальное значение мощности пород осадочного слоя в пределах перспективных НГО Охотского моря составляет 8 км, а по проведенным автором расчетам экстремальное значение мощности пород осадочного слоя на всей акватории Охотского моря составляет в среднем 3 км. Гистограмма $N(Q)$, построенная на рис. 4, Д, показывает, что геотермальная энергия в пределах всех перспективных НГО, проанализированных на акватории Охотского моря, в настоящий геологический период имеет пониженные значения теплового потока (в экстремуме гистограммы $Q = 67$ мВт/м²), измеренного на поверхности морского дна. Пониженные значения теплового потока (67 мВт/м²) в районах расположения КС, в пределах которых выделены перспективные НГО Охотского моря, могут быть связаны с тем, что палеомантийные диапиры, сформировавшие КС, в настоящее время прекратили активную дегазационную деятельность. Высокие значения теплового потока ($Q = 100$ мВт/м² и более) в Охотском море, фиксируемые на морском дне, чаще всего связаны с действующими подводными вулканами.

Затем необходимо было проверить, соответствуют ли значения построенной по данным гистограммы статистической плотности распределения определенному виду теоретической плотности распределения (Гауссовому, логнормальному, равномерному, Пуассона, Пирсона, Стьюдента, Фишера и др.) [15–17]. Для этого был использован критерий Колмогорова [16], который можно представить в следующем виде:

$$\lambda = D \cdot \left[\sqrt{n} \right], \quad (2)$$

где $D = \max | Y_n(x) - Y(x) |$ – максимум модуля разности между статистической (выборочной) функцией распределения $Y_n(x)$ и теоретической $Y(x)$. Вероятность их соответствия определяется по данным соответствующих таблиц [15–17]. Согласно проведенным расчетам по критерию Колмогорова [16] плотности распределения $p(H_n/H_1)$ выборочных значений рядов мощности субокеанической коры, мощности субокеанической литосферы $p(H_n/H_1)$, мощности пород осадочного слоя, значений теплового потока на акватории Охотского моря $p(Q/H_1)$ оказались близкими к закону распределения Гаусса (рис. 5).

По результатам проведенных расчетов можно показать, что данные о мощности субокеанической коры Охотского моря (рис. 5) свидетельствуют о нормальном законе плотности распределения Гаусса. по результатам проведенных расчетов можно показать, что данные о мощности субокеанической литосферы Охотского моря также свидетельствуют о законе плотности распределения Гаусса (рис. 5). Кривая условной плотности распределения $p(H_n)$ значений мощности литосферы, аппроксимированная с помощью нормального закона

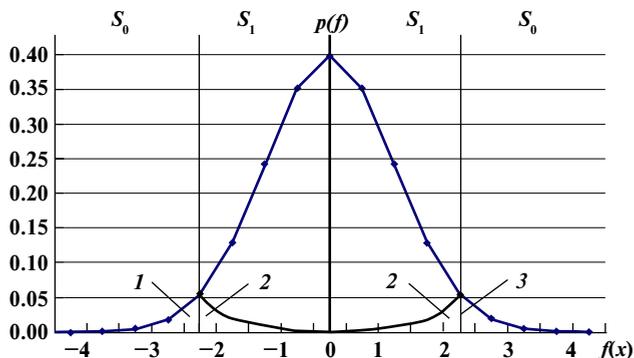


Рис. 5. Кривая теоретической плотности распределения $p(f)$, соответствующая нормальному закону (Гаусса) распределения значений мощности земной коры (H_k), значений мощности литосферы (H_l), характерная для НГО Охотского моря. S_0 – область отклонения гипотезы о наличии аномалии ($f_0 = H_k = 27$ км); S_1 – область принятия гипотезы о наличии аномалии ($f_0 = H_k = 27 \pm 5$ км); 1 – α – вероятность ошибки I рода; 2 – β – вероятность ошибки II рода; 3 – h – величина порога принятия решения

распределения (Гаусса), характеризует вероятностную связь аномалий глубины залегания нижней кромки литосферного слоя (H_n) в зонах расположения основных НГО отдельно для западной ($f_0 = H_n = 105$ км) и центрально-восточной частей ($f_0 = H_n = 75$ км) Охотского моря. Кривая рассчитанной условной плотности распределения $p(Q)$ значений теплового потока, аппроксимированная согласно [15–17] с помощью закона распределения Гаусса, также была построена ($f_0 = Q = 67$ мВт/м²) по данным измерения в пределах расположения основных НГО на акватории Охотского моря.

Из данных, приведенных на рис. 5, можно видеть, что на графике теоретической плотности распределения Гаусса $p(\Phi_i/H_i)$ мощности осадочного слоя на акватории Охотского моря существуют две области (α, β), связанные с ошибками I и II рода. Вероятность ошибки I рода, обнаружения ложной аномалии (α), определяется следующим интегральным выражением:

$$\alpha = \int p(\Phi_i/H_0) d\Omega(\Phi), \quad (3)$$

где $d\Omega(\Phi)$ – n -мерное пространство выборки анализируемых значений определенного вида ГГД.

Вероятность ошибки II рода, пропуска действительной аномалии (β), определяется следующим интегральным выражением:

$$\beta = \int p(\Phi_i/H_1) d\Omega(\Phi). \quad (4)$$

По данным, представленным на графиках теоретических функций распределения разных видов ГГД, собранных в пределах территории, занимаемой перспективными НГО на акватории Охотского моря (рис. 5), были определены значения априорных вероятностей ошибок I и II рода $P_a(\Phi_i/H_0), P_a(\Phi_i/H_1)$.

В результате подсчета суммарных значений этих вероятностных параметров (α, β), зафиксированных в зонах пересечения кривых плотностей распределения (рис. 5), можно определить значение среднего риска принятия решения по формуле

$$r(h) = C_\alpha \times P_a(\Phi_i/H_0) \times \alpha + C_\beta \times P_a(\Phi_i/H_1) \times \beta, \quad (5)$$

где $P_a(\Phi_i/H_1), P_a(\Phi_i/H_0)$ называются априорными вероятностями гипотез наличия H_1 и отсутствия H_0 полезной аномалии; C_α и C_β – цены ошибок I и II рода.

Посредством использования этих данных определялись значения порога (h) принятия, разделяющего пространство $d\Omega(\Phi)$ значений используемого вида ГГД на две области S_1 и S_0 условной плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$ и $p(\Phi_i/H_0)$ (рис. 5). Минимизация среднего риска по критерию Байеса приводит к определению значения порога принятия решения равному

$$h = [C_\alpha \times P_a(\Phi_i/H_0)] / [C_\beta \times P_a(\Phi_i/H_1)]. \quad (6)$$

Далее по каждому виду ГГД, оцифрованных с одноименных карт, в пределах каждой из 15 анализируемых КС на акватории Охотского моря определялось среднее значение каждого вида ГГД. Затем для этого среднего значения ГГД, полученного в пределах каждой КС на основании сравнения с графиком теоретической плотности распределения, проводился расчет коэффициента правдоподобия (Λ) для каждой исследуемой КС по следующей формуле [16]:

$$\Lambda(\Phi_i) = [p(\Phi_i/H_1) / p(\Phi_i/H_0)]. \quad (7)$$

Для каждой исследуемой КС проводилось сравнение рассчитанного порогового значения (h), определенного по каждому виду ГГД на акватории Охотоморского региона,

с коэффициентом правдоподобия (Λ). Если значения коэффициента правдоподобия (Λ) для исследуемой КС было выше порогового значения (h) исследуемого вида ГГД, то принималось решение о гипотезе наличия (H_1) аномалии этого вида ГГД, в противном случае – решение о гипотезе ее отсутствия (H_0) в пределах этой КС. В случае принятия решения о гипотезе наличия (H_1) аномалии исследуемого вида ГГД по значениям теоретической плотности распределения рассчитывалось значение вероятности для каждой исследуемой КС по каждому виду ГГД. Для этого использовался график одномерной теоретической плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$, расположенный в области S_1 .

Известно, что одномерная теоретическая плотность распределения $p(\Phi_i/H_1)$ случайного процесса определяет вероятность того, что значения этого процесса в произвольный момент (x) расположения на профиле измерений будут заключены в определенном интервале ($\Delta\Phi_i$) и при этом значения вероятности $P(\Phi_i)$ и теоретической плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$ случайного процесса могут быть представлены в виде следующей формулы [15–17]:

$$P\{\Phi_i < [\Phi_i(x)/H_1] < \Phi_i + \Delta\Phi_i\} \approx p(\Phi_i/H_1) \times \Delta\Phi_i. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что вероятность $P(\Phi_i/H_1)$ наличия определенного события (аномалии определенного вида ГГД) (Φ_i) с точностью до величины этого интервала ($\Delta\Phi_i$) будет соответствовать значению теоретической плотности распределения $p(\Phi_i/H_1)$ случайного процесса, которые для анализируемых видов ГГД представлены на рис. 5.

В пределах каждой из 15 исследуемых КС на акватории Охотского моря сначала было выполнено определение необходимого количества точек для каждой КС. Для всех КС, на основании вышеизложенных методов обработки данных, был произведен расчет вероятностей по всем 4 исследуемым видам ГГД в пределах каждой из 15 КС на акватории Охотского моря.

Для получения окончательного результата проведенных исследований по вероятностям всех 4 видов используемых ГГД $P_i(\Phi)$ (i – номер определенного вида ГГД) производилась оценка среднего значения вероятности $P_c(\Phi)$ в пределах каждой из 15 КС. Кроме того, можно считать, что для вычисления вероятностей всех исследуемых видов ГГД ($H_k, H_{л}, H_o, Q$) используют статистически независимые ГГД. При этом выявление одного из статистических событий не изменяет вероятности появления других статистических событий по другому виду ГГД.

Результаты исследований

В этом разделе статьи представлены результаты вероятностно-статистического анализа четырех геолого-геофизических параметров ($H_k, H_{л}, H_o, Q$) и на этой основе можно сделать прогноз, где могут быть расположены новые НГО на территории Охотоморского региона. В результате проведения вероятностно-статистического анализа, выполненного по региональным геолого-геофизическим данным по 15 КС, расположенным в пределах акватории Охотоморского региона, были произведены расчеты, систематизированные в виде таблицы.

Представленные данные (см. таблицу) могут служить некоторыми вероятностными критериями для поиска новых нефтегазоносных областей на акватории Охотского моря. Результаты вероятностного анализа показывают, что наиболее информативными прогнозными параметрами из них являются: мощность земной коры (H_k); мощность литосферы ($H_{л}$); мощность пород осадочного слоя (H_o). Другие геолого-геофизические данные, такие как значения теплового потока (Q) [14], оказались менее информативными, поскольку значения теплового потока в пределах всех анализируемых КС были менее интенсивными, чем в зонах расположения подводных вулканов. Поэтому параметр (Q) не всегда позволяет хорошо выделять нефтеперспективные КС. Кроме того, на основании проведенных расчетов статистических отклонений от средних значений вероятности (dP_c) (см. таблицу) можно сказать,

**Расчет значений вероятности нефтегазовой перспективности 15 КС,
расположенных на акватории Охотоморского региона**

№	Название КС	$P(H_k)$	$P(H_d)$	$P(H_o)$	$P(Q)$	$P_{\text{сред}}$
1	Северо-Сахалинская	0,36	0,99	0,99	0,21	0,64
2	Южно-Сахалинская	0,99	0,99	0,90	0,01	0,73
4a	Магаданская	0,37	0,56	0,63	0,99	0,64
4c	КС(151E-56N)	0,88	0,99	0,73	0,04	0,66
4d	КС(148E-55N)	0,60	0,99	0,73	0,75	0,77
4e	Ионоостровская	0,99	0,99	0,90	0,33	0,81
5	Шантарская	0,64	0,96	0,43	0,38	0,60
6a	Дерюгинская	0,99	0,33	0,95	0,55	0,71
6b	Центрально-Сахалинская	0,12	0,10	0,99	0,17	0,35
6c	КС(148E-53N)	0,33	0,99	0,73	0,04	0,53
9a	КС(146E-46N)	0,01	0,99	0,75	0,18	0,49
9b	Южно-Охотская	0,01	0,99	0,99	0,91	0,73
9c	КС(145E-48N)	0,05	0,99	0,99	0,33	0,60
10	Срединно-Курильская	0,33	0,99	0,90	0,99	0,81
11	Центрально-Охотская	0,88	0,08	0,92	0,20	0,52
12	Татарская	0,60	0,99	0,99	0,95	0,89
$P_i(\Phi)$		0,54	0,86	0,84	0,47	0,64

что новые нефтегазовые месторождения могут быть связаны с территорией следующих КС: Татарская, Ионоостровская, КС(151E-56N), КС(148E-55N), а также с уже достаточно хорошо изученными территориями Дерюгинской, Южно-Сахалинской, Срединно-Курильской, Южно-Охотской КС (рис. 1). Остальными исследуемыми территориями КС, которые по результатам расчетов можно рассматривать как пока недостаточно изученные территории для поисков месторождений горючих полезных ископаемых, являются Магаданская, Шантарская, КС(145E-48N) из-за недостатка у автора некоторых видов более детальных геолого-геофизических данных. Малоперспективными для поисков месторождений нефти и газа можно считать следующие КС: Центрально-Сахалинская, КС(148E-53N), КС(146E-46N), Центрально-Охотская.

Выводы

Рассмотрены результаты применения вероятностных методов интерпретации, использованных для прогноза нефтегазовой перспективности территорий в пределах 15 КС Охотоморского региона, полученных по данным четырех геолого-геофизических параметров.

По итогу проведенных исследований на территории Охотоморского региона из 15 проанализированных КС выделено 8 нефтегазоперспективных структур (Дерюгинская, Южно-Сахалинская, Срединно-Курильская, Южно-Охотская, Татарская, Ионоостровская, КС(151E-56N), КС(148E-55N), в которых рекомендуется провести детальные геолого-разведочные работы для поисков месторождений нефти и газа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тимурзиев А.И. Миф «энергетического голода» от Хабберта и пути воспроизводства ресурсной базы России на основе реализации проекта «Глубинная нефть» // *Бурение и нефть*. 2019. № 1. С. 12–20.
2. Валяев Б.М. Углеводородная дегазация Земли, геотектоника и происхождение нефти и газа (признание и развитие идей П.Н. Кропоткина) // *Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений: материалы Всерос. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения П.Н. Кропоткина*. М.: ГЕОС, 2011. С. 10–32.
3. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: Геоинформцентр, 2002. 250 с.
4. Сейфуль-Мулюков Р.Б. Нефть и газ. Глубинная природа и ее прикладное значение. М.: Торус Пресс, 2012. 216 с.
5. Карта морфоструктур центрального типа территории СССР. Масштаб 1: 10 000 000 (объяснительная записка) / под ред. В.В. Соловьева. М.: Аэрогеология, 1981. 44 с.
6. Eppelbaum L.V. Localization of Ring Structures in Earth's Environments // *Journal of the Archaeological Soc. of the Slovakian Acad. of Sci.* 2007. Vol. 41. P. 145–148.
7. Eppelbaum L.V., Zvi B.A., Katz Y., Cloetingh S., Kaban M.K. Giant quasi-ring mantle structure in the African-Arabian junction: Results derived from the geological-geophysical data integration // *Geotectonics*. 2021. Vol. 55 (1). P. 58–82. DOI: 10.1134/S0016852121010052.
8. Гаврилов С.В. Проникновение теплового диапира в континентальную литосферную плиту из неьютоновской верхней мантии // *Физика Земли*. 1994. № 7/8. С. 18–26.
9. Маракушев А.А., Маракушев С.А. Эндогенные углеводороды и органические вещества на Земле и космических объектах // *Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений: материалы Всерос. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения П.Н. Кропоткина*. М.: ГЕОС, 2011. С. 42–68.
10. Харитонов А.Л. Методология прогноза нефтегазовой перспективности южных регионов европейской части России // *Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Сер. География, геология*. 2023. № 4. С. 175–179.
11. Чермак В. Геофизические поля, их природа и геологическая интерпретация // *Геодинамика*. 1986. Т. 5, № 2. С. 111–256.
12. Гаврилов С.В., Харитонов А.Л. Определение месторасположения нефтеперспективных площадей для разведочного бурения в зонах субдукции на основе использования термодинамического метода // *Бурение и нефть*. 2024. № 1. С. 38–43.
13. Беляевский Н.А. Строение земной коры континентов по геолого-геофизическим данным. М.: Недра, 1981. 431 с.
14. Карта геотермальных ресурсов России. Масштаб 1:30 000 000 / под ред. А.А. Смылова. Л.: ВСЕГЕИ, 1995. 1 л.
15. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 464 с.
16. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике. Справочник геофизика / под ред. В.И. Дмитриева. М.: Недра, 1982. 222 с.
17. Никитин А.А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. М.: Недра, 1979. 280 с.

REFERENCES

1. Timurziev A.I. The myth of “energy hunger” from Hubbert and the ways of reproduction of the resource base of Russia on the basis of the implementation of the project “Deep Oil”. *Drilling and Oil*. 2019;(1):12–20. (In Russ.).
2. Valyaev B.M. Hydrocarbon degassing of the Earth, geotectonics and the origin of oil and gas (recognition and development of the ideas of P.N. Kropotkin). *Degassing of the Earth and the Genesis of Oil and Gas Fields: Mater. Vseros. conf., dedicated to the 100th anniversary of the birth of P.N. Kropotkin*. Moscow: GEOS; 2011. P. 10–32. (In Russ.).
3. Syvorotkin V.L. Deep degassing of the Earth and global catastrophes. Moscow: Geoinformtsentr; 2002. 250 p. (In Russ.).
4. Seiful-Mulyukov R.B. Oil and gas. Deep nature and its applied significance. Moscow: Torus Press; 2012. 216 p. (In Russ.).

5. Soloviev V.V. (Ed.) Map of morphostructures of the central type of the territory of the USSR. Scale 1:10 000 000 (Explanatory note). Moscow: Aerogeologiya; 1981. 44 p. (In Russ.).
6. Eppelbaum L.V. Localization of Ring Structures in Earth's Environments. *Journal of the Archaeological Soc. of the Slovakian Acad. of Sci.* 2007;XLI:145–148.
7. Eppelbaum L.V., Zvi B.A., Katz Y., Cloetingh S., Kaban M.K. Giant quasi-ring mantle structure in the African-Arabian junction: Results derived from the geological-geophysical data integration. *Geotectonics.* 2021;55(1):58–82. DOI: 10.1134/S0016852121010052.
8. Gavrilov S.V. Penetration of thermal diapirs into the continental lithospheric plate from the non-Newtonian upper mantle. *Physics of the Earth.* 1994;(7/8):18–26. (In Russ.).
9. Marakushev A.A., Marakushev S.A. Endogenous hydrocarbons and organic substances on Earth and space objects. *Degassing of the Earth and the Genesis of Oil and Gas Fields: Mater. All-Russian conf., dedicated to the 100th anniversary of the birth of P.N. Kropotkin.* Moscow: GEOS; 2011. P. 42–68. (In Russ.).
10. Kharitonov A.L. Methodology of forecasting the oil and gas prospects of the southern regions of the European part of Russia. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Ser. Geography, Geology.* 2023;4:175–179. (In Russ.).
11. Chermak V. (Ed.) Geophysical fields, their nature and geological interpretation. *Geodynamics.* 1986;5(2):111–256. (In Russ.).
12. Gavrilov S.V., Kharitonov A.L. Determination of the location of oil-prospective areas for exploration drilling in subduction zones based on the use of the thermodynamic method. *Drilling and Oil.* 2024;(1):38–43. (In Russ.).
13. Belyaevsky N.A. The structure of the Earth's crust of continents according to geological and geophysical data. Moscow: Nedra; 1981. 431 p. (In Russ.).
14. Smyslov A.A. (Ed.) Map of Russia's geothermal resources. Scale 1:30 000 000. Leningrad: VSEGEI; 1995. 1 p. (In Russ.).
15. Bendat J., Piersol A. Measurement and analysis of random processes. Moscow: Mir; 1974. 464 p. (In Russ.).
16. Dmitriev V.I. (Ed.) Computational mathematics and technology in exploration geophysics. *Handbook of Geophysics.* Moscow: Nedra; 1982. 222 p. (In Russ.).
17. Nikitin A.A. Statistical methods for the identification of geophysical anomalies. Moscow: Nedra; 1979. 280 p. (In Russ.).

Научная статья
УДК 553.411
DOI: 10.31857/S0869769825020047
EDN: GFIDZD

О золотом оруденении черносланцевого и карлинского типов в Верхне-Биджанском золотоносном узле Хинганской рудоносной области (Дальний Восток)

А.М. Жирнов

Анатолий Михайлович Жирнов

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник
Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия
zhanmich@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4538-9382>

Аннотация. Рассматриваются новые типы золотого оруденения в Верхне-Биджанском золотоносном узле Еврейской автономной области, весьма перспективном в регионе. В пределах рудного узла наиболее перспективны Талачинское и Желтогорское золотоносные поля, расположенные в поперечном тектоническом блоке относительно региональных рудо-контролирующих разломов. Талачинское золотоносное поле локализовано в черносланцевой толще рифея. В рудном поле выявлена контрастная геохимическая аномалия золота длиной 0,6 км. В Желтогорском золотоносном поле околнурена залежь кварцевых джаспероидов длиной 1,3 км, подобная залежи на месторождении Твин-Крик в США. По геолого-структурным и геохимическим условиям Верхне-Биджанский золотоносный узел перспективен для выявления промышленных месторождений золота крупного-среднего масштаба.

Ключевые слова: Еврейская автономная область, Верхне-Биджанский золотоносный узел, региональные разломы, геохимические аномалии золота, вероятные месторождения золота

Для цитирования: Жирнов А.М. О золотом оруденении черносланцевого и карлинского типов в Верхне-Биджанском золотоносном узле Хинганской рудоносной области (Дальний Восток) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 45–56. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020047>

Благодарности. Автор весьма благодарен коллеге по работе Горюхину Михаилу Владимировичу за помощь при подготовке рисунков.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания ИКАРП ДВО РАН, номер гос. регистрации 0234-2021-0006.

About gold mineralization of black-shale and karlin types in the Upper Bijan gold bearing node of the Khingan ore bearing region (Far East)

A.M. Zhirnov

Anatoly M. Zhirnov

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher
Institute of Complex Analysis of Regional Problems, FEB RAS, Birobidzhan, Russia
zhantmich@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4538-9382>

Abstract. New types of gold mineralization in the Upper Bijan gold-bearing node of the Jewish Autonomous Region (Far East), which is very promising in the region, are being considered. The Talachinskoye and Zheltogorsk gold-bearing fields located in a transverse tectonic block relative to regional ore-controlling faults are the most promising within the ore node. The Talachinsky field is localized in the black of the Riphean age. A contrasting geochemical anomaly of gold with a length of 0,6 km was revealed in the ore field. A 1,3 km long quartz jasperoid deposit has been contoured in the Zheltogorsky goldfield, similar to the deposits at the Twin Creeks deposit in the USA. The Verkhne-Bijan gold-bearing node is promising for identifying large- to medium-scale industrial gold deposits

Keywords: Jewish Autonomous Region, Verkhne-Bijan gold-bearing node, fault grids, geochemical anomalies, industrial gold deposits

For citation: Zhirnov A.M. About gold mineralization of black-shale and karlin types in the Upper Bijan gold bearing node of the Khingan ore bearing region (Far East). *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2): 45–56. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020047>

Acknowledgments. The author is very grateful to his colleague Mikhail V. Goryukhin for his help in preparing the drawings.

Funding. The work was carried out within the framework of the State task of the Institute Complex Analysis of Regional Problems, FEB RAS, state registration No. 0234-2021-0006.

Введение

По состоянию на 2020 г. прогнозные ресурсы коренного золота России недостаточны для устойчивого развития промышленности, и необходимо значительное увеличение средств из федерального бюджета на проведение прогнозно-металлогенических и поисковых работ [1, 2]. Поэтому весьма актуальной задачей в настоящее время является прогнозная переоценка золотоносных площадей в пределах известных рудных территорий [3]. Одной из них является Еврейская автономная область, расположенная в западной части Хинганской рудоносной площади Дальнего Востока.

Золото – один из ведущих промышленных металлов территории, но представлено оно главным образом россыпями в долинах рек и присутствует как попутный компонент в крупных железорудных месторождениях [4].

Золотоносные россыпи золота широко распространены в западной части рудоносной области, в пределах распространения архейских метаморфических сланцев и палеозойских гранитов. Они были открыты еще в XIX в. и разрабатывались до последнего времени, добыто

около 30 т золота. Коренных источников золота не было установлено. Предполагается, что коренные источники золота протерозойского и палеозойского возраста эродированы и от них остались лишь многочисленные долинные мелкозалегающие россыпи, уже выработанные к настоящему времени [5]. Вероятны лишь мезозойские месторождения золота в регионе [6].

В центральной части рассматриваемой территории (совпадающей по административному делению с Еврейской автономной областью) установлены в последние годы два перспективных золотоносных поля с золотым оруденением черносланцевого и карлинского типов.

Черносланцевый тип месторождений золота – это важнейший тип золоторудных месторождений России, к которому относятся более половины известных месторождений различного масштаба, включая крупные и крупнейшие [7].

Месторождения золота карлинского типа, имеющего важнейшее значение в Северной Америке, в России мало распространены: в Алданском районе Якутии почти отработано богатое Куранахское месторождение, на Урале разрабатывается крупное Воронцовское месторождение [3, 8].

Вместе с тем рассматриваемые месторождения часто локализованы в специфических разломных решетках, характерных для позиции многих крупных и крупнейших месторождений золота, что представляет исключительный интерес [8, 9]. Рудоносные площади в тектонических решетках представляют собой компактные геологические образования, ограниченные с периферии разрывными нарушениями или интрузивными дайками. Они формируются на участках пересечения парных разломов различного направления и отличаются геометрически прямоугольными, квадратными, и другими фигурами или сочетанием нескольких решеток [8, 9].

Цель работы – рассмотреть новые типы золотого оруденения в разломных решетках рудных полей и ресурсы золота в них. Задачи исследования: 1) изучение разломных решеток как новый тип рудоносных структур; 2) характеристика главного рудоконтролирующего разлома; 3) характеристика золотоносных полей золота в разломных решетках; 5) обсуждение перспектив золотого оруденения в разломных решетках ЕАО.

Материалы и методы исследований

Материалами исследования являются результаты геологических съемок масштаба 1:50 000, проведенных в 1978 г. (М.И. Алексеев), и 1:200 000 – в 1995–2000 гг. [10], а также авторские полевые исследования золотоносности железорудных месторождений и прогнозно-поисковые маршруты в пределах золотоносных полей, с учетом результатов опубликованных исследований по району.

Разломные решетки как новый тип рудоносных структур

Эндогенные месторождения, включая золоторудные, часто группируются вдоль глубинных разломов, секущих различные структуры земной коры [11].

Однако наиболее крупные месторождения в пределах линейных рудных структур локализируются в особых структурных условиях. Как правило, они формируются на участках пересечения рудоносных структур с поперечными или диагональными крупными разломами более древнего возраста, в так называемых узловых структурах [8, 9]. Более того, «узлы пересечения поперечных разломов и геологических дислокаций следует рассматривать в качестве *прямых поисковых признаков возможной локализации скрытых руд золота*» [9, с. 41].

Специальное рассмотрение разломных структур выполнено в работе [8]. Наиболее благоприятными для локализации месторождений золота рассматриваются участки пересечений парных разломов разных направлений [8, с. 268, рис. 49, а]. В качестве примера приводится Нижнее Приамурье [8, рис. 50], с прямоугольными и квадратными разломными решетками золотоносных узлов Многовершинного, Бичи-Лимурийского и др.

В новой публикации [12] показывается разломная решетка месторождения золота – гиганта Калгурли в архейском блоке Западной Австралии.

Характеристика Кульдуро-Костеньгинского рудоконтролирующего разлома

Главные зоны железистых кварцитов территории, Кимкано-Костеньгинская (центральная) и Южно-Хинганская (южная), составляют крупнейшую меридиональную структуру территории длиной около 100 км, сопоставимую по размерам с крупным Криворожским железорудным бассейном Украинского кристаллического щита.

Кульдуро-Костеньгинский глубинный разлом меридионального направления пересекает территорию в центральной части. Длина его около 250 км. Он трассируется ступенчатыми отрезками вдоль долин рек Кульдур, Яурин и разграничивает мезозойские эффузивы Хингано-Олонойской вулканогенной впадины от палеозойских габбро-диоритов и гранитов, а еще севернее – разделяет отдельные поля архейских метаморфических пород от палеозойских гранитов. Вблизи разлома локализованы месторождения олова, урана, магнезиального сырья.

На южном фланге вдоль этого разлома локализована протяженная железорудная зона длиной 40 км, включающая Кимканское, Сутарское и Костеньгинское месторождения с утвержденными балансовыми запасами. Костеньгинское весьма протяженное месторождение, длиной 20 км, залегает на южном фланге железорудной структуры (рис. 1).

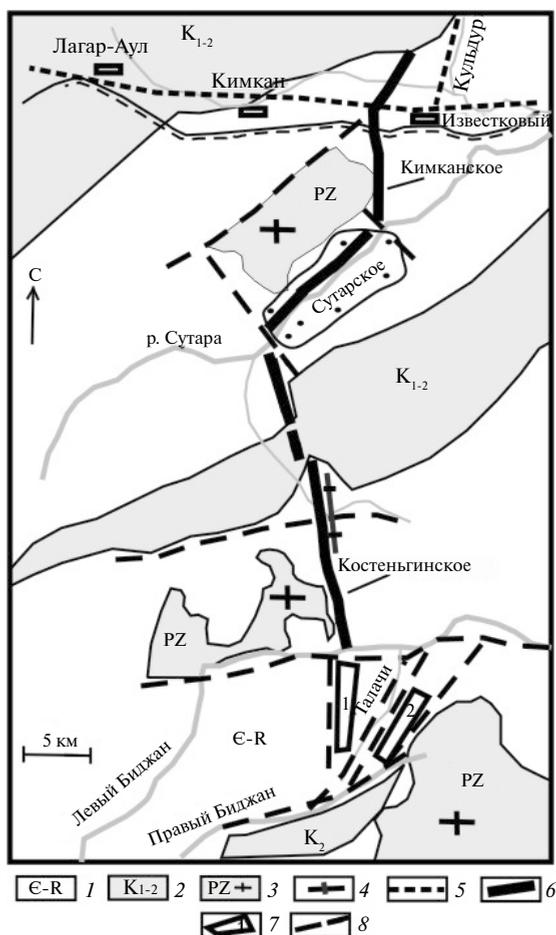


Рис. 1. Положение Верхне-Биджанского золотоносного узла на южном фланге Кульдуро-Костеньгинского рудоконтролирующего разлома [10. 13]: 1 – кембро-рифейские метаморфические породы; 2 – эффузивные породы мелового возраста; 3 – палеозойские граниты; 4 – дайка диабазов; 5 – железнодорожная магистраль Москва–Владивосток; 6 – месторождения железа (названия см. на рисунке); 7 – золоторудные поля (1 – Талачинское, 2 – Желтогорское); 8 – разломы

Центральная часть ее перекрыта эффузивами Сутарской вулканогенной впадины, а южная составляет, собственно, Костеньгинское месторождение. Длина его 13 км, мощность 15–50 м, падение крутое на северо-запад под углами 65–77°. Месторождение разведано скважинами до глубины 400 м и по данным геофизики продолжается на глубину до 1 км.

Золотоносность Верхне-Биджанского рудного узла

Верхне-Биджанский золотоносный блок расположен южнее широтного разлома, ограничивающего с юга Костеньгинское месторождение железа. Здесь расположены два перспективных рудных поля, рассматриваемых в статье – Талачинское и Желтогорское (рис. 1).

Геологическое строение площади Верхне-Биджанского золоторудного узла приведено по данным геологической карты масштаба 1:200 000 [10]. Оно неоднородно. В западной части его, на площади Талачинского золотоносного поля, развиты черносланцевые толщи игинчинской свиты верхнего протерозоя. В восточной части, на площади Желтогорского золотоносного поля, развиты карбонатные толщи венда–нижнего кембрия в обрамлении кремнисто-глинистых сланцев и известняков мурандавской свиты венда.

Южнее широтного разлома в пределах рудного узла выделено три локальных золотоносных участка – Сухоложский северный северо-восточного простирания, на левобережье ручья Сухого, Талачинский – на левой стороне от долины р. Талачи и Осиновский участок – на правой стороне от долины р. Талачи (рис. 2).

В пределах Верхне-Биджанского рудного узла указанные толщи пород золотоносны (рис. 2, 3).

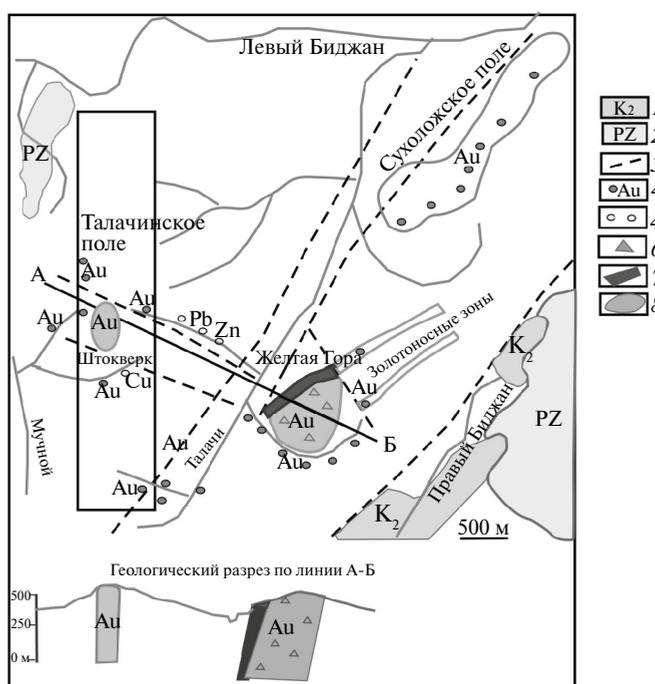


Рис. 2. Положение золотоносных полей Верхне-Биджанского золотоносного узла: 1 – верхнемеловые эффузивы – K₂; 2 – палеозойские граниты – PZ; 3 – некоторые разломы; 4 – аномальные точки золота на площади рудных полей; 5 – аномальные точки: меди, свинца и цинка в донных пробах ручьев; 6 – золотоносные обломки кварцевых метасоматитов; 7 – зона окремнения висячем боку рудного тела; 8 – рудное тело кварцевых метасоматитов (джаспероидов)

делювиальными отложениями, представленными главным образом глинистыми сланцами с редкими участками песчаников, относимыми к игинчинской свите рифейского возраста [10].

По данным анализов геохимических проб на гребне горного водораздела установлена крупная геохимическая аномалия золота шириной 200 м.

Содержания золота в пробах, отобранных в пределах аномального участка, варьируют от 0,2 до 1,0 г/т (золотоспектральные анализы выполнены в лаборатории бывшего института ДВИМС). Геохимическая аномалия приурочена к округлой плоской высоте в середине водораздела, длиной 600 м, ограниченной с флангов разломами. За пределами золотоносной вершины ширина аномальных зон уменьшается вдвое, как и содержания золота в них (рис. 4).

Элювиальный материал из копуш в пределах геохимической аномалии имеет желто-бурый цвет за счет гидроокислов железа. Это свидетельствует (наряду с отсутствием обломков кварца в копушах и присутствием точечных аномалий меди, свинца и цинка в верховьях водотоков, дренирующих горный хребет) о преобладающе вкрапленном золотосульфидном типе оруденения в коренных породах горной вершины и штокверковом характере глубже залегающего рудного тела.

В качестве объекта-эталона для вероятного золотосульфидного штокверка принимается штокверковое золоторудное месторождение Дегдекан в Южно-Колымской области, разведанное до глубины 200 м, с параметрами главного рудного тела: длина 0,9 км, ширина 300 м, среднее содержание золота 1,4 г/т [14].

Глубина распространения руд вероятного штокверка принимается 500 м (как в прилегающем с севера Костеньгинском месторождении). Тогда ресурсы золотоносного штокверка определяются как достаточно крупные [13].

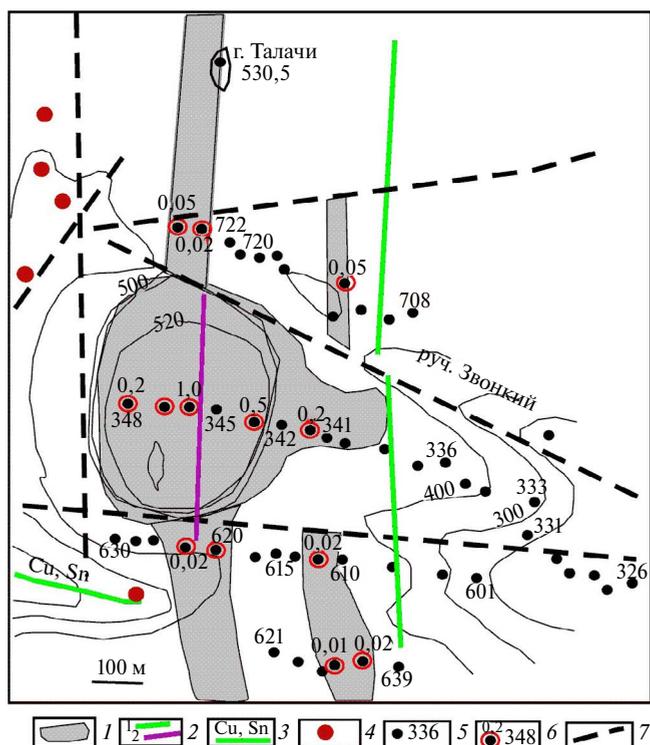


Рис. 4. Карта результатов литохимического опробования Центрального блока Талачинского рудного поля [10]: 1 – контуры выявленных геохимических аномалий золота в 2003 г.; 2 – дайки (1 – долерита, 2 – гранодиорита); 3 – поток аномальных содержаний меди и олова в ручье (на юго-западе карты), по данным донного опробования в 1978 г.; 4 – точки отбора проб с аномальными содержаниями золота в мелкозему по работам 1978 г.; 5 – точки геологических наблюдений и отбора проб по мелкозему в 2003 г.; 6 – точки с аномальными содержаниями золота по работам автора в 2003 г.; 7 – разломы

Характеристика Желтогорского золотоносного поля с карлинским типом оруденения

Желтогорское золотоносное поле составляет южный фланг более протяженного Сухоложского золотоносного поля, на правом водоразделе р. Талачи (рис. 2, 3). Рудное поле пересечено серией поисковых геологических маршрутов, с геохимическим опробованием рыхлых пород из копуш и опробованием из отдельных обломков и глыб из окварцованных пород.

Желтогорское поле по составу представляет собой поле окварцованных доломитов (джаспероидов) лондоковской свиты венда и является типичным золотоносным объектом карлинского типа. Рудный объект ограничен с юга полукольцевым ручьем Осиновским, с севера – предполагаемым разломом в створе поперечного узкого ручья. Длина его – 1,4 км, ширина – 800 м в южной части и 300 м в северной части, в среднем – 500 м (рис. 4). Падение крутое (75–80°) на северо-запад, в сторону долины р. Талачи.

Штокверк сложен лимонит-кварцевыми метасоматитами (джаспероидами) тонко-скрытокристаллического строения, часто брекчированными. Обломки метасоматитов сцементированы светло-серым кварцем тонкокристаллического строения. Порода насыщена многочисленными желто-бурыми вкраплениями лимонита, развитыми по пириту, придающими породе в целом светло-желтую окраску.

С висячего бока шток сопровождается зоной черных роговиков (черного кремневидного кварца) мощностью 30–50 м (рис. 2).

С лежащего бока шток граничит с известняками и глинистыми сланцами мурандавской свиты венда.

Содержания золота в лимонит-кварцевых метасоматитах штока Желтая Гора варьируют от сотых до десятых долей г/т (золотоспектральный анализ литохимических и штуфных проб). Судя по присутствию в рудах элементов-металлов надрудного уровня месторождений (сурьма, серебро, ртуть), на поверхности обнажается надрудный уровень скрыто залегающего месторождения с весьма неравномерным распределением золота и низкими содержаниями его в кварцевых метасоматитах.

Золотоносный шток Желтая Гора весьма сходен с месторождением Твин-Крик по геологической позиции [15] – в 3 км от интрузивного массива (рис. 5).

Промышленные руды месторождения вероятны в интервале глубин 0–700 м от поверхности, аналогично глубинам локализации руд в месторождении Твин-Крик в Северной Америке.

На северо-восточном фланге шток джаспероидов расщепляется и продолжается на северо-восток виде двух золотоносных структур шириной 50–150 м, с содержаниями золота в элювии от 0,2–0,3 до 1 г/т (рис. 3).

Руды рассмотренных объектов сходны и по содержаниям элементов-спутников золота (см. таблицу).

Величина ресурсов золота в Желтогорском поле может быть весьма существенной, по крайней мере на уровне запасов среднего месторождения.

Обсуждение

Согласно современным разработкам, крупные месторождения золота формируются в определенных геолого-структурных и литологических условиях. Главными из них являются:

1. Положение рудных узлов и полей в пределах региональных рудоконтролирующих глубокопроникающих разломов [8, 11]. Особенно благоприятны поперечные (торцовые) тектонические блоки, часто в виде разломных решеток [9, 11, 13]

2. Благоприятный геолого-формационный (литологический) тип оруденения, например черносланцевый, карлинский и др. [7, 16].

3. Наличие рудных проявлений золота и геохимических аномалий в перспективных участках региональных разломов [9, 11, 13, 17, 18].

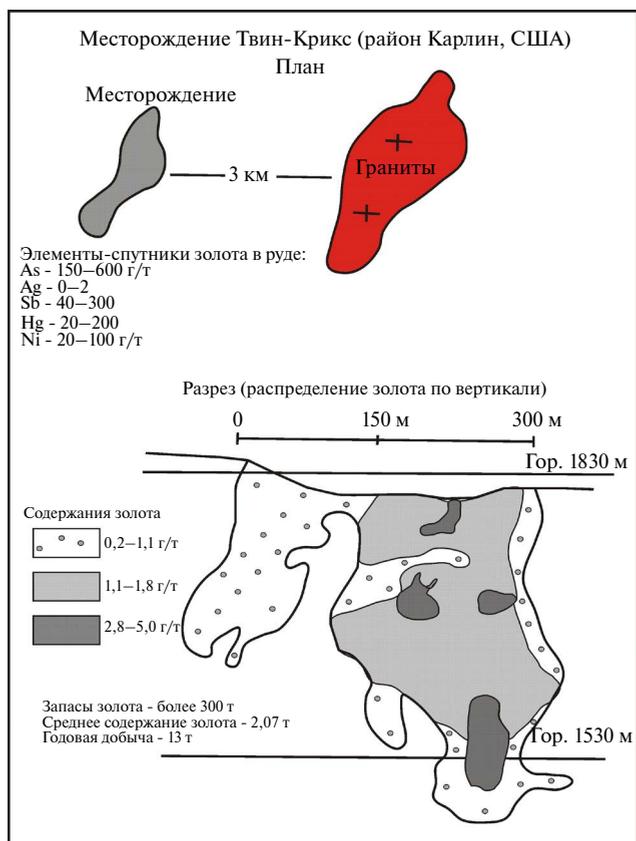


Рис. 5. Геологическая модель (план и разрез) месторождения Твин-Крикс (США) [15]

Сравнительная таблица элементов-спутников золота в рудах месторождения Твин-Крикс и потенциального месторождения Желтая Гора

Химические элементы	Месторождение Твин-Крикс [15]	Месторождение Желтая Гора
Ag	0–2 г/т	0,4–0,6 г/т
As	150–600	40–100
Sb	40–300	100–300
Hg	20–200	0,1–0,3
Ni	20–100 г/т	20–60 г/т
Fe	–	4–10%

Рассмотренные выше золотоносные поля локализованы в весьма благоприятной геолого-структурной обстановке. Талачинское поле – на замыкании меридионального глубинного рудоконтролирующего разлома в поперечном золотоносном тектоническом блоке, Желтогорское – также на замыкании регионального Помпеевско-Талачинского северо-восточного разлома в поперечном золотоносном тектоническом блоке.

Именно подобные узловое пересечения крупных разломов, в пределах региональных рудоконтролирующих разломов, являются локализаторами многих крупных и крупнейших золоторудных и оловорудных месторождений Дальнего Востока [8, 13, 17, 19].

Обращается внимание на содержание в рудах месторождения Твин-Крикс ртути в концентрациях на порядок-два больших, чем золота. Поэтому из месторождений карлинского типа нередко добывается ртуть, что позволило выделить золотортутную формацию теле-термальных месторождений золота [20]. На территории Еврейской автономной области имеет смысл обратить внимание на ореолы и проявления ртути как признак подобных золоторудных месторождений.

Установленные Талачинская и Желтогорская золотоносные структуры, с вероятными крупными и средними ресурсами золота, могут представить большой интерес для государственных организаций и частных предпринимателей как перспективные объекты для проведения детальных поисковых работ.

Выводы

Верхне-Биджанский золотоносный узел в Хинганской рудоносной области Дальнего Востока расположен в весьма благоприятной геолого-структурной обстановке, в разломных решетках на окончании региональных разломов, и характеризуется, по геохимическим данным, высокой золотоносностью. В его пределах четко обособляются два наиболее перспективных золоторудных поля – Талачинское и Желтогорское, локализованные в разломных решетках, с возможными крупными–средними ресурсами золота.

Поскольку в рудах месторождения Твин-Крикс содержание ртути на порядок-два больше содержания золота, то на территории Еврейской автономной области необходимо обратить внимание на ореолы и проявления ртути как признак подобных золоторудных месторождений.

Верхне-Биджанский золотоносный узел рекомендуется заинтересованным организациям для первоочередного проведения детальных поисковых работ, с применением канав и скважин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев Я.В., Корчагина Д.А. Сырьевая база рудного золота России: состояние освоения и перспективы развития до 2040 г. // Минеральные ресурсы России: экономика и управление. 2020. № 4. С. 3–7.
2. Иванов А.И., Алексеев Я.В., Черных А.И. и др. Благородные металлы Российской Федерации – состояние минерально-сырьевой базы и перспективы ее развития // Отечественная геология. 2022. № 1. С. 3–25. DOI: 10.47765/0869-7175-2022-10001.
3. Викентьев В.И., Викентьева О.В., Блоков В.И. и др. Новые данные по геологической зональности и структуре Воронцовского золоторудного поля на Северном Урале // Руды и металлы. 2023. № 4. С. 23–35. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10017.
4. Жирнов А.М. Благороднометаллные железомарганцевые месторождения Кимканского бассейна Дальнего Востока // Литология и полезные ископаемые. 2016. № 5. С. 1–17. DOI: 10.31857/S0024-497X20194295-317.
5. Эйриш Л.В. Закономерности локализации и принципы прогнозирования золоторудных месторождений на Дальнем Востоке России // Руды и металлы. 2012. № 1. С. 5–16.
6. Саксин Б.Г., Усиков В.И., Невструев В.Г. Мезозойское рудное золото Малого Хингана (Дальний Восток России) и обоснование направления поисков в рамках концепции флюидно-каркасных систем // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36, № 3. С. 57–69.
7. Рафаилович М.С. Золоторудные гиганты в черносланцевых толщах Центральной и Северной Азии // Отечественная геология. 2012. № 1. С. 29–39.
8. Буряк В.А., Бакулин Ю.И. Металлогения золота. Владивосток: Дальнаука, 1998. 403 с.
9. Некрасов Е.М. Локализация руд золота в разломах разных типов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2019. № 6. С. 33–43.
10. Атрашенко А.Ф., Жевержеева М.К., Беломестнова Т.Д. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. 2-е изд. Серия Буреинская, листы М–52– (XXXV), М–52–XXXVI. Объяснительная записка. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2000. 226 с.

11. Золоторудные гиганты России и Мира / М.М. Константинов, Е.М. Некрасов, А.А. Сидоров, С.Ф. Стружков. М.: Научный мир, 2000. 272 с.
12. Vielreicher N.M., Groves D.I., McNaughton N.J. The giant Kalgoorlie Gold Field revisited // *Geoscience Frontiers*. 2016. No. 7. P. 359–374. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.006>
13. Жирнов А.М. о золотоносности возможного штокверка в Еврейской автономной области // *Региональные проблемы*. 2019. Т. 22, № 1. С. 20–25. DOI: 10.31433/2618-9593-2019-22-1-2025.
14. Михайлов Б.К., Стружков С.Ф., Наталенко М.В. Многофакторная модель крупнообъемного золоторудного месторождения Дегдекан (Магаданская область) // *Отечественная геология*. 2010. № 2. С. 20–31.
15. Stender D.P., Kesler S.E., Peltonen D.R., Tapper C.J. Deposition of Gold in Carlin-type Deposits: The role of Sulfidation and Decarbonation at Twin Creeks Nevada // *Economic Geology*. 1998. Vol. 93, No. 2. P. 201–215.
16. Волков А.В., Сидоров А.А. Геолого-генетическая модель месторождений золота карлинского типа // *Литосфера*. 2016. № 6. С. 145–165.
17. Условия формирования и основы прогноза крупных золоторудных месторождений / М.М. Константинов, В.В. Аристов, М.Е. Вакин и др. М.: ЦНИГРИ, 1998. 155 с.
18. Горячев Н.А., Фридовский В.Ю., Будяк А.Е. и др. Роль металлогенических исследований в прогнозе перспективных территорий. от моделей к объектам // *Вестник РАН*. 2023. Т. 93, № 7. С. 614–622.
19. Столяренко В.В., Минаков А.В., Рябшапко А.Г. и др. Прогнозно-поисковая модель золоторудного оруденения в пределах мезозойских впадин в Центрально-Алданском рудно-россыпном районе (на примере Верхне-Якутского рудного поля) // *Руды и металлы*. 2022. № 1. С. 44–76. DOI: 10.47765/0869-5997-2022-10003.
20. Степанов В.А. Структурные и геохимические особенности золоторудных районов Приамурской провинции // *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2022. № 4. С. 46–56.

REFERENCES

1. Alekseev Ya.V., Korchagina D.A. Syr'evaya baza rudnogo zolota Rossii: sostoyanie osvoiniya i perspektivy razvitiya do 2040 g. *Mineral'nye Resursy Rossii: Ekonomika i Upravlenie*, 2020;4:3–7. (In Russ.).
2. Ivanov A.I., Alekseev Ya.V. Chernykh A.I. et al. Blagorodnye metally Rossiiskoi Federatsii – sostoyanie mineral'no-syr'evoi bazy i perspektivy ee razvitiya. *Otechestvennaya Geologiya*. 2022;(1):3–25. (In Russ.). DOI: 10.47765/0869-7175-2022-10001.
3. Vikent'ev V.I., Vikent'eva O.V., Blokov V.I. et al. Novye dannye po grologicheskoi zonal'nosti i strukture Vorontsovskogo zolotorudnogo polya na Severnom Urale. *Rudy i Metally*. 2023;(4):23–35. (In Russ.). DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10017.
4. Zhimov A.M. Blagorodnometall'nye zhelezomargantsevye mestorozhdeniya Kimkansкого basseina Dal'nego Vostoka. *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*. 2016;(5):1–17. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0024-497X20194295-317.
5. Eirish L.V. Zakonomernosti lokalizatsii i printsipy prognozirovaniya zolotorudnykh mestorozhdenii na Dal'nem Vostoke Rossii. *Rudy i Metally*. 2012;(1):5–16. (In Russ.).
6. Saksin B.G., Usikov V.I., Nevstruev V.G. Mezozoiskoe rudnoe zoloto Malogo Khingana (Dal'nii Vostok Rossii) i obosnovanie napravleniya poiskov v ramkakh kontseptsii flyuidno-karkasnykh system. *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2017;36(3):57–69. (In Russ.).
7. Rafailovich M.S. Zolotorudnye giganty v chernoslantsevakh tolshchakh Tsentral'noi i Severnoi Azii. *Otechestvennaya Geologiya*. 2012;(1):29–39. (In Russ.).
8. Buryak V.A., Bakulin Yu.I. Metallogeniya zolota. Vladivostok: Dal'nauka; 1998; 403 P. (In Russ.).
9. Nekrasov E.M. Lokalizatsiya rud zolota v razlomakh raznykh tipov. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Geologiya i Razvedka*. 2019;(6):33–43. (In Russ.).
10. Atrashenko A.F., Zheverzheeva M.K., Belomestnova T.D. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200 000*. 2-e izd. Seriya Bureinskaya, listy M-52-XXXV, M-52- XXXVI. Ob'yasnitel'naya zapiska. Moscow: Moskovskii filial FGBU, VSEGEI; 2016. 226 P. (In Russ.).
11. Konstantinov M.M., Nekrasov E.M., Sidorov A.A., Struzhkov S.F. Zolotorudnye giganty Rossii i Mira. Moscow: Nauchnyi Mir; 2000. 272 s. (In Russ.).
12. Vielreicher N.M., Groves D.I., McNaughton N.J. The giant Kalgoorlie Gold Field revisited. *Geoscience Frontiers*. 2016;7:359–374. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.006>

13. Zhimov A.M. O zolotonosnosti vozmozhnogo shtokverka v Evreiskoi avtonomnoi oblasti. *Regional'nye Problemy*. 2019;22(1):20–25. (In Russ.). DOI: 10.31433/2618-9593-2019-22-1-2025.
14. Mikhailov B.K., Struzhkov S.F., Natalenko M.V. Mnogofaktornaya model' krupnoob'emnogo zolotorudnogo mestorozhdeniya Degdekan (Magadanskaya oblast'). *Otechestvennaya Geologiya*. 2010;(2):20–31. (In Russ.).
15. Stender D.P., Kesier S.E., Peltonen D.R., Tapper C.J. Deposition of Gold in Carlin-type Deposits: The role of Sulfidation and Decarbonation at Twin Creeks Nevada. *Economic Geology*. 1998;93(2):201–215.
16. Volkov A.V., Sidorov A.A. Geologo-geneticheskaya model' mestorozhdenii zolota karlinskogo tipa = [Geological and genetic model of gold deposits of the Karlin type]. *Lithosphere*. 2016;(6):145–165. (In Russ.).
17. Konstantinov M.M., Aristgov V.V., Vakin M.E. et al. Usloviya formirovaniya i osnovy prognoza krupnykh zolotorudnykh mestorozhdenii. Moscow: TsNIGRI; 1998. 155 s. (In Russ.).
18. Goryachev N.A., Fridovskii V.Yu., Budyak A.E. Rol' metallogenicheskikh issledovaniy v prognoze perspektivnykh territorii, ot modelei k ob'ektam. *Vestnik RAN*. 2023;93(7):614–622. (In Russ.)
19. Stolyarenko V.V., Minakov A.V., Ryaboshapko A.G. et al. Prognozno-poiskovaya model' zolotogo orudneniya v predelakh mezozoiskikh vpadin v Tsentral'no-Aldanskom rudno-rossypnom raione (na primere Verkhne-Yakokutskogo rydnogo polya). *Rudy i Metally*. 2022;(1):44–76. (In Russ.).
20. Stepanov V.A. Structural and geochemical features of the gold ore regions of the Amur provinc. *Bulletin of the North-Eastern Scientific Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2022;(4):46–56. (In Russ.).

Научная статья

УДК 550.42

DOI: 10.31857/S0869769825020051

EDN: GFCEDP

Изменчивость биогеохимического сигнала терригенного материала в нижнем течении и эстуарии реки Амур в годы с различными условиями формирования весеннего половодья

О.В. Дударев✉, А.Н. Чаркин, Д.В. Черных, А.С. Рубан, И.И. Пипко,
С.П. Пугач, В.А. Дубина, И.П. Семилетов

Олег Викторович Дударев

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,

Владивосток, Россия

Международный центр по исследованию дальневосточных и арктических морей

им. адмирала С.О. Макарова, Сахалинский государственный университет–СахТех,

Южно-Сахалинск, Россия

Томский государственный университет, Томск, Россия

dudarev@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9432-8992>

Александр Николаевич Чаркин

кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,

Владивосток, Россия

charkin@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9273-9950>

Денис Вячеславович Черных

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,

Владивосток, Россия

Международный центр по исследованию дальневосточных и арктических морей

им. адмирала С.О. Макарова, Сахалинский государственный университет–СахТех,

Южно-Сахалинск, Россия

Томский государственный университет, Томск, Россия

denis.chernykh.vl@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-6814-7100>

Алексей Сергеевич Рубан

кандидат геолого-минералогических наук, доцент

Томский политехнический университет, Томск, Россия

ruban@tpu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5852-8201>

Ирина Ивановна Пипко

кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия
Международный центр по исследованию дальневосточных и арктических морей
им. адмирала С.О. Макарова, Сахалинский государственный университет–СахТех,
Южно-Сахалинск, Россия
irina@poi.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2480-9563>

Светлана Петровна Пугач

кандидат географических наук, старший научный сотрудник
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия
Международный центр по исследованию дальневосточных и арктических морей
им. адмирала С.О. Макарова, Сахалинский государственный университет–СахТех,
Южно-Сахалинск, Россия
pugach@poi.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0163-043X>

Вячеслав Анатольевич Дубина

кандидат географических наук, заведующий лабораторией
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия
dubina@poi.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3273-8977>

Игорь Петрович Семилетов

член-корреспондент РАН, доктор географических наук, заведующий лабораторией
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия
Международный центр по исследованию дальневосточных и арктических морей
им. адмирала С.О. Макарова, Сахалинский государственный университет–СахТех,
Южно-Сахалинск, Россия
Томский государственный университет, Томск, Россия
ipsemiletov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3012-4739>

Аннотация. Цель данной работы – изучение межгодовой изменчивости литодинамических и биогеохимических характеристик взвешенного материала (SPM) на 884 км трансекте нижнее течение–эстуарий р. Амур в Охотском и Японском морях. Наблюдения выполнены в середине июня 2005 и 2006 гг. Водность и условия мобилизации терригенного материала в водосборе в периоды исследований кардинально различались. Были охвачены фазы наиболее высокого уровня половодья (2005 г.) и наинизшего межлетнего уровня Амура. Исследовались распределение SPM, взвешенного органического углерода (POC), общего азота (TN), изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и азота ($\delta^{15}\text{N}$). Мы не обнаружили в 2005 и 2006 гг. резких колебаний содержания SPM в нижнем течении Амура. Однако они проявились в морских сегментах трансекты – в Амурском лимане, в охотоморском и япономорском сегментах эстуария. Первопричинами изменений явились физико-химические преобразования SPM на фоне роста солёности и волновая ремобилизация донных осадков. Последняя наиболее ярко проявилась в 2006 г., когда уровень воды в речном сегменте эстуария и в Амурском лимане был низким.

Ключевые слова: река Амур, эстуарий, взвешенный материал, взвешенный органический углерод, изотопы углерода и азота

Для цитирования: Дударев О.В., Чаркин А.Н., Черных Д.В., Рубан А.С., Пипко И.И., Пугач С.П., Дубина В.А., Семилетов И.П. Изменчивость биогеохимического сигнала терригенного материала в нижнем течении и эстуарии реки Амур в годы с различными условиями формирования весеннего половодья // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 57–75.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020051>

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Программы Приоритет-2030 и гранта FFFF-2024-0004 Сахалинского государственного университета–СахТех, а также госзаданий ТОИ ДВО РАН (темы № 124022100083-1, № 12402210081-7, № 124022100074-9).

Original article

Spring freshet fluxes of terrigenous matter from Amur River to the estuary in surrounding Okhotsk and Japan Seas

O.V. Dudarev, A.N. Charkin, D.V. Chernykh, A.S. Ruban, I.I. Pipko, S.P. Pugach, V.A. Dubina, I.P. Semiletov

Oleg V. Dudarev

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Chief Researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
International Centre of the Far-Eastern and Arctic seas named by Admiral S.O. Makarov,
Sakhalin State University–SakhalinTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
Tomsk State University, Tomsk, Russia
dudarev@poi.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9432-8992>

Alexander N. Charkin

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Head of Laboratory
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
charkin@poi.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9273-9950>

Denis V. Chernykh

Candidate of Sciences in Technique, Senior Researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
International Centre of the Far-Eastern and Arctic seas named by Admiral S.O. Makarov,
Sakhalin State University–SakhalinTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
Tomsk State University, Tomsk, Russia
denis.chernykh.vl@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6814-7100>

Alexey S. Ruban

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Associate Professor
Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
ruban@tpu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5852-8201>

Irina I. Pipko

Candidate of Sciences in Geography, Leading Researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
International Centre of the Far-Eastern and Arctic seas named by Admiral S.O. Makarov,
Sakhalin State University–SakhalinTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
irina@poi.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2480-9563>

Svetlana P. Pugach

Candidate of Sciences in Geography, Senior Researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia
International Centre of the Far-Eastern and Arctic seas named by Admiral S.O. Makarov,
Sakhalin State University–SakhalinTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
pugach@poi.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0163-043X>

Vyacheslav A. Dubina

Candidate of Sciences in Geography, Head of Laboratory

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

dubina@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3273-8977>

Igor P. Semiletov

Corresponding Member of RAS, Doctor of Sciences in Geography, Head of Laboratory

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

International Centre of the Far-Eastern and Arctic seas named by Admiral S.O. Makarov,

Sakhalin State University–SakhalinTECH, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Tomsk State University, Tomsk, Russia

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

ipsemiletov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3012-4739>

Abstract. The objective of this work is to study the interannual variability of lithodynamic and biogeochemical characteristics of suspended matter (SPM) along the 884 km transect “lower reaches– estuary of the Amur River in the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan”. Observations were carried out in mid-June 2005 and 2006. The spring flood during the study periods differed dramatically in water content and conditions for mobilization of terrigenous material in the catchment area. Thus, the phases of the culmination of the highest flood level (2005) and the culmination of the lowest low-water level of the Amur were covered. The distribution of SPM, suspended organic carbon (POC), total nitrogen (TN), carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) were studied. We did not find any sharp fluctuations in the SPM content in the lower reaches of the Amur in 2005 and 2006. However, they manifested themselves in the marine segments of the transect – in the Amur Estuary, in the Sea of Okhotsk and Sea of Japan segments of the estuary. The primary cause of the changes were the physicochemical transformations of SPM against the background of increasing salinity and wave remobilization of bottom sediments. The latter was most clearly manifested in 2006, when the water level in the river segment of the estuary and in the Amur Estuary was low.

Keywords: Amur River, estuary, suspended particulate matter, particulate organic carbon, carbon and nitrogen isotopes

For citation: Dudarev O.V., Charkin A.N., Chernykh D.V., Ruban A.S., Pipko I.I., Pugach S.P., Dubina V.A., Semiletov I.P. Spring freshet fluxes of terrigenous matter from Amur River to the estuary in surrounding Okhotsk and Japan Seas. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2):57–75.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020051>

Funding. The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education within the framework of the Priority-2030 Program and grant FEF-2024-0004 of Sakhalin State University–SakhTEH, as well as the state assignment of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (topics No. 124022100083-1, No. 124022100081-7, No 124022100074-9).

Введение

Эстуарии и прилегающие к ним окраинные моря – неразрывные звенья биогеохимического и транспортного конвейеров системы река–море, обеспечивающих трансформацию наземного минерального и органического вещества при пересечении градиентных зон области смешения пресных–соленых вод. Дальнейшая судьба наземного материала определяется схемой течений, переносящих оставшийся в транзите материал не только в прилегающие к эстуариям окраинные моря, но и в глубоководные районы Мирового океана. Понятно, что биогеохимический и транспортный конвейеры играют важную роль в региональном и глобальном углеродном цикле. В северо-западной части Тихого океана значимым источником терригенного материала является трансграничная р. Амур, занимающая девятое место в топ-10 крупнейших в мире по длине с притоками (~5092 км). Река дренирует различные природные ландшафты умеренного климата восточной окраины Азии, от тайги до степей и полупустынь на территориях России (~54% суммарной площади водосбора), Китая (~44%) и Монголии (~2%). На территории России Амур крупнейший по среднегодовому твердому стоку (~24,5 млн т), но по водному

стоку (~365 км³) и площади бассейна (~ 1 856 000 км²) уступает сибирским водным гигантам Оби, Енисею и Лене ([1]; см. также: <https://inplanet.net/samye-bolshie-reki-v-mire>).

Морфология эстуария Амура уникальна, поскольку он заключен между геологическими структурами азиатского материка и о-ва Сахалин. Благодаря этому речные воды в разных объемах распространяются в прилегающие окраинные моря к северу и югу от устья. Биогеохимический сигнал наземного растворенного (DOM) и взвешенного органического материала (POM) регистрируется в северной части Японского моря, над подводным склоном восточного побережья о-ва Сахалин и северо-западного шельфа Охотского моря [2]. Обнаружение в промежуточных водах северной части Тихого океана следов гуминовых веществ DOM из водосбора Амура свидетельствует о масштабах функционирования глобального транспортного механизма [3].

Опосредованно через изменения циркуляции восточно-азиатского муссона происходящие глобальные климатические изменения сопровождаются увеличением интенсивности и продолжительности экстремальных гидрометеорологических явлений в бассейне Амура. Уже сейчас здесь зафиксирован рост количества и повторяемости катастрофических паводков [4, 5]. Увеличение летней водности, вероятно, не приведет к особым нарушениям в квазистационарном функционировании системы река–море. Однако вероятная аномалия увеличения зимних осадков в водосборе до 40% может повлечь за собой ряд последствий [6, 7]. Плавление огромных запасов снега вызовет весеннее суперполоводье, что резко увеличит объем мобилизации наземного материала. Росту концентрации POM и DOM способствуют прошлогодняя растительная биомасса, затронутая микробиологическими процессами, а также новая продукция весенней вегетации растений. Поэтому дренирующие поверхностные горизонты почв талые воды обогащены значительными концентрациями минеральных и органических компонентов и практически полностью транспортируются в русло реки над еще промерзшим сезонно-талым почвенным слоем [8, 9]. Отмечена более высокая лабильность DOM в весеннее половодье в арктических реках по сравнению с летним периодом [10].

Комплекс элементно-изотопных характеристик взвешенного органического углерода (POC) и общего азота (TN), d¹³C и d¹⁵N и др. может помочь в изучении состава терригенного материала и углеродных пулов его OM в градиентных зонах систем река–море. Биомаркеры OM – аккумуляторы уникальных гетерогенных сигналов, отражающих эффекты природного и антропогенного фракционирования. Очевидно, что они могут служить источником объективной информации о современных биогеохимическом и гидрологическом циклах аллохтонной и автохтонной компонент POM, как это показано для крупнейших сибирских и североамериканских рек Лена, Хатанга, Яна, Индигирка, Колыма, Юкон, Маккензи ([11–13]; см. также: www.arcticgreatrivers.org).

Цель работы – выявление особенностей межгодовой изменчивости интегрированного (природного + антропогенного) сигнала SPM и POC водосбора Амура на трансекте нижнее течение – эстуарий на основе изучения распределения SPM и элементно-изотопных маркеров POC, TN, стабильных изотопов углерода δ¹³C и азота δ¹⁵N. Образцы SPM и POC отобраны в фазу весеннего половодья 2005 и 2006 гг., контрастирующего по водности и, следовательно, по условиям мобилизации и транспорта терригенного материала. 2005 г. характеризовался редко наблюдаемым в половодье годовым максимумом стока и высокой водностью. Период исследований 2006 г. наложился на спад половодья до минимального межлетнего уровня реки, а кульминация половодья наступила на полтора месяца раньше прошлогодней. Мы надеемся, что полученные результаты позволят улучшить понимание транспорта и трансформации терригенного стока в процессе водной миграции через эстуарий Амура в приемные морские бассейны. Возможно, что представленные результаты облегчат интерпретацию палеоокеанографических записей изменения экологических условий в прилегающих Охотском и Японском морях в позднечетвертичное время.

Район исследований

Территория водосборного бассейна расположена на палеозойско-мезозойской Амурской мезоплатформе со сложной пространственной конфигурацией. Большая часть водосбора занята горными хребтами, слабо расчлененными средне- и низкоргорными плато

(58%), между которыми располагаются обширные денудационные межгорные равнины. Доминирующие геологические комплексы представлены гранитными, гранитно-метаморфическими породами и их осадочными дериватами. В горном верхнем течении преобладают процессы глубинной эрозии. Баланс тонкозернистого материала дальней миграции близок к нулю, а русловой аллювий представлен галечно-гравийным и валунным материалом. В горно-равнинном среднем течении основные источники терригенного материала – песчано-глинистые и песчано-гравийные толщи, продукты склоновой денудации. Впадение крупнейших левобережных (Зея, Буряя) и правобережных (Сунгари) притоков увеличивает водность Амура более чем на половину, из-за чего скорость течения в главном русле остается сопоставимой с верховьем реки. В преимущественно равнинном нижнем течении русло расширяется до 11 км, а слияние с правым притоком Усури увеличивает водность Амура почти на треть. Главные агенты мобилизации неоген-четвертичных песчаных и алевроитово-глинистых толщ – русловая эрозия и плоскостной смыв. Характерны пойменная многорукавность, меандрование, песчаный аккумулятивный русловой и пойменный рельеф. Нижнее течение замыкается приливной дельтой выполнения с невысокими темпами развития.

Климат водосбора преимущественно умеренно континентальный. Степные и лесостепные ландшафты аридной зоны (юго-западное правобережье Амура) водосбора отражают ослабленное влияние восточно-азиатского муссона и циклоногенеза. На горном левобережье муссонная циркуляция и вечная мерзлота обеспечивают достаточное увлажнение. На многолетнемерзлых почвах здесь доминируют кедрово-широколиственные и пихтово-еловые фитоценозы. Равнинные ландшафты вдоль главного русла представлены лиственничными и дубово-лиственничными лесами подтаежного типа с дерново-подзолистыми почвами. Широко развиты переувлажненные луга и низинные болота на торфяно-глеевых почвах, обогащенных гуминовыми веществами.

В суммарном балансе притока воды в главное русло российский сегмент водосбора дает 71% [14]. Почти 2/3 годового стока формируется за счет летнего дождевого питания, остальное поставляют снеготаяние и подземные воды. Объем водного стока может колебаться от 131 км³ (2009 г.) до 445 км³ (2013 г.) при среднемноголетнем 365 км³. Среднемноголетний взвешенный сток 24,9 млн т при колебаниях от 9 млн т (1976 г.) до 32 млн т (1972 г.) [1, 15]. Среднегодовой сток органического углерода ~5,3 млн т, где доля РОС всего 15% (0,81 млн т), а 85% приходится на DOM. Примерно 43% DOM представлены биогеохимически высокоподвижными фракциями гуминовых и фульвокислот, тяготеющих к горно-таежным и заболоченным участкам водосбора [16].

Районирование нижнего течения–эстуария и методы исследований

Трансекта включала 560 км нижнего течения Амура до устья и ортогональный ему 324 км сегменты в прилегающих Охотском и Японском морях. Ориентация сегментов предопределена спецификой приемного бассейна стока, представляющего собой сообщающиеся через меридионально протяженный Амурский лиман U-образный Сахалинский залив Охотского моря и Λ-образную вершину Татарского пролива Японского моря (рис. 1).

Трансекта районирована на несколько ключевых сегментов: низовье Амура (ALS), речная часть эстуария (ARE, сегмент заключен между устьевым створом и границей максимальной дальности распространения вверх по реке сизигийных приливов в летнюю межень), охотоморский (OSE) и япономорский (JSE). Последние два сегмента сообщаются через Амурский лиман (ARL) (табл. 1). Комплекс наблюдений на станциях в системе нижнее течение – эстуарий реки Амур выполнялся с борта большого гидрографического катера 14–20 июня 2005 г. и 6–18 июня 2006 г. (рис. 1). Вертикальная гидрофизическая структура водной толщи регистрировалась зондом CTD RBRXR-620 доплеровским измерителем ADP SonTec. Образцы воды отбирались батометром Niskin с поверхностного и придонного (0,5 м от дна) горизонтов.

SPM выделялся фильтрационной системой Thermo Scientific. Определение валового содержания выполнялось после фильтрации через ацетилцеллюлозные мембраны Watman (диаметр пор 0,45 мкм) взвешиванием с точностью ±0,0001 г. Стеклообразные микрофильтры Watman GF/F (диаметр пор 0,70 мкм) со взвесью использовались для изучения органического

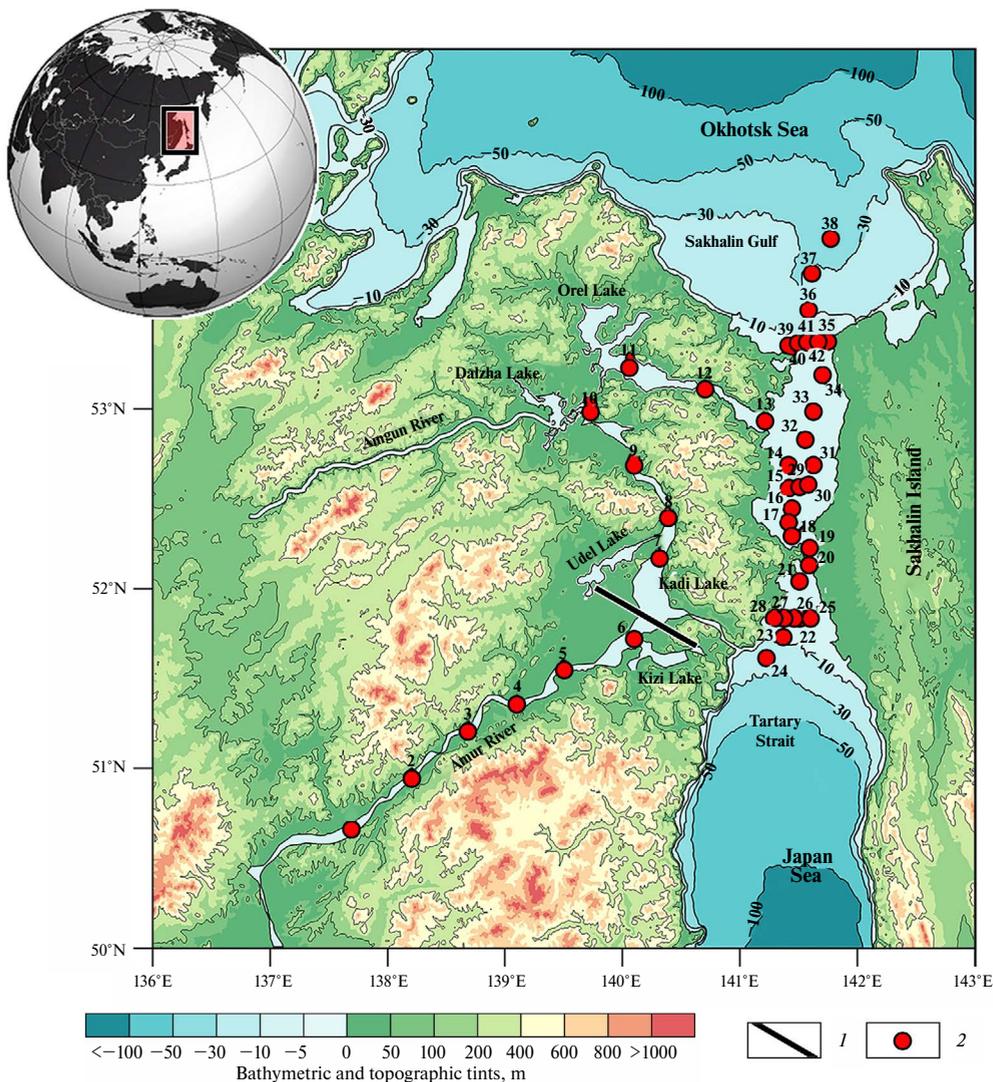


Рис. 1. Район исследований: 1 – верхняя граница речной части эстуария, 2 – станции 2005 и 2006 гг.

углерода (POC), общего азота (TN), стабильных изотопов углерода (^{13}C) и азота (^{15}N). Аналитические исследования проведены в лаборатории Международного арктического центра университета Аляска, Фэрбанк (IARCUAF, США). Использовался анализатор Carlo Erba NC 2500, соединенный через сплит-интерфейс с масс-спектрометром Finnigan MAT Delta Plus. Каждый образец подвергался трем параллельным измерениям; точность и воспроизводимость определений POC $<0,1\%$, $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ – соответственно $\pm 0,1$ и $\pm 0,2\%$. Полученные изотопные значения приведены в соответствие с международным стандартом VPDB [17, 18].

Результаты и дискуссия

Гидрометеорологическая обстановка периода наблюдений

Гидрологические условия пробоотбора 2005 и 2006 гг. существенно различались. Первая декада июня 2005 г. выделилась редко наблюдаемым в весеннее половодье годовым максимумом стока $22\,600\text{ м}^3\text{с}^{-1}$. Расходы оказались выше среднегодовых для этого ме-

Гидролого-морфологические сегменты района исследований

Гидролого-морфологические сегменты	Протяженность, км	Глубина, м	Кол-во станций*
Нижний Амур (ALS)	224	4,5–16,1	5
Нижний Амур, речная часть эстуария (ARE)	326	3,9–11	8
Амурский лиман, морская часть эстуария (ARL)	185	3,5–15,5	10
Сахалинский залив, охотоморская часть эстуария (OSE)	76	4–11	5
Татарский пролив, япономорская часть эстуария (JSE)	63	3,7–11	6

* Для 2005 и 2006 гг.

сяца более чем на $5000 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$ (данные гидрологического поста «Комсомольск-на-Амуре»). Летне-осенний максимум не проявился из-за недостаточного количества атмосферных осадков (рис. 2, 3, 1). Учитывая время добегания речных вод от начала трансекты в эстуарий $\sim 7\text{--}8$ сут [19], исследования 2005 г. выполнялись в кульминацию весеннего половодья на фоне подъема уровня реки до 350 см. Весеннее половодье 2006 г. (рис. 2, 3, 2) оказалось маловодным. Его кульминация наступила на полмесяца раньше предыдущего года в середине мая, когда расходы воды поднялись до $13\,700 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$. В июне сток ослабел – среднемесячный расход составил $11\,600 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$ (вдвое ниже 2005 г.), а минимальный достигал $9340 \text{ м}^3\text{с}^{-1}$. Как видно, период работ совпал не только с низкими расходами, но и вообще со спадом половодья. К окончанию исследований уровень реки снизился до минимального для межени значения 35 см.

Преобладание в водном балансе снеговых и подземных вод отразилось в изменении температуры воды не только в нижнем течении Амура, но и в Амурском лимане. по сравнению с 2005 г. среднее (интегральное по вертикали) значение в сегментах ALS и ARE снизилось от $19,5$ до $16,9$ °C, в ARL – от $14,8$ до $12,7$ °C (табл. 2; рис. 4, 5).

Возобновление свободного водообмена между сегментами ARL и OSE произошло на рубеже мая–июня. Триггером гидравлического удара, выбившего из вершины Сахалинского залива дамбу нагроможденных ледяных торосов, мог быть первый положительный экстремум весеннего половодья в Амурском лимане, который спровоцировал подпор вод на северной и южной границах лимана.

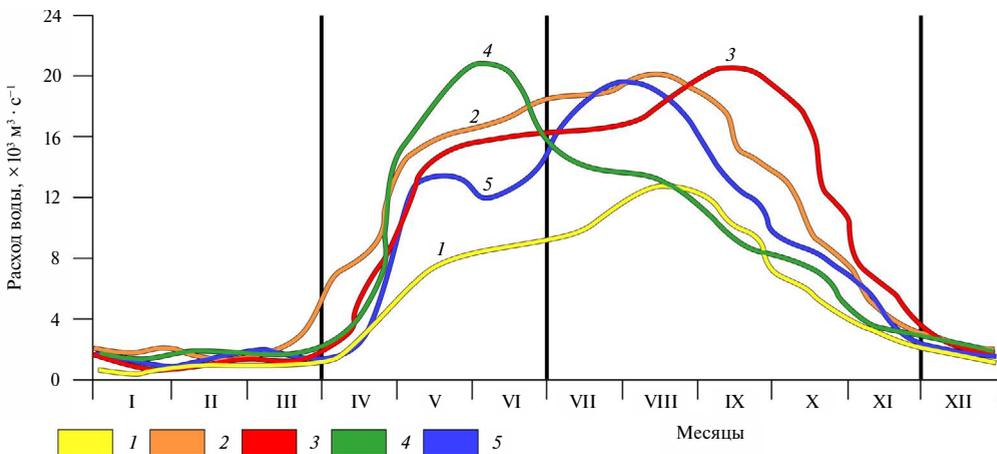


Рис. 2. Гидрографы стока р. Амур: 1 – низкий сток, 2 – высокий сток, 3 – среднегодовой, 4 – 2005 г., 5 – 2006 г. (данные гидрологического поста «Комсомольск-на-Амуре», <https://portal.grdc.bafg.de/>)

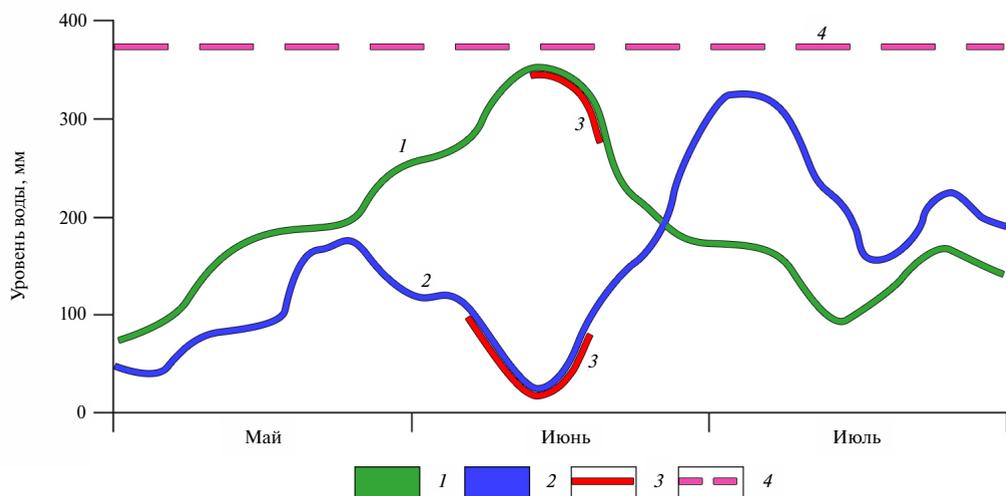


Рис. 3. Изменения уровня воды р. Амур весной–летом 2005 (1) и 2006 (2) гг. Сегменты (3) указывают на периоды работ (данные гидрологического поста «Комсомольск-на-Амуре», <https://portal.grdc.bafg.de/>). 4 – уровень воды в Амуре, соответствующий началу затопления поймы (380 см)

Таблица 2

Изменчивость характеристик поверхностных вод на трансекте река–море

Характеристика		ALS + ARE	ARL	OSE ⁴	JSE ⁴
S, ‰ ²	2005	0,03÷0,04/0,03	0,03÷13,1/3,7	0,2÷29,2 ⁴ /8,7	18,8÷27,0 ⁴ /23,4
	2006	0,03÷0,05/0,04	0,04÷15,9/5,8	0,9÷27,6 ⁴ /8,2	11,6÷26,6 ⁴ /21,0
T°C ³	2005	18,0÷20,2/19,5	9,3÷18,5/14,8	13,9÷15,1/14,6	9,4÷11,1/10,1
	2006	15,7÷18,3/16,9	9,7÷14,8/12,7	10,8÷16,8/12,7	9,7÷14,1/10,9
SPM, мг л ⁻¹	2005	14,2÷30,1/20,4	10,2÷33,6/ 18,4	5,2÷7,5/6,1	3,3÷11,6/5,9
	2006	15,3÷24,8/19,9	15,3÷61,2/ 32,4	9,1÷71,0/27,4	8,7÷31,1/17,1
POC, %	2005	0,8÷1,4/1,3	1,1÷1,2/1,2	1,2÷3,1/2,4	0,9÷10,6/5,8
	2006	0,7÷2,1/1,1	0,4÷1,7/1,0	0,6÷8,2/5,0	2,2÷2,3/2,3
TN, %	2005	0,10÷0,17/0,13	0,13÷0,15/0,14	0,16÷0,38/0,27	0,10÷1,29/0,62
	2006	0,09÷0,30/0,15	0,02÷0,19/0,10	0,06÷0,90/0,51	0,23÷0,28/0,25
POC/TN	2005	7,8÷9,8/8,2	8,0÷8,1/8,1	7,8÷8,4/8,1	8,2÷9,1/8,7
	2006	6,8÷9,9/7,5	9,1÷10,3/9,7	5,6÷9,2/7,2	9,1÷9,9/9,5
δ ¹³ C, ‰	2005	-29,5÷ -27,9/-28,9	-28,8÷-28,7 /-28,8	-27,4÷-25,7/-26,6	-26,6÷-24,9/-25,7
	2006	-29,9÷-28,7/-29,4	-27,5÷-26,4/ -27,2	-26,2÷-23,6/-24,6	-28,7÷-24,2/-25,9
δ ¹⁵ N, ‰	2005	5,0÷7,2/6,1	7,2÷8,2/7,7	5,6÷6,5/6,0	4,9÷8,1/6,5
	2006	3,3÷4,1/3,7	5,2÷8,4/6,1	6,7÷7,9/7,2	5,9÷6,6/6,4

Примечание. ¹мин-макс/среднее, ²соленость, ³температура, ⁴с учетом значений на широтных раз-
резах через северную и южную границы сегмента ARL.

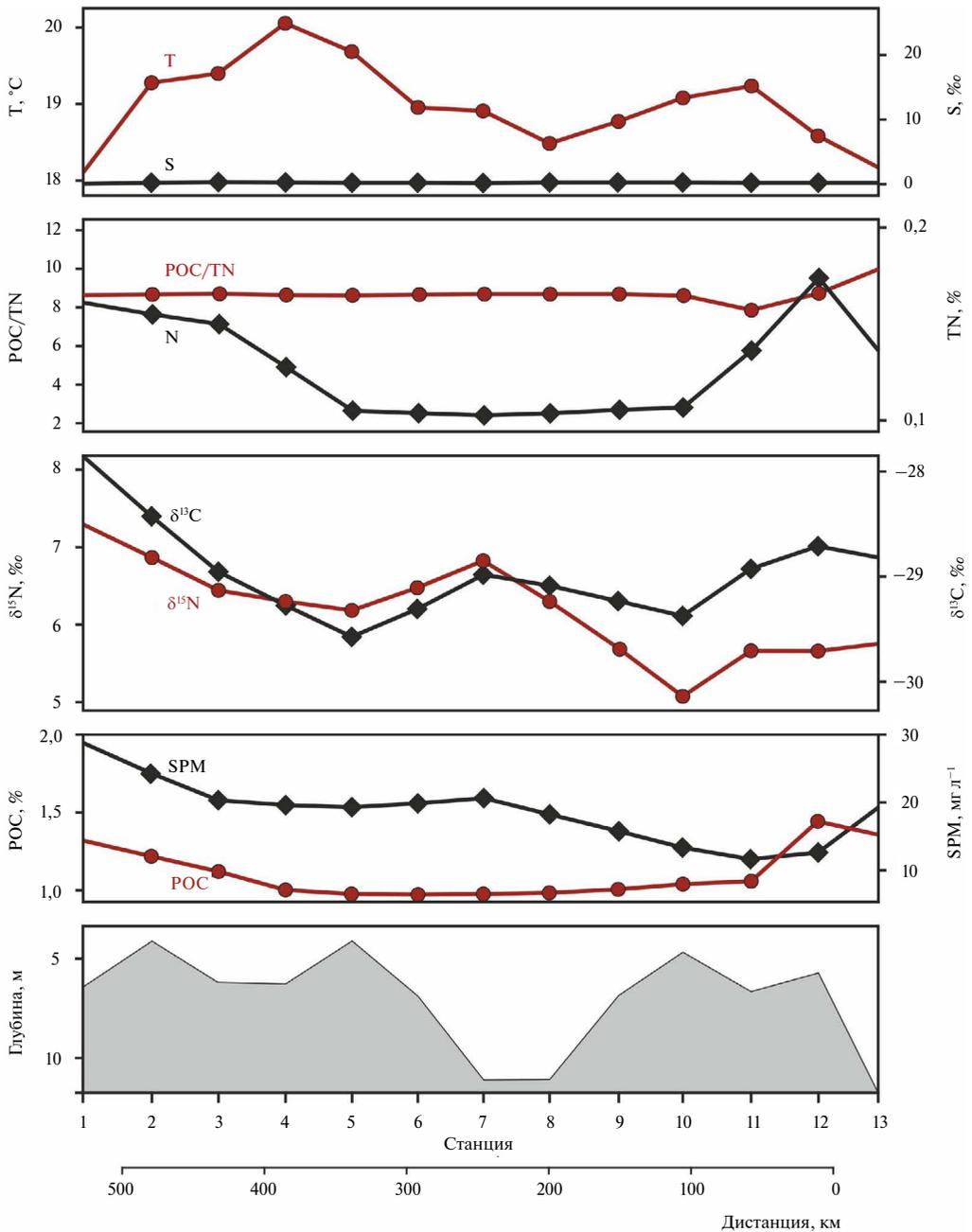


Рис. 4. Изменчивость гидрологических параметров и биогеохимических характеристик SPM-POM на трансекте нижнее течение реки – устье Амура (сегменты ALS, ARE). Июнь 2005 г.

Масштабы межгодовой изменчивости литодинамического сигнала SPM

В 2005 и 2006 гг. на 560 км участке нижнего течения до устья соленость не превышала 0,04 ‰ (табл. 1). Сегмент ARE выделялся только по дальности проникновения вверх по реке колебаний уровня морского происхождения.

Содержание SPM к устью в 2005 г. сократилось более чем в 2 раза (от 30,1 до 14,5 мг л⁻¹, среднее 20,4 мг л⁻¹), что отражало усиление седиментации частиц под влиянием приливного

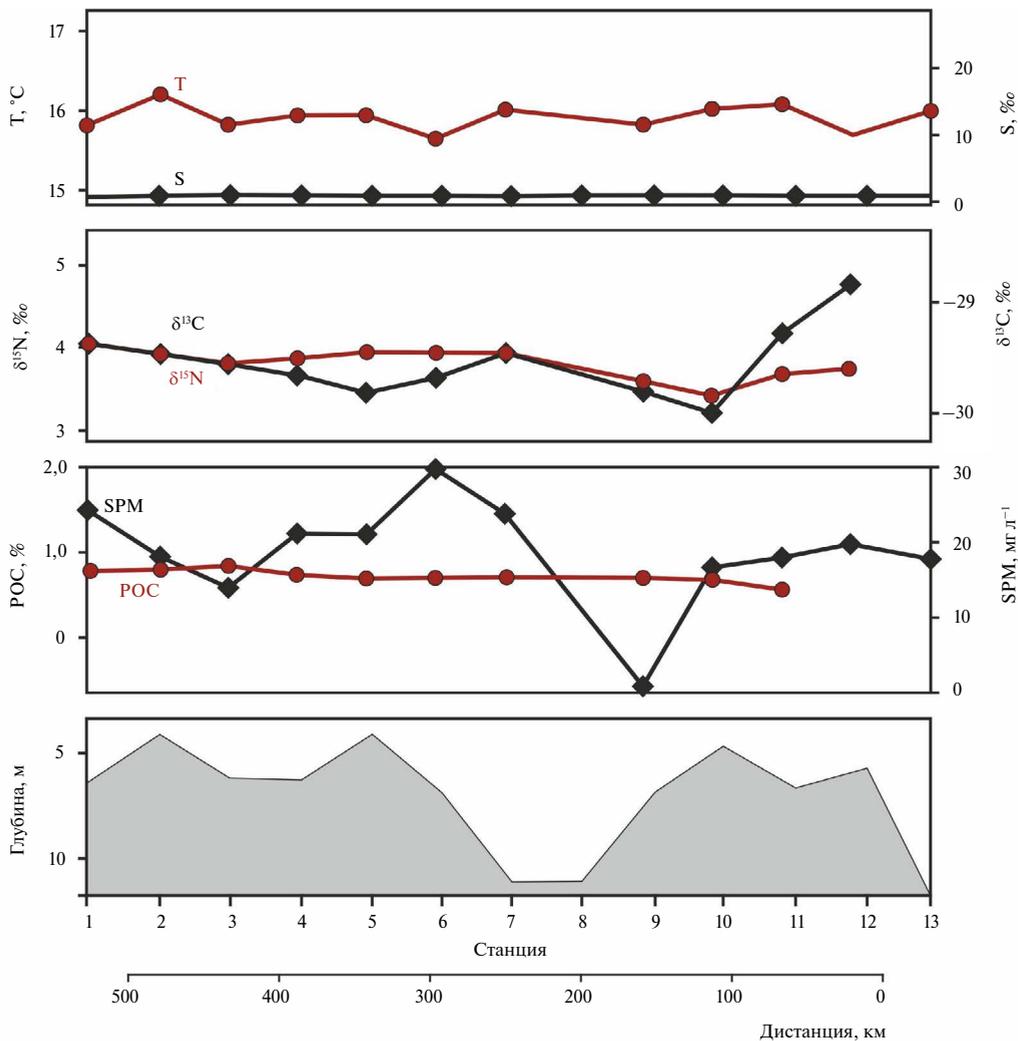


Рис. 5. Изменчивость гидрологических параметров и биогеохимических характеристик SPM-POC на трансекте нижнее течение реки – устье Амура (сегменты ALS, ARE). Июнь 2006 г.

подпора. Несмотря на значительно меньшую водность реки, в 2006 г. содержание изменилось незначительно (15,3–24,8 мг л⁻¹, среднее 19,9 мг л⁻¹). Стабильным был и тренд снижения значений к устью в 1,6–2 раза. В то же время распределение значений на трансекте отличалось прежде всего вследствие ослабления транспортирующей способности речного потока в 2006 г. На первый взгляд, неупорядоченные колебания содержания SPM отражали локальные участки турбулизации потока над неоднородностями донного рельефа. В 2005 г. такие участки сглаживались повышенной водностью Амура. Пересечение глубоководных участков русла сопровождалось снижением содержания SPM, что и было зарегистрировано в вершине сегмента ARE. Большие глубины (до 23–26 м) и значительная ширина русла (до 5–10 км) приводили к распластыванию и ослаблению взвешенного потока, а колебания уровня морского происхождения здесь угасали. Эрозия мелководий приводила к обратному эффекту.

Несмотря на различные режимы прохождения весеннего половодья, сопоставимый литодинамический сигнал по содержанию SPM сохранился в 2005 и 2006 гг., что с определенными допущениями позволяет считать его фоновым, кроме периодов с аномалиями стока в этот сезон.

В 2005 и 2006 гг. пресные воды ($S < 0,05\text{‰}$) занимали значительную часть Амурского лимана, веерообразно растекаясь по его поверхности в диаметрально противоположных

направлениях до островного берега. В северной части лимана на границе взаимодействия речного шлейфа с интрузией охотоморских вод сформировался соленостный фронт. Такой же гидрологический раздел прослеживался в южной части лимана, куда проникали япономорские воды (рис. 6, 7). Внутрисуточная изменчивость гидрологических характеристик выделялась небольшими амплитудами, отсутствием выраженных периодических составляющих.

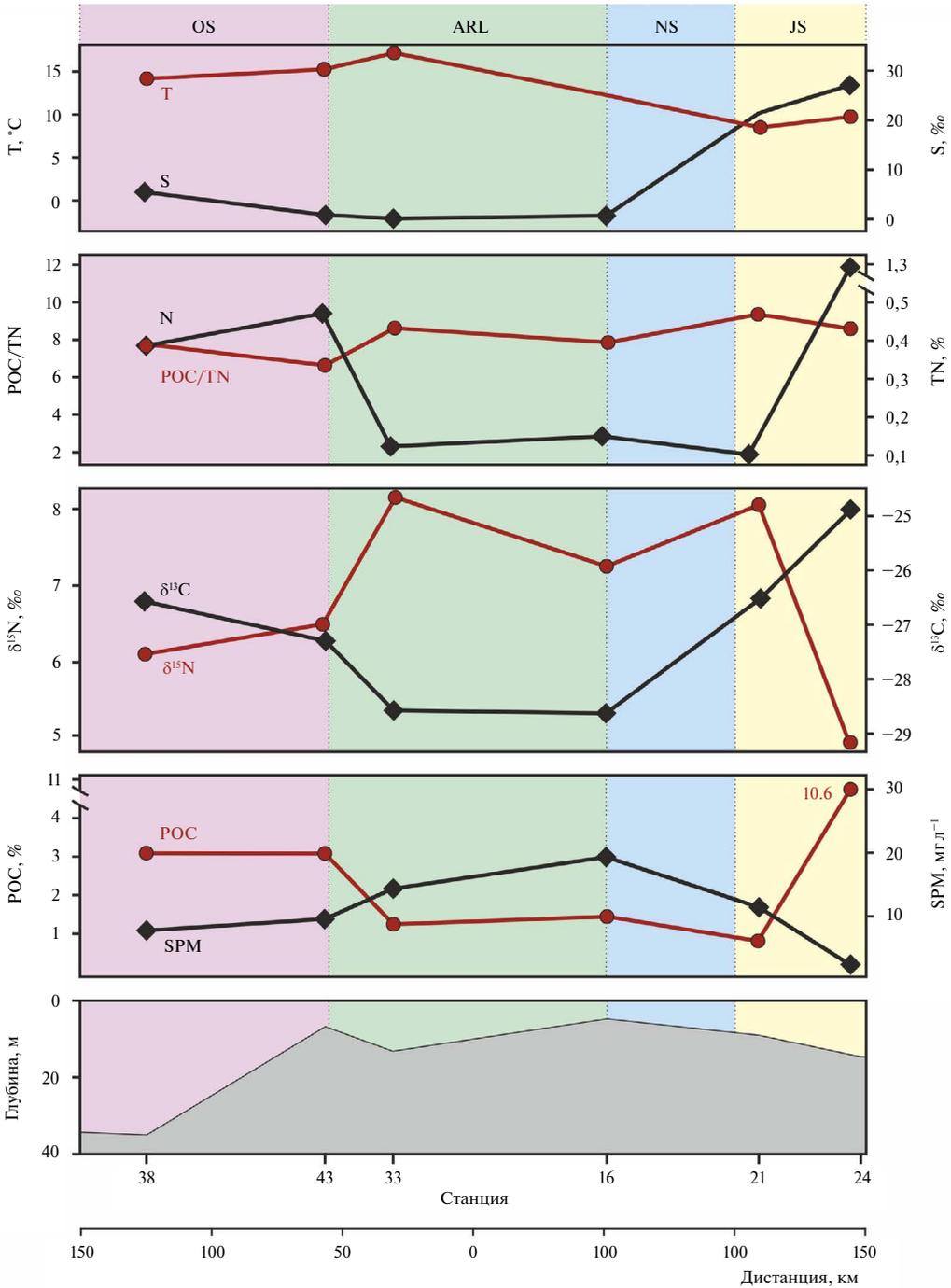


Рис. 6. Изменчивость гидрологических параметров и биогеохимических характеристик SPM-POC через сегменты ARL, OSE, JSE. Июнь 2005 г.

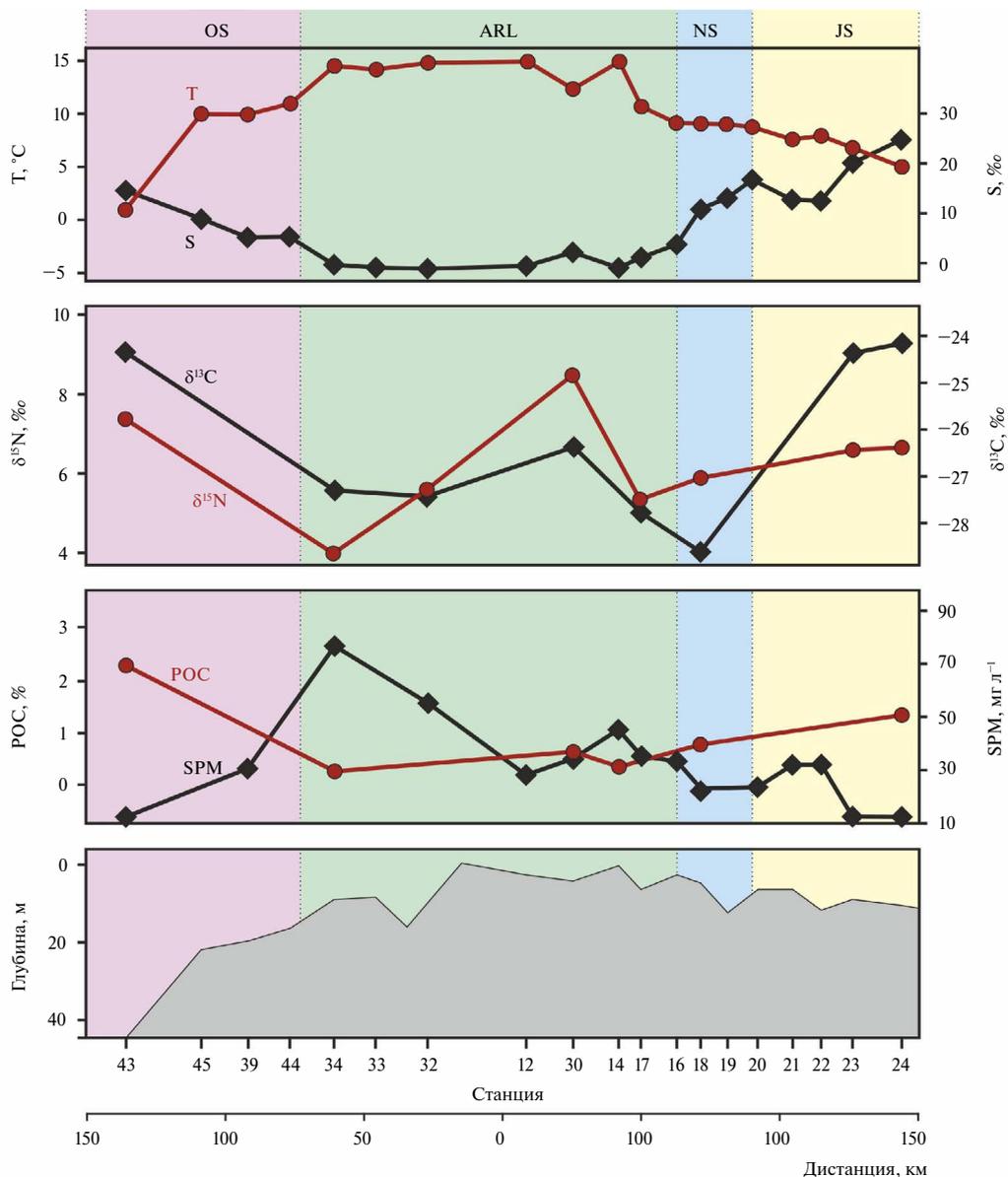


Рис. 7. Изменчивость гидрологических параметров и биогеохимических характеристик SPM-POM через сегменты ARL, OSE, JSE. Июнь 2006 г.

Направление течения ограничивалось сектором 260–350°, без типичного для приливных колебаний вращения [20].

Содержание SPM в июне 2005 г. колебалось между 10,2–33,6 мг л⁻¹ (среднее значение 18,4 мг л⁻¹), а это сопоставимо с водами сегмента ARE. Область максимальных значений была сконцентрирована вдоль устьевое створа. В водах осевой части лимана содержание уменьшалось до 10–20 мг л⁻¹ с усилением данного тренда к сегментам OSE и JSE. В июне 2006 г. содержание SPM возросло до 15,3–61,2 мг л⁻¹ (среднее значение 32,4 мг л⁻¹) (рис. 6, 7). Резкое увеличение значений до максимальных на границе ARL-OSE обусловлено торможением стокового шлейфа охотоморским приливом. К югу от устья содержание SPM сокращалось до 17 мг л⁻¹ у границы с JSE. Содержание SPM в 2005 и 2006 гг. в лимане не относилось даже к повышенному, поскольку было ниже периода осеннего дождевого

паводка в несколько десятков раз. Движение стокового шлейфа в OSE отклонялось вправо к о-ву Сахалин, в соответствии с действием силы Кориолиса в Северном полушарии. На внешней границе шлейфа сформировалась полужамкнутая антициклоническая циркуляция [20]. Наблюдалось устойчивое снижение значений SPM на трансекте из лимана в OSE и JSE. Уровень содержания в июне 2005 г. в OSE составил 5,2–7,5 мг л⁻¹ (среднее 6,1 мг л⁻¹). Это означало трехкратные потери SPM в результате седиментации на фоне роста солёности. Аналогичное распределение отмечено и для сегмента JSE (3,3–11,6 мг л⁻¹, среднее 5,9 мг л⁻¹).

В июне 2006 г. содержание SPM оказалось выше в сравнении с 2005 г. Максимум обнаружен на замыкающем северном створе лимана, откуда значения в шлейфе стоковых вод снижались (рис. 7). Горизонтальный градиент изменения содержания SPM на этом участке составлял 0,9 мг л⁻¹ км⁻¹ (в июне 2005 г. – 0,06 мг л⁻¹ км⁻¹). Измерения выполнялись в прилив, так как синхронно с ростом солёности происходило снижение значений SPM. Оно обусловлено торможением стокового шлейфа на границе раздела с солёным клином (коэффициент корреляции r для 2005 и 2006 гг. соответственно –0,6 и –0,8).

Таким образом, в 2006 г. выявлен двукратный рост содержания SPM в сегменте ARL и трехкратный – в сегментах OSE и JSE относительно предыдущего года. Содержание в сегментах нижнего течения Амура ALS, ARE и в Амурском лимане в 2005 г. было сопоставимо. На следующий год значения SPM в ARL увеличилось в 1,6 раза по сравнению с нижним течением реки по причине гидродинамической ресуспензии. На это указывают придонные максимумы значений SPM до 94 мг л⁻¹ (табл. 1; рис. 4–7) в градиентной осевой части лимана. Повышение содержания в сегментах OSE и JSE обеспечивали стоковые течения, транспортирующие ремобилизованный SPM за пределы ARL.

Масштабы межгодовой изменчивости биогеохимического сигнала POM

В нижнем течении Амура вариации значений элементно-изотопных характеристик POM в июне 2005 и 2006 гг. выражены следующими диапазонами: POC (0,7–2,1%, среднее = 1,2%), TN (0,09–0,30%, среднее = 0,14%), POC/TN (6,8–9,9, среднее = 7,8), $\delta^{13}\text{C}$ (от –29,9 до –27,9‰, среднее = –29,1‰) и $\delta^{15}\text{N}$ (3,3–7,2‰, среднее = 4,9‰) (табл. 1; рис. 4, 5). Для ARL, в условиях начальной стадии смешения вод, диапазоны изменяются. Значения POC колебались от 0,4 до 1,7% (среднее 1,1%), TN – от 0,02 до 0,15% (среднее 0,12%), POC/TN – от 8,0 до 10,3 (среднее 8,9), $\delta^{13}\text{C}$ – от –28,8 до –26,4‰ (среднее –28,0‰) и $\delta^{15}\text{N}$ – от 5,2 до 8,4‰ (среднее 4,9‰). по сравнению с сегментами ALS, ARE, ARL в OSE и JSE содержание POC увеличилось в несколько раз. Более низкие значения в июне 2005 г. в OSE свидетельствуют о лимитировании продуктивности вод повышенным содержанием SPM по сравнению с JSE. Возможно, такое ограничение обусловлено происшедшим две недели назад залповым выбросом из лимана огромного объема относительно теплой и мутной пресной воды. Он вызвал разрушение зимней стратификации вод в восточной части Сахалинского залива, которая по мере заполнения стокового шлейфа на момент исследований приобрела черты двухслойной циркуляции, типичной для эстуариев. В 2006 г. ослабленный стоковый шлейф способствовал задержке выноса припайного льда из залива. Близость фронта холода проявилась в более низкой температуре воды. Лед вытеснялся к периферии стокового шлейфа, таял и обогащал прилегающие воды биогенными компонентами. Все это способствовало условиям для развития планктона.

Схожий тренд отмечен и в изменении содержания TN. Диапазон величин POC/TN в OSE колебался от 5,6 до 9,2 (среднее 7,6), тогда как в JSE был ограничен диапазоном 8,2–9,9 (среднее 9,1). Межгодовые изменения, обусловленные колебаниями водности реки, просматриваются и в значениях $\delta^{13}\text{C}$. Средний изотопный состав POC в водах JSE в 2005 и 2006 гг. сохранялся на уровне –25,8‰. В Сахалинском заливе и Татарском проливе диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ был менее широк в 2005 г. в противоположность 2006 г. Это видно по крайним значениям: от –26,2 до –23,6‰ и от –28,7 до –24,2‰ соответственно для OSE и JSE (табл. 1; рис. 6, 7).

Оценка возможных источников РОМ

В июне 2005 г. соленость и температура поверхностных вод на всем протяжении трансекты в сегментах ALS–ARE оставались стабильными (соответственно, $\sim 0,03\%$ и $18\text{--}20,2\text{ }^\circ\text{C}$). Значения SPM, РОС и TN вниз по течению плавно снижались и незначительно увеличивались в устье (ст. 12, 13) (рис. 4). Величины $\delta^{13}\text{C}$ – terrPOC на трансекте до устья представлены диапазоном $-29,5 \div -27,9\%$, сравнимом с $\delta^{13}\text{C}$ типичной наземной СЗ растительности [21]. Содержание $\delta^{15}\text{N}$ от 5,0 до 7,2‰ в целом отвечало терригенному органическому материалу взвеси (SPM-terrPOM) [22]. Поведение $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ на трансекте до устья хорошо согласовывалось между собой ($r = 0,66$). Данное обстоятельство позволило предположить схожесть процессов, влияющих на изотопные эффекты. Так, они могут обуславливаться ассимиляцией фитопланктоном NO_3 , фиксацией N_2 и денитрификацией водной экосистемы. Отношение РОС/TN указывало на генетическую связь с источником SPM-terrPOM и степень его раннедиагенетической минерализации. Значения отношения от 7,8 до 9,8 отражали невысокое содержание РОС и TN ($r = 0,76$), с трендом слабого роста к устью. Обычно SPM-terrPOM характеризуется значениями отношения от 12–15 [23]. При разнообразии и неопределенности степени преобразованности terrPOM в результате окислительно-восстановительного диагенеза выявленный диапазон величин объясняется смещением OM терригенной наземной и водной экосистем.

В направлении максимального стока амурских вод (на север лимана) происходило слабое облегчение изотопного состава ^{13}C и ^{15}N , а также незначительное снижение содержания РОС и TN. Противоположное поведение этих характеристик отмечено в водах, транспортируемых в Татарский пролив. Выявлена корреляция указанных характеристик с температурой поверхностной воды (наблюдалось снижение температуры почти на $5\text{ }^\circ\text{C}$ из-за подпора япономорским приливом в узле эрозийных желобов на юге лимана. Здесь происходило концентрирование SPM-POM, вызывающее слабый рост РОС и TN. Результирующий элементный и изотопный терригенный сигнал SPM-POM в сегментах ARL, ALS и ARE, формирующийся в результате смешения разнообразных наземных источников и речного планктона, схож. К границе OSE с лиманом произошли трехкратное увеличение содержания РОС (от 1 до 3 %) и TN (от 0,15 до 0,48%), как рефлекс на слабый рост солености и уменьшение содержания SPM. Изменения TN, вероятно, связаны с увеличением содержания органического и неорганического N, что, скорее всего, и отразилось в снижении величины РОС/TN от 8,7 до 7. Отмечены слабое утяжеление стабильного изотопа ^{13}C (от $-28,5$ до $-27,3\%$) и облегчение изотопа ^{15}N (от 8,2 до 6,5‰). В вершине Сахалинского залива поведение характеристик SPM-POM стабилизировалось. К северной точке трансекты S возросла на 5‰ (до 7‰), температура снизилась на $3\text{ }^\circ\text{C}$ (до $14\text{ }^\circ\text{C}$). Содержание РОС сохранилось на уровне $\sim 3\%$, TN снизилось на 0,13 %, величина РОС/TN несущественно возросла (от 7 до 8). Утяжеление изотопа ^{13}C достигло $-26,7\%$, величина стабильного изотопа ^{15}N возросла до 6‰ (рис. 6; табл. 1).

На внешнем устьевом баре в вершине Сахалинского залива в результате гравитационных и биогеохимических процессов содержание снижалось в 3 раза по сравнению с водами ARL. За счет потери гидравлически крупной SPM в транзите оставались преимущественно ее алевритово-пелитовые фракции. Минеральная матрица глинистых частиц участвует в сорбции DOM речных гуминовых веществ, результат которой проявляется в увеличении содержания РОС. Его среднее содержание, как и TN сегмента OSE, увеличилось в 2 раза, как по указанной причине, так и вследствие роста пула морского источника POM. В то же время средняя величина РОС/TN равная 8,1 в OSE не изменилась относительно SPM сегментов ALS, ARE и ARL, однако облегчился состав $\delta^{15}\text{N}$ и утяжелился $\delta^{13}\text{C}$, а это признаки усиления влияния морского планктона и «свежести» POM, как отмечалось в работе [17].

При количественной оценке относительного вклада terrOC использовалось уравнение изотопного материального баланса [23, 24]. В качестве реперных значений использовалась величина ^{13}C охотоморского планктона ($\delta^{13}\text{C}_{\text{mar}}$), соответствующая $-21,7\%$ [25] и ^{13}C терригенного источника $-27,6\%$ [11]. Тренд снижения значений terrOC от 100 до 78% (среднее 89%) в сторону Охотского моря означал латеральное перераспределение доли источников РОС, в частности увеличение содержания морского РОС (marPOC).

Более сложное распределение биогеохимических характеристик SPM-POM наблюдалось в направлении сегмента JSE, куда транспортировалась треть водного стока Амура. Начало роста солёности приурочено к узлу разветвления эрозионных желобов, в 30 км от пролива Невельского. В самом проливе S достигла 12–18‰ и продолжила увеличиваться к югу. по сравнению с OSE количественные характеристики фитопланктона, концентрация биогенных элементов были ниже, но интенсивный фотосинтез обеспечил JSE статус эвтрофного бассейна [26]. На фоне роста солёности поведение SPM проявило консервативный характер, снизившись от узла разветвления желобов к южной станции трансекты в несколько раз ($r = -0,59$). Аналогичное поведение проявил ^{13}C – он утяжелился с $-28,7$ до $-24,9\text{‰}$ при росте S от 12 до 27‰ ($r = 0,88$). При достижении S = 22‰ содержание POC и TN увеличилось почти на порядок, поэтому величина POC/TN сохранилась в диапазоне 8,2–9,1. Содержание ^{15}N снизилось от 8,1 до 4,9‰. Очевидно, что влияние морского планктона на состав SPM-POM более значимо в сегменте JSE. Вклад terrPOC сократился в JSE почти в 2 раза (от 93 до 44%, среднее 61%), и, таким образом, вклад marPOC достигал 56%.

Ожидалось, что невысокий водный сток в июне 2006 г. должен был привести к ослаблению мобилизационного потенциала терригенного материала в водосборе Амура. Между тем содержание SPM в сегментах ALS, ARE было сопоставимо с июнем 2005 г. Это может означать, что недостающий объём терригенного материала компенсируется продуктами размыва низкой поймы и русловых аккумулятивных образований. Поэтому в нижнем течении реки наблюдались колебания содержания SPM от 3,2 до 24,8 мг л⁻¹. К примеру, отмечено увеличение содержания над мелководными эродлируемыми участками русла и резкое снижение над глубоководными плесами. К последним также приурочено увеличение содержания изотопов ^{13}C до $-29,9\text{‰}$ и ^{15}N до 4,1‰ (рис. 5). Выявленное облегчение $\delta^{13}\text{C}$, возможно, связано с изотопным фракционированием POM, сопровождающим усиление цветения диатомовых водорослей. На интенсификацию первичного продуцирования могли повлиять концентрация O₂ в нижнем течении реки, близкая к равновесной с атмосферной, рост в 3,5 раза по сравнению с июнем 2005 г. содержания хлорофилла, невысокое содержание гуминовых веществ (в несколько раз ниже), лимитирующее доминирование деструкционных процессов [27].

По понятным причинам максимум содержания SPM приурочен к границе с Сахалинским заливом. Тренды распределения изученных характеристик SPM-POM в OSE и JSE в целом сохранились. Как и в 2005 г., четко обозначенные градиентные зоны формировались на севере и юге Амурского лимана. На границе между OSE и ARL, например, в начальную стадию смещения вод (S ~5‰) быстро сокращалось содержание SPM (градиент SPM = 0,73 мг л⁻¹км⁻¹, градиент S = 0,15‰). Увеличилось содержание POC (градиент 0,02%) и ^{13}C ($\Delta = -2,6\text{‰}$) и ^{15}N ($\Delta = 1,2\text{‰}$). Содержание TN при пересечении градиентной зоны в OSE возросло в 5 раз (и в 2,5 раза в JSE), но величина POC/ TN снизилась (коэффициент корреляции r между TN и POC/ TN составил $-0,80$). Аналогичное распределение характерно и для сегмента JSE.

Вариации доли terrPOC в нижнем течении Амура и лимане оценены в 95–100% (т.е. marPOC = 0–5%), в OSE – 43–87% (marPOC = 13–57%) и в JSE – от 44 до 93% (marPOC = 7–56%).

Выводы

В весеннее половодье 2005 и 2006 гг. в нижнем течении и эстуарии реки Амур выполнены наблюдения за изменчивостью литодинамических и биогеохимических характеристик взвеси. Периоды исследований кардинально различались между собой по водности, условиям мобилизации терригенного материала в водосборе. Работы в июне 2005 г. выполнены в кульминацию достижения высокого уровня реки, а в следующем году – в кульминацию наинизшего меженного уровня Амура.

В периоды работ 2005 и 2006 гг. не выявлено значимых отличий содержания SPM в нижнем течении Амура, однако они проявились в морских сегментах эстуария. В Амурском лимане уровень содержания регулировался процессами волновой эрозии обширных мелководий – первопричины 2–3-кратного роста содержания в 2006 г. В сегментах OSE и JSE

поведение SPM контролировалось изменениями солёности. Результирующий вклад терригенного источника РОС отражали значения $\delta^{13}\text{C}$ от -28 до -29% , $\delta^{15}\text{N}$ – от $7,3$ до $5,7\%$, отношения РОС/TN – от 8 до 10 . В двухлетнем цикле выполненных наблюдений существенных изменений в распределении не установлено.

Межгодовые различия водности реки проявились в распространении стокового шлейфа в ARL, OSE и JSE. Транзит вод через эти сегменты сопровождался выведением из переноса гидравлически крупных частиц, ассоциирующих с тяжёлыми минералами. Глинистая компонента SPM чутко реагировала на увеличение солёности, вызывая рост значений не только terrPOC, но и вклада планктогенного marPOC. На удалённых от границ лимана станциях трансекты его вклад достигал 57% , а элементно-изотопный сигнал характеризовался утяжелением $\delta^{13}\text{C}$ до -25% , $\delta^{15}\text{N}$ – до 8% , снижением величины РОС/TN до $7-8$.

В обстановке современных глобальных климатических изменений результаты работы могут быть полезным при мониторинге экспорта терригенного материала в окраинно-тихоокеанские моря.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.: ГЕОС, 2011. 660 с.
2. Yasuda T., Asahara Y., Ichikawa R. et al. Distribution and transport processes of lithogenic material from the Amur River revealed by the Sr and Nd isotope ratios of sediments from the Sea of Okhotsk // *Progress in Oceanography*. 2014. Vol. 126. P. 155–167.
3. Seki O., Mikami Y., Nagao S. et al. Lignin phenols and BIT index distributions in the Amur River and the Sea of Okhotsk: Implications for the source and transport of particulate terrestrial organic matter to the ocean // *Progress in Oceanography*. 2014. Vol. 126. P. 146–154.
4. Шамов В.В., Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Макагонова М.А. Исследования гидрологических последствий современных изменений климата в Дальневосточном регионе России // *Вестник ДВО РАН*. 2014. № 2. С. 15–23.
5. Tachibana Y., Oshima K., Ogi M. Seasonal and interannual variations of Amur River discharge and their relationships to large-scale atmospheric patterns and moisture fluxes // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. D16102.
6. Гельфан А.Н., Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г. Оценка изменений водного режима реки Амур в XXI веке при двух способах задания климатических проекций в модели формирования речного стока // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45, № 3. С. 223–234.
7. Калугин А.С. Модель формирования стока реки Амур и ее применение для оценки возможных изменений водного режима / автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2016. 24 с.
8. Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J. et al. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas // *Estuaries Coasts*. 2012. Vol. 35. P. 369–382.
9. Frey K.E., McClelland J.W. Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry // *Hydrol. Process*. 2009. Vol. 23. P. 169–182.
10. Holmes R.M., McClelland J.W., Raymond P.A. et al. Lability of DOC transported by Alaskan rivers to the Arctic Ocean // *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. L03402.
11. Дударев О.В., Семилетов И.П., Чаркин А.Н. Масштабы изменчивости состава взвеси в системе река Лена – море Лаптевых // *Докл. Акад. наук*. 2006. Т. 411, № 4. С. 527–534.
12. Dudarev O., Charkin A., Shakhova N. et al. East Siberian Sea: interannual heterogeneity of the suspended particulate matter and its biogeochemical signature // *Progress in Oceanography*. 2022. Vol. 208. 102903.
13. Gordeev V.V., Pokrovsky O.S., Zhulidov A.V. et al. Dissolved Major and Trace Elements in the Largest Eurasian Arctic Rivers: Ob, Yenisey, Lena, and Kolyma // *Water*. 2024. Vol. 16. 316.
14. Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г. Модель формирования стока для бассейна реки Амур // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45, № 2. С. 121–132.
15. Махинов А.Н., Лю Ш., Ким В.И., Махинова А.Ф. Особенности больших наводнений на реке Амур в период высокой водности 2009–2021 гг. // *Тихоокеанская география*. 2023. № 1. С. 66–74.
16. Левшина С.И. Органическое вещество поверхностных вод бассейна Среднего и Нижнего Амура. Владивосток: Дальнаука, 2010. 145 с.

17. Guo L., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: implications for terrestrial organic carbon export // *Global Biogeochem. Cycles*. 2004. Vol. 18. GB1036.
18. Vonk J.E., Sánchez-García L., Semiletov I. et al. Molecular and radiocarbon constraints on sources and degradation of terrestrial organic carbon along the Kolyma paleoriver transect, East Siberian Sea // *Biogeosciences*. 2010. Vol. 7. P. 3153–3166.
19. Упоров Г.А. Особенности экстремального наводнения в бассейне Амура летом 2013 года // *Вестник ДВО РАН*. 2014. № 5. С. 58–64.
20. Жабин И.А., Абросимова А.А., Дубина В.А., Некрасов Д.А. Влияние стока р. Амур на гидрологические условия Амурского лимана и Сахалинского залива Охотского моря в период весенне-летнего паводка // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 4. С. 93–100.
21. Finlay J.C., Kendall C. Stable Isotope Tracing of Temporal and Spatial Variability in Organic Matter Sources to Freshwater Ecosystems. In: *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*. Oxford, U.K.: Blackwell, 2008. P. 283–333. DOI: 10.1002/9780470691854.ch10.
22. Carreira R.S., Wagener A.L.R., Readman J.W. et al. Changes in the sedimentary organic carbon pool of a fertilized tropical estuary, Guanabara Bay, Brazil: an elemental, isotopic and molecular marker approach // *Mar. Chem.* 2002. Vol. 79. P. 207–227.
23. Galimov E.M. *Biological Fractionation of Isotopes*. N.Y.; Toronto; London: Academic Press, 1985.
24. Walsh J.J., McRoy C.P., Coachman L.K. et al. Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Seas: source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean // *Prog. Oceanog.* 1989. Vol. 22. P. 277–359.
25. Gorbatenko K.M., Lazhentsev A.E., Kiyashko S.I. Seasonal dynamics of the trophic status of zooplankton in the sea of Okhotsk (based on data from stable carbon- and nitrogen-isotope analysis) // *Russ. J. Mar. Biol.* 2014. Vol. 40. P. 519–531.
26. Колтунов А.М., Тищенко П.Я., Звалинский В.И. и др. Карбонатная система Амурского лимана и прилегающих морских акваторий // *Океанология*. 2009. Т. 49, № 5. С. 694–706.
27. Звалинский В.И., Тищенко П.Я., Колтунов А.М. и др. Карбонатная система, гидрохимические и продукционные характеристики нижнего течения реки Амур / ред. В.П. Челомин. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 35–53.

REFERENCES

1. Dobrovolski S.G. *Global changes in river flow*. Moscow: GEOS (Russia); 2011. 660 p. (In Russ.).
2. Yasuda T., Asahara Y., Ichikawa R. et al. Distribution and transport processes of lithogenic material from the Amur River revealed by the Sr and Nd isotope ratios of sediments from the Sea of Okhotsk. *Progress in Oceanography*. 2014;126:155–167.
3. Seki O., Mikami Y., Nagao S. et al. Lignin phenols and BIT index distributions in the Amur River and the Sea of Okhotsk: Implications for the source and transport of particulate terrestrial organic matter to the ocean. *Progress in Oceanography*. 2014;126:146–154.
4. Shamov V.V., Gartsman V.I., Gubareva T.C., Makagonova M.A. Studies of hydrological response to current climate change at the Russian Far East. *Vestnik of the FEB RAS*. 2014;(2):15–23. (In Russ.).
5. Tachibana Y., Oshima K., Ogi M. Seasonal and interannual variations of Amur River discharge and their relationships to large-scale atmospheric patterns and moisture fluxes. *J. Geophys. Res.* 2008;113. D16102.
6. Gelfan A.N., Kalugin A.S., Motovilov Y.G. Assessing amur water regime variations in the XXI century with two methods used to specify climate projections in river runoff formation model. *Water Resources*. 2018;45(3):307–317. (In Russ.).
7. Kalugin A.S. Runoff formation model of the Amur R. and its application to assess the possible changes in water regime: Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation. Moscow: Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences; 2016. (In Russ.).
8. Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J. et al. Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas. *Estuaries Coasts*. 2012;35:369–382.
9. Frey K.E., McClelland J.W. Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry. *Hydrol. Process*. 2009;23:169–182.
10. Holmes R.M., McClelland J.W., Raymond P.A. et al. Lability of DOC transported by Alaskan rivers to the Arctic Ocean. *Geophys. Res. Lett.* 2008;35. L03402.

11. Dudarev O.V., Semiletov I.P., Charkin A.N. Particulate material composition in the Lena River–Laptev Sea system: scales of heterogeneities. *Dokl. Earth Sci.* 2006;411A:1445–1451.
12. Dudarev O., Charkin A., Shakhova N. et al. East Siberian Sea: interannual heterogeneity of the suspended particulate matter and its biogeochemical signature. *Progress in Oceanography*. 2022;208. 102903.
13. Gordeev V.V., Pokrovsky O.S., Zhulidov A.V. et al. Dissolved Major and Trace Elements in the Largest Eurasian Arctic Rivers: Ob, Yenisey, Lena, and Kolyma. *Water*. 2024;16. 316.
14. Kalugin A.S., Motovilov Y.G. Runoff formation model for the Amur River basin. *Water Resour.* 2018;45:149–159.
15. Makhinov A.N., Shuguang Liu, Kim V.I., Makhinova A.F. Great floods on the Amur River during the high water period in 2013–2021. *Pacific Geography*. 2023;(1):66–74. (In Russ.).
16. Levshina S.I. Organic matter of surface waters of the middle and lower Amur basin. Vladivostok: Dal'nauka; 2010. 145 P. (In Russ.)
17. Guo L., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Characterization of Siberian Arctic coastal sediments: implications for terrestrial organic carbon export. *Global Biogeochem. Cycles*. 2004;18. GB1036.
18. Vonk J.E., Sánchez-García L., Semiletov I. et al. Molecular and radiocarbon constraints on sources and degradation of terrestrial organic carbon along the Kolyma paleoriver transect, East Siberian Sea. *Biogeochemistry*. 2010;7:3153–3166.
19. Uporov G.A. Features of extreme flood in the Amur River basin in summer 2013. *Vestnik of the FEB RAS*. 2014;(5):58–64. (In Russ.).
20. Zhabin I.A., Abrosimova A.A., Dubina V.A., Nekrasov D.A. Influence of the Amur River runoff on the hydrological conditions of the Amur Liman and Sakhalin Bay (Sea of Okhotsk) during the spring-summer flood. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2010;35(4):295–300.
21. Finlay J.C., Kendall C. Stable Isotope Tracing of Temporal and Spatial Variability in Organic Matter Sources to Freshwater Ecosystems. In *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*. Oxford, U.K.: Blackwell; 2008. P. 283–333. DOI: 10.1002/9780470691854.ch10.
22. Carreira R.S., Wagener A.L.R., Readman J.W. et al. Changes in the sedimentary organic carbon pool of a fertilized tropical estuary, Guanabara Bay, Brazil: an elemental, isotopic and molecular marker approach. *Mar. Chem.* 2002;79:207–227.
23. Galimov E.M. *Biological Fractionation of Isotopes*. N.Y.; Toronto; London: Academic Press; 1985.
24. Walsh J.J., McRoy C.P., Coachman L.K. et al. Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Seas: source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean. *Prog. Oceanog.* 1989;22:277–359.
25. Gorbatenko K.M., Lazhentsev A.E., Kiyashko S.I. Seasonal dynamics of the trophic status of zooplankton in the sea of Okhotsk (based on data from stable carbon- and nitrogen-isotope analysis). *Russ. J. Mar. Biol.* 2014;40:519–531.
26. Koltunov A.M., Tishchenko P.Ya., Zvalinskii V.I. et al. The carbonate system of the Amur estuary and the adjacent marine aquatic areas. *Oceanology*. 2009;49:643–654.
27. Zvalinsky V.I., Tishchenko P.Ya., Koltunov A.M., Shvetsova M.G., Sagalaev S.G. Hydrochemical and productivity characteristics of Amur River estuary. In: *Condition of marine ecosystems influenced by the Amur River flow*. Vladivostok: Dal'nauka; 2009. P. 35–53. (In Russ.)

Научная статья

УДК 595.135+571.642+25.00.00

DOI: 10.31857/S0869769825020069

EDN: GEWGMB

Находка нового вида щетинкочелюстных *Flaccisagitta yamato* sp. nov. (Chaetognatha, Sagittoidea) и особенности циркуляции вод в районе возвышенности Ямато Японского моря

А.П. Касаткина✉, В.Б. Лобанов, А.Ф. Сергеев

Алла Петровна Касаткина

доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,

Владивосток, Россия

arkas@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8004-9511>

Вячеслав Борисович Лобанов

кандидат географических наук, заведующий лабораторией

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,

Владивосток, Россия

lobanov@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9104-5578>

Александр Федорович Сергеев

старший научный сотрудник

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,

Владивосток, Россия

sergeev@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4247-0791>

Аннотация. В центре Японского моря над подводной возвышенностью Ямато были обнаружены щетинкочелюстные (Chaetognatha, Sagittoidea). Изучение анатомии экземпляров выявило наличие желеобразных структур (Sa-like gelatinous structures, SG/S), что показывает их принадлежность к подсемейству Flaccisagittinae. Признаками нового обнаруженного вида *Flaccisagitta yamato* sp. nov. являются распределение плавников на теле, форма мерцательной петли, наличие своеобразно расположенных лучевых структур и семенных пузырьков относительно хвостового плавника. Новый для науки вид был назван по месту находки над возвышенностью Ямато – *Flaccisagitta yamato* sp. nov. Уникальность находки заключается в распределении нового вида – он обнаружен только в водах над возвышенностью Ямато. Приведены гидрологические данные по возможному объяснению распределения нового вида, его находки в центральной части Японского моря. Современные представления о течениях, синоптической динамике вод и переносе водных масс, полученные в результате экспедиционных исследований и наблюдений из космоса, позволяют предположить причины обнаружения данного вида над возвышенностью Ямато.

Ключевые слова: Японское море, новый вид, щетинкочелюстные, Chaetognatha, Sagittoidea, возвышенность Ямато, морские течения, синоптические вихри, биоиндикаторы

Для цитирования: Касаткина А.П., Лобанов В.Б., Сергеев А.Ф. Находка нового вида щетинкочелюстных *Flaccisagitta yamato* sp. nov. (Chaetognatha, Sagittoidea) и особенности циркуляции вод в районе возвышенности Ямато Японского моря // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 76–89. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020069>

Благодарности. Авторы выражают благодарность Региональному центру космического мониторинга ИАПУ ДВО РАН за предоставленную спутниковую информацию и С.Ю. Ладыченко за подготовку спутниковых изображений.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, регистрационные номера 124022100077-0 и 124022100079-4 (2024–2026 гг.).

Original article

Discovery of a new species *Flaccisagitta yamato* sp. nov. (Chaetognatha, Sagittoidea) and features of water circulation in the Yamato Rise region of the Sea of Japan

A.P. Kasatkina, V.B. Lobanov, A.F. Sergeev

Alla P. Kasatkina

Doctor of Sciences in Biology, Leading Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

apkas@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8004-9511>

Vyacheslav B. Lobanov

Candidate of Sciences in Geography, Head of Laboratory

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

lobanov@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9104-5578>

Aleksandr F. Sergeev

Senior Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

sergeev@poi.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4247-0791>

Abstract. In the central Japan Sea, above the underwater Yamato Rise, chaetognaths (Chaetognatha, Sagittoidea) were discovered. Study of the anatomy of the specimens revealed the presence of saclike gelatinous structures (SG/S), which indicates their belonging to the subfamily Flaccisagittinae. The features of the newly discovered species of *Flaccisagitta* are the distribution of fins on the body, the shape of the ciliated loop, the presence of peculiarly located ray structures and seminal vesicles relative to the caudal fin. The new species for science was named after the place of discovery above the Yamato Rise *Flaccisagitta yamato* sp. nov. The uniqueness of the discovery lies in the distribution of the new species – it was found only in the waters above the Yamato Rise. Hydrological data are presented on a possible explanation of the distribution of the new species, its discovery in the central part of the Sea of Japan. Modern data on the movement of water

masses obtained as a result of expeditionary research and observations from space are presented, which allow us to assume the reasons for the existence of this species above the Yamato Rise.

Keywords: Sea of Japan, new species, Yamato Rise, sea currents, hydrography, Chaetognatha, Sagittoidea, bioindicators

For citation: Kasatkina A.P., Lobanov V.B., Sergeev A.F. Discovery of a new species *Flaccisagitta yamato* sp. nov. (Chaetognatha, Sagittoidea) and features of water circulation in the Yamato Rise region of the Sea of Japan. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025(2): 76–89.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020069>

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the Regional Satellite Monitoring Center of the IAPC FEB RAS for providing satellite information and S.Y. Ladychenko for preparing satellite images.

Funding. The work was carried out under the state task of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, registration numbers 124022100077-0 and 124022100079-4.

Введение

Фауна щетинкочелюстных (Щ) Японского моря и сопредельных вод изучена довольно подробно. Известны многолетние сезонные работы японских специалистов по исследованию фауны хетогнат поверхностных [1] и глубинных [2] вод Японского моря. Анализ хетогнат в водах Корейского полуострова представлен корейскими специалистами [3]. В подробной библиографии японских планктологов-хетогнатчиков, приведенной в работе [4], по результатам многолетних исследований перечислены следующие виды Щ: *Aidanosagitta neglecta*, *A. Regularis*, *A. Crassa*, *A. Delicate*, *Mesosagitta minima*, *Serratosagitta pseudoserratodentata*, *S. Pacifica*, *Flaccisagitta hexaptera*, *F. Inflate*, *Sagitta bipunctata*, *S. Bedoti*, *S. Pulchra*, *S. Nagae*, *Parasagitta elegans*, *Krohnitta pacific*, *K. Subtilis*, *Pterosagitta draco*, *Ferosagitta ferox*, *F. robusta*.

Одной из особенностей распределения Щ в Японском море является различие их видового состава в разных частях моря. Например, все вышеперечисленные виды Щ, часто встречаемые в юго-западной части моря в области Цусимского течения, не обнаружены в заливе Петра Великого и в открытых водах северо-западной части. Здесь обычно встречаются: *Aberrospadella verruculosa*, *Ferosagitta paulula*, *F. cristallina*, *F. curta*, *F. longa*, *Sagitta modesta*, *Sagitta sceptrum*, *S. nutana*, *Omittosagitta galzowi*, *O. starkiana*, *O. alvarinoe*, *O. diaphana*, *Oligoradiata entis*, *Oligoradiata pellucida*, *Aidanosagitta formula*, *Aidanosagitta macilenta*, *Aidanosagitta scarlatoi*, *Parasagitta brevicauda*, *Accedosagitta minuta*, *Abosagitta taeniata*, *A. grata*, *A. rasilis*, *A. macra* [4]. При этом эти виды, в свою очередь, отсутствуют в центральной и восточной частях Японского моря [1, 2, 4].

Общезвестно, что планктонные организмы не способны к самостоятельным большим перемещениям в пространстве, и поэтому их распределение существенно зависит от схемы течений и особенностей циркуляции и перемешивания водных масс. В центральной части моря располагается подводная возвышенность Ямато (рис. 1), которая состоит из двух возвышенностей, разделенных узкой глубоководной расселиной. Ее северная часть, Кита-Ямато (Северная Ямато, называемая также Сюнпу), имеет минимальную глубину над вершиной 383 м [6], что, безусловно, влияет на динамику вод в этом районе. Здесь проходит субарктический фронт, разделяющий северную холодную часть моря и более теплую южную [7, 8]. Над возвышенностью регулярно формируются вихри синоптического масштаба [9, 10], которые влияют на характер течений и схему переноса вод. Таким образом, здесь могут складываться особые океанографические условия, которые, в свою очередь, определяют особенности в распределении видов планктона.

Целью данной работы является анализ нового вида щетинкочелюстных, обнаруженно-го в районе возвышенности Ямато по результатам экспедиции ТОИ ДВО РАН, изучение анатомии экземпляров, а также исследование особенностей гидрологии района находки. Таксономическое изучение новых видов хетогнат, их сравнение с видами, обитающими в Мировом океане, не только расширяет наши знания о биоразнообразии водной толщи, но также представляет определенный интерес в изучении глобальных изменений, нашедших отражение в Японском море.

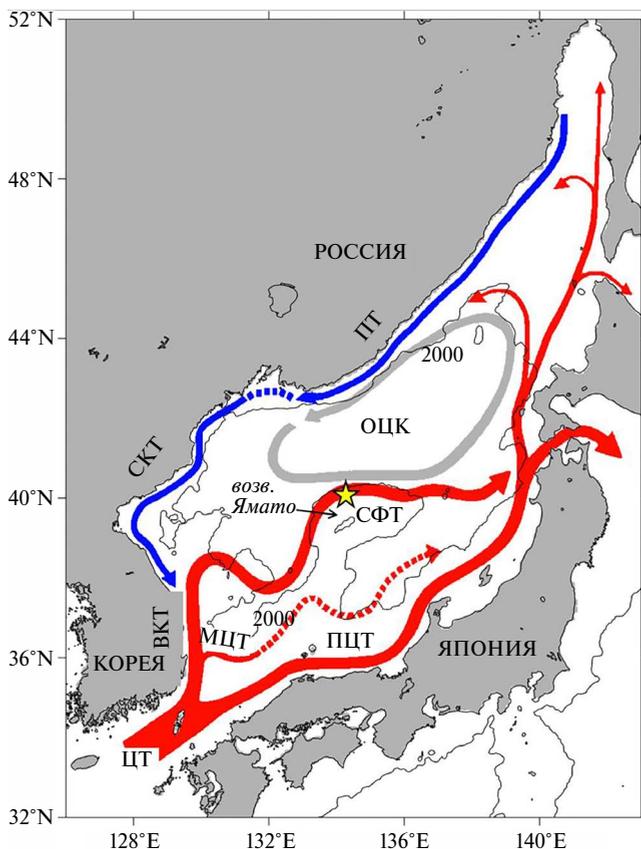


Рис. 1. Схема поверхностных течений Японского моря (по [5]). ЦТ – Цусимское течение; ПЦТ – прибрежная ветвь Цусимского течения; МЦТ – морская ветвь Цусимского течения; ВКТ – Восточно-Корейское течение; СФТ – Субполярное фронтальное течение; ПТ – Приморское течение; СКТ – Северо-Корейское течение; ОЦК – основной циклонический круговорот северной части Японского моря. Показана изобата 2000 м. Звездочкой на северном крае возвышенности Ямато обозначена станция 12, где был отобран голотип

Материал и методика

Материалом для исследования послужили пробы планктона, собранные в апреле 2014 г. в рейсе № 66 НИС «Академик М.А. Лаврентьев». Планктон отбирался сетью «Джеди» вертикальным тралением с горизонта 100–0 м. Пробы были зафиксированы 4%-м формалином. Обработка производилась пинцетом с загнутыми концами (на поддѐв), чтобы не повредить мягкие ткани. В лаборатории материал был исследован под бинокляром МВС-10, а фотографирование сделано под стереомикроскопом, оснащенный камерой Axio Cam ICs 3 модели Stemi 2000-C. Окрашивание производилось по методике, разработанной ранее [11].

В экспедиции проводилось гидрологическое зондирование с помощью СТД-зонда SBE-911 plus с дополнительными датчиками содержания растворенного кислорода, флуоресценции хлорофилла-а и мутности.

Для дальнейшего анализа использовались данные о распределении температуры воды Японского моря, предоставленные Японским метеорологическим агентством (JMA, <https://www.data.jma.go.jp>), а также спутниковые изображения, полученные в Региональном центре космического мониторинга ИАПУ ДВО РАН (<http://www.satellite.dvo.ru>). Графики вертикального распределения температуры воды и содержания хлорофилла-а по результатам судовых СТД-зондирований построены с помощью специального программного комплекса Ocean Data View [12].

Результаты

В результате обследования проб планктона было отобрано 33 экземпляра щетинкочелюстных. Исследование их анатомии показало, что отловленные щетинкочелюстные относятся к одному виду, новому для науки. Голотип выделен из пробы, взятой 22.04.2014 г. около 22:00 на станции 12 с координатами 39°59,93' с. ш., 134°03,29' в. д. (отмечена звездочкой на рис. 1). Половозрелых экземпляров – 4, неполовозрелых (на второй стадии половой зрелости) – 29. Ниже приводим описание голотипа.

Систематика

Новый для науки вид принадлежит к семейству Sagittidae, подсемейству Flaccisagittinae

Подсемейство Flaccisagittinae [13].

Диагноз. По бокам тела имеются мешковидные желеобразные структуры (МЖС), как в основании плавников, так и не имеющие плавниковой пластинки по своим краям. Две пары боковых плавников или МЖС. Железистые структуры на теле и хвосте очень редки. Внутреннее кольцо мерцательной петли не имеет железистой функции и ресничных клеток. Две пары рядов зубчиков на голове вокруг рта. В подсемействе 4 рода: *Flaccisagitta* [14]; *Pseudosagitta* [15]; *Accedosagitta* [16]; *Abosagitta* [17].

Типовой род – *Flaccisagitta* [14].

Ключ для определения родов подсемейства Flaccisagittinae

- 1 (6) Боковые плавники имеются..... (2)
- 2 (5) Две пары боковых плавников..... (3)
- 3 (4) Боковые плавники не имеют МЖС между собой..... *Flaccisagitta* (4)
- 4 (3) Боковые плавники имеют МЖС между собой *Pseudosagitta* (3)
- 5 (2) Имеется только 1-я пара боковых плавников, 2-я пара представляет собой уплощенные МЖС, лишённые плавниковой пластинки *Accedosagitta* (2)
- 6 (1) Боковые плавники отсутствуют, вместо них – боковые МЖС.....*Abosagitta* (1)

Новый для науки вид принадлежит к роду: *Flaccisagitta*.

Flaccisagitta Tokioka 1965

Типовой вид – *Flaccisagitta hexaptera* [18].

Синонимия: *Sagitta hexaptera* [18: 55, Taf. 10, Fig. 4, 5]; [19: 7, Fig. 1; 20: 12, 13, Fig. 6, 7]; *Flaccisagitta hexaptera* [14: 350]; [16, рис. А–Г]; [21: 121, 122, 21, 91А–Г].

Диагноз. Мешковидные желеобразные структуры между плавниками 2-й и 1-й пар отсутствуют. На теле две пары боковых плавников, имеющих в основании МЖС. Мерцательная петля располагается на уровне или впереди уровня глаз. Часть мерцательной петли, располагающаяся на туловище, всегда короче ее головной части. Лучи в плавниках обязательно имеются, но присутствуют и безлучевые зоны; у некоторых видов в безлучевых зонах могут быть продольные структуры. Плавники 2-й пары располагаются более на туловищном, чем на хвостовом отделе. Кишечные выросты на средней кишке отсутствуют. Пигмент в глазах имеется. Тело всех видов прозрачно, у большинства видов оно вялое, обвисает на пинцете, за что род и получил название «вялый», «слабый». Продольная мускулатура развита слабо, боковые поля широкие. 1-я пара рядов зубчиков у некоторых видов может полностью редуцироваться у взрослых экземпляров.

В мировой фауне известно 6 видов: *F. hexaptera* [18], *F. inflata* [22], *F. pulchella* [21], *F. lucida* [23], *F. adenensis* [23], *F. yamato* sp. nov.

Ключ для определения видов *Flaccisagitta*

- 1 (2) Плавники 1-й пары длиннее плавников 2-й пары *F. lucida* (2)
- 2 (1) Плавники 1-й пары короче плавников 2-й пары..... (3)
- 3 (8) Плавники 1-й пары длиннее части плавников 2-й пары, расположенных на туловищном отделе (4)

- 4 (5) Семенные пузырьки удалены от хвостового плавника на расстояние, равное длине самого пузырька.....*F. adenensis* (6)
 5 (4) Семенные пузырьки приближены к хвостовому плавнику на расстояние короче пузырька.....(6)
 6 (7) Семенные пузырьки округлые, приближены к хвостовому плавнику на расстояние, которое меньше длины самого пузырька в 5–7 раз. Лучи располагаются только по краям плавников..... *F. inflata*
 7 (6) Семенные пузырьки плоские, удлинено-овальные, касаются хвостового плавника. Лучи не располагаются по краям плавников, но только на теле.....*F. yamato* sp. nov (8)
 8 (3) Плавники 1-й пары короче или равны части плавников 2-й пары, расположенных на туловищном отделе(9)
 9 (10) Плавники 1-й пары короче части плавников 2-й пары, расположенных на туловищном отделе*F. hexaptera*
 10 (9) Плавники 1-й пары равны части плавников 2-й пары, расположенных на туловищном отделе*F. pulchella*

Flaccisagitta yamato sp. nov. (рис. 2–6)

Материал находится в хранилище планктонных проб лаборатории исследования загрязнений океана и экологии ТОИ ДВО РАН, к. 120. Полка № 8 (голотип FSH N 1. 66. 2014) + четыре половозрелых паратипа из одной и той же пробы планктона.

Голотип выделен из пробы, взятой 22.04.2014 г. в 22:00 на станции 12 с координатами 39°59,93' с. ш. и 134°03,29' в. д.

Диагноз. Тело немускулистое, вялое, прозрачное. Боковые поля широкие, желеобразные структуры присутствуют как на туловищном, так и на хвостовом отделах. Мерцательная петля короткая, начинается впереди глаз, от мозга, располагается только на голове. Парные кишечные выросты на средней кишке отсутствуют. Короткие лучи имеются только на теле, по внутренним краям боковых и хвостового плавников; наружные края – безлучевые. Экземпляр на 3-й стадии половой зрелости.

Описание голотипа. Длина тела 16,25 мм. Длина хвостового отдела составляет 16,6 %, а длина брюшного ганглия – около 7% от длины тела. Передний конец плавников 1-й пары удален от заднего конца брюшного ганглия на расстояние, которое слегка короче длины ганглия. Плавники 1-й пары составляют около 17,5% от длины тела, немного короче плавников 2-й пары (примерно в 1,3 раза), но длиннее части плавников 2-й пары, лежащей на туловищном отделе (примерно в 1.1 раза). Промежуток между плавниками 1-й и 2-й пар длиннее (в 1,2 раза), чем промежуток между брюшным ганглием и плавниками 1-й пары. Плавники 2-й пары составляют 23% от длины тела. Часть плавников 2-й пары, лежащей

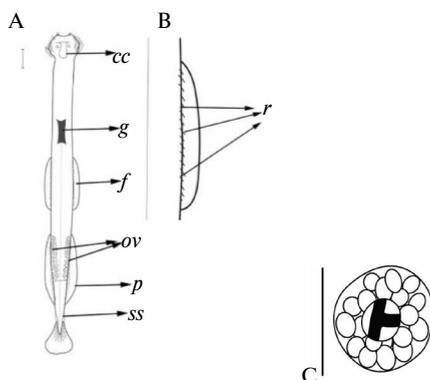


Рис. 2. А – общий вид экземпляра *F. yamato* sp. nov: голотип, схема (cc – мерцательная петля, f – передний плавник, g – брюшной ганглий, ov – яичники, p – задний плавник, ss – семенной пузырек). Шкала: 1 мм. В – участок тела с передним плавником, увеличен в 1.5 раза: голотип, *F. yamato* sp. nov: схема (r – лучи). С – схема глаза. Шкала: 0.1 мм

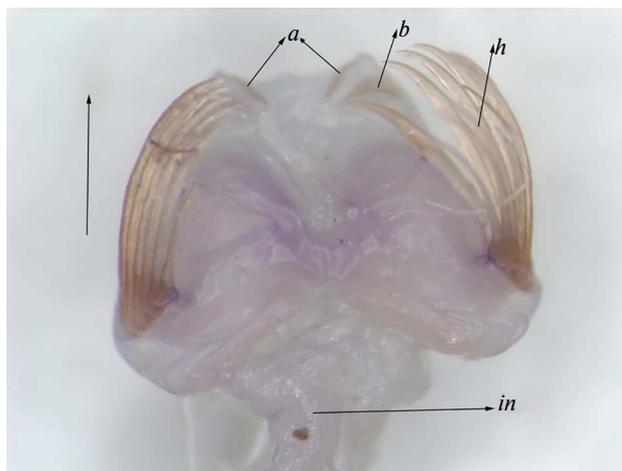


Рис. 3. Голова с вентральной стороны: голотип, *F. yamato* sp. nov.: голотип, фото (*a* – передние зубчики, *b* – задние зубчики, *h* – щетинки, *in* – кишечник). Шкала: 0.5 мм

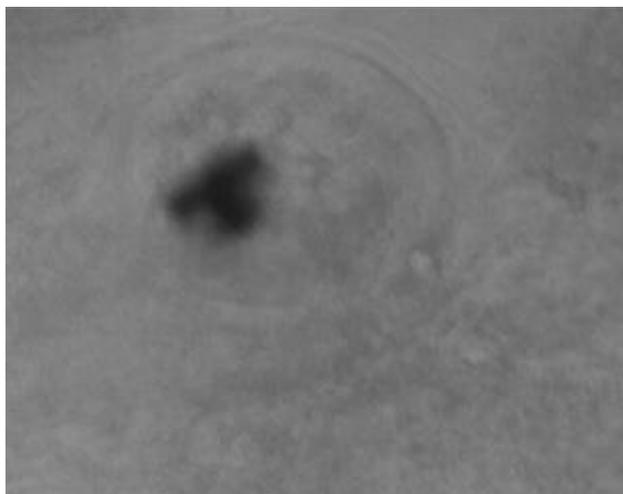


Рис. 4. Глаз *F. yamato* sp. nov.: голотип, фото

на туловищном отделе, значительно длиннее части плавников 2-й пары, лежащей на хвостовом отделе (примерно в 1,9 раза). Короткие лучи имеются только по внутренним краям боковых и хвостового плавников; наружные края безлучевые. 2 пары рядов зубчиков; в каждом ряду по 7 передних и по 6 задних зубчиков, щетинок по 9. Альвеолярная ткань отсутствует. Семенники занимают всю полость хвостового отдела. Семенные пузырьки довольно крупные, удлинненно-овальные, соприкасаются с хвостовым плавником и удалены от боковых плавников. Яичники достигают переднего конца задних плавников, часть яиц мелкие, незрелые. Глаза содержат темный пигмент Т-образной формы.

Дифференциальный диагноз. От близкого вида *F. hexaptera* отличается рядом признаков. Наиболее заметное отличие состоит в распределении боковых плавников – плавники первой пары у *F. hexaptera* удалены от брюшного ганглия значительно дальше, чем таковые у *F. yamato* sp. nov. (на расстояние в 5–6 раз длиннее ганглия). Еще одно заметное отличие – плавники второй пары у *F. hexaptera* относительно короче, чем таковые у *F. yamato* sp. nov. Другие отличия: мерцательная петля *F. yamato* sp. nov. располагается только на голове, а у *F. hexaptera* – значительная ее часть на туловище. Семенные пузырьки *F. hexaptera*



Рис. 5. Общий вид экземпляра *F. yamato* sp. nov.: голотип, фото. Шкала: 1 мм

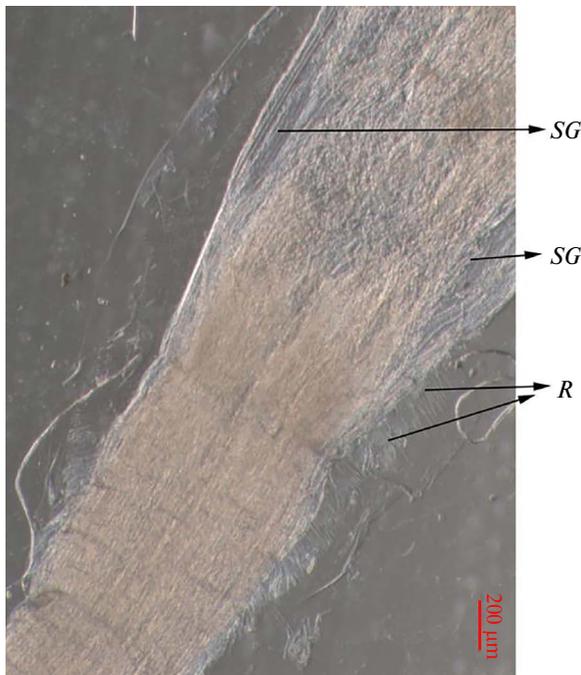


Рис. 6. Участок тела с задними плавниками *F. yamato* sp. nov.: голотип, фото (*R* – лучи, *SG* – железобразные структуры). Шкала: 1 мм

довольно мелкие, не соприкасаются с хвостовым плавником и удалены от боковых плавников, а у *F. yamato* sp. nov. более длинные семенные пузырьки соприкасаются с хвостовым плавником. Этой особенностью расположения семенных пузырьков *F. yamato* sp. nov. отличается также от видов *F. lucida* и *F. adenensis*, а от *F. lucida* еще длиной плавников 1-й пары относительно плавников 2-й пары.

От широко распространенного вида *F. inflata* отличается следующими признаками. Наиболее заметный – семенники *F. yamato* sp. nov. распространяются по всей полости хвостового отдела, тогда как у *F. inflata* они компактно занимают только задний конец отдела. Форма семенных пузырьков различна (у *F. inflata* они выпуклые, округлые, не со-

прикасаются с хвостовым плавником, а у *F. yamato* sp. nov. – плоские, удлинненно-овальные, соприкасаются с ним).

Лучи *F. yamato* sp. nov. занимают внутреннюю зону плавника, соприкасаясь с туловищем, а лучи видов: *F. hexaptera* и *F. inflata* занимают краевую зону, чем отличаются от нового вида.

От вида *F. adenensis* отличается расположением семенных пузырьков: они удалены от хвостового плавника на расстояние, равное длине самого пузырька, а у *F. yamato* sp. nov. тесно соприкасаются с хвостовым плавником.

Распространение. Центральная часть Японского моря. Глубина от возвышенности Ямато до поверхности моря: 560–0 м (39°59,93' с. ш. и 134°03,29' в. д.).

Этимология: *yamato*. В честь возвышенности Ямато.

Обсуждение

Исследование фауны щетинкочелюстных Японского моря и сопредельных вод Охотского моря показало, что *F. yamato* sp. nov. имеет ограниченное распространение: исключительно в водах центральной части Японского моря над возвышенностью Ямато. Этот вид не был обнаружен в прибрежных водах залива Петра Великого, одного из самых исследованных в отношении планктона районов Японского моря [4]. В водах Корейского полуострова *F. yamato* sp. nov. также не был обнаружен многочисленными и многолетними исследованиями [5]. по результатам работ японских авторов *F. yamato* sp. nov. не был отмечен и в водах, прилегающих к Японии [1, 2].

Загадочная находка нового для науки вида может иметь объяснение только с точки зрения гидрологии района. Общеизвестно, что планктонные организмы не способны к самостоятельным большим перемещениям в пространстве и поэтому являются прекрасным биоиндикатором водных масс и течений. Следовательно, обнаружение нового вида в районе подводной возвышенности Ямато может быть связано с особенностями циркуляции вод в центральной части Японского моря.

Схема поверхностной циркуляции Японского моря довольно хорошо изучена [5, 7, 8, 24, 25]. Она определяется потоком вод Цусимского течения, поступающих в море с юга (рис. 1) и разделяющихся на три основные ветви: прибрежную и морскую ветви Цусимского течения, следующие на восток и северо-восток вдоль Японии, и Восточно-Корейское течение, направленное на север вдоль Корейского полуострова и отворачивающее на восток в районе 37–38° с. ш., огибая подводную возвышенность Ямато и соединяясь с Цусимским течением на противоположном краю моря. Эту часть также называют Субполярным фронтальным течением, так как оно проходит вдоль субполярного (субарктического) фронта, разделяющего южную теплую субтропическую часть Японского моря, сформированную поступлением вод Цусимского течения, и северную холодную субарктическую часть моря, находящуюся под влиянием интенсивного зимнего конвективного перемешивания [7, 8]. В северной части моря существует крупномасштабный циклонический круговорот, северо-западной периферией которого являются холодные Приморское и Северо-Корейское течения (рис. 1).

Субполярный фронт располагается над северной частью возвышенности Ямато. С запада на восток здесь переносятся воды продолжения Восточно-Корейского течения или Субполярного фронтального течения. Благодаря формированию вихрей синоптического масштаба часто захватываемых топографическими особенностями возвышенности Ямато и стационарирующихся над ней [9, 10, 25, 26] сюда попадают воды морской ветви Цусимского течения с юга и юго-востока [27, 28], а также субарктические воды с севера. Таким образом, над возвышенностью Ямато могут формироваться особые океанографические условия, которые и могут стать причиной обнаружения здесь нового вида щетинкочелюстных.

Рассмотрим гидрологическую обстановку в период проведения экспедиционного рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев» № 66, в котором были отобраны пробы нового вида. На рис. 7, а представлено распределение температуры воды в Японском море на горизонте 50 м в период 21–30 апреля 2014 г., когда проводились экспедиционные работы. Звездочкой обозначена станция 12, где был обнаружен новый вид. Станция находится непосредственно в зоне субполярного фронта, проходящего примерно вдоль 40° с. ш.

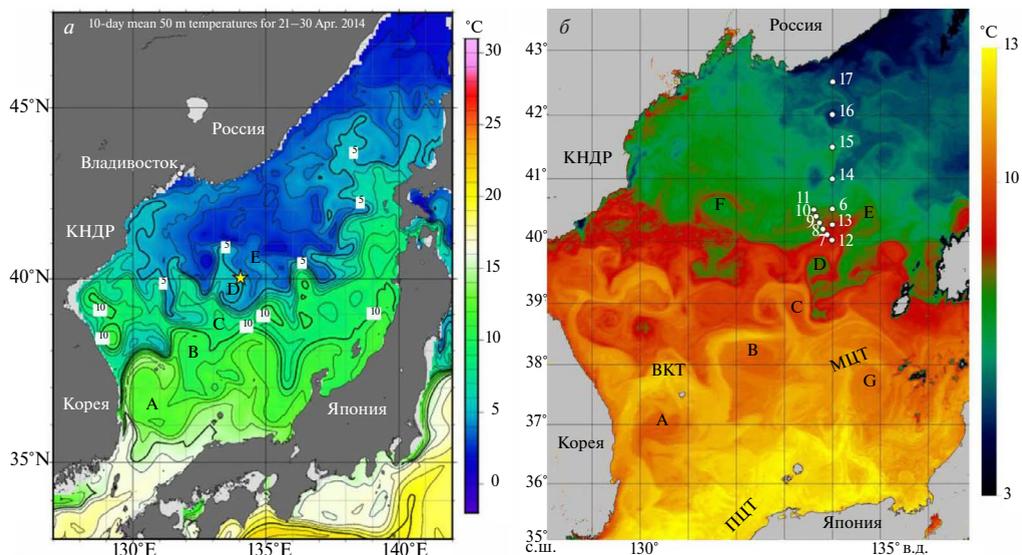


Рис. 7. Распределение температуры воды на горизонте 50 м за период 21–30.04.2014 г. (JMA, 2024) (а). б – инфракрасное изображение с ИСЗ NOAA-16 (n60067) за 25.04.2014 г. Точками показано положение и номера океанографических станций 6–17, выполненных НИС «Академик М.А. Лаврентьев» 21–24.04.2014 г. А–Г – теплые антициклонические вихри. Серый тон соответствует суше и облачности. Остальные обозначения см. на рис. 1

и разделяющего холодные воды северной части моря ($<5\text{ }^{\circ}\text{C}$) и более теплые воды южной части ($>10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Станция расположена на краю теплого антициклонического вихря D размером 50–70 км, находящегося над северной возвышенностью Ямато. На юго-восток от него можно заметить цепочку из трех более крупных антициклонических теплых вихрей А–С, протянувшихся от южной части Корейского полуострова к возвышенности Ямато. по распределению температуры видно, что наиболее теплые воды ($>12\text{ }^{\circ}\text{C}$) переносятся Восточно-Корейским течением и отворачивают от Корейского полуострова на восток около 37° с. ш., вовлекаясь в вихрь А и далее в вихрь В.

Инфракрасное спутниковое изображение для этого же периода времени (25.04.2014 г.) дает более детальную картину распределения температуры воды на поверхности и структуры поля течений (рис. 7, б). Распространяясь по периферии вихрей А, В и С, воды Восточно-Корейского течения (ВКТ) достигают района Ямато. Далее воды фронтальной зоны вовлекаются в вихрь D и расположенный северо-восточнее вихрь E. На рис. 7 нанесено положение станций океанографической съемки НИС «Академик М.А. Лаврентьев» 21–24 апреля 2014 г. Видно, что станция 12, на которой был обнаружен голотип, находится в области струи теплых вод на периферии вихря D, распространяющихся в вихрь E.

Рассматриваемое изображение (рис. 7, б) подтверждает изобилие вихрей синоптического масштаба в Японском море, отмечавшееся во многих исследованиях [9, 10, 25, 28, 29]. Кроме указанной выше цепочки вихрей (А–Е) на снимке заметно большое количество антициклонов размером 50–100 км. Примером может служить вихрь F, расположенный к северу от фронта и выносящий по своей периферии струю теплой воды на север в субарктическую зону. Такого же размера антициклонические вихри прослеживаются к северу от вихрей А, В и С, а также к северу от вихря E над областью Центральной котловины моря.

Через цепочки вихрей происходит быстрый перенос вод на значительные расстояния. В зависимости от расположения интенсивных вихрей в конкретный момент времени может меняться картина течений. Это отмечалось, например, в работе [27] при анализе поступления вод из южной части моря далеко на север, в район Дальневосточного морского заповедника в заливе Петра Великого.

В нашем случае видно, что, например, антициклон G, расположенный в южной части моря, отклоняет часть вод прибрежной ветви Цусимского течения (ПЦТ) на север и далее

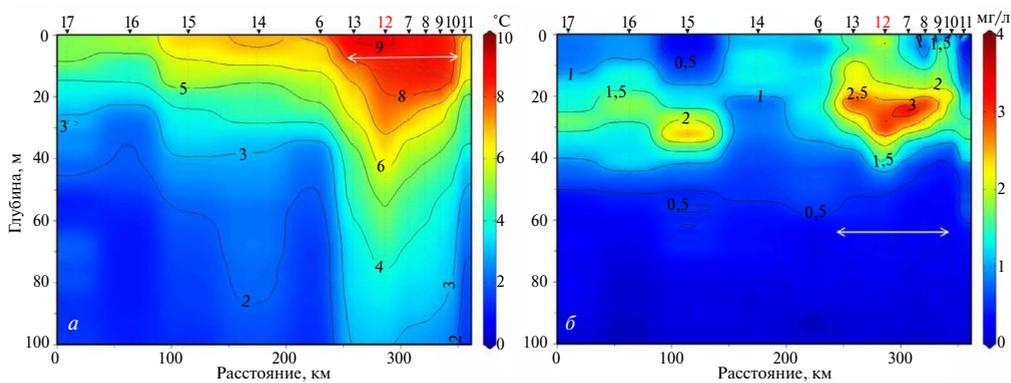


Рис. 8. Распределение температуры воды (а) и содержания хлорофилла-а (б) на разрезе, выполненном НИС «Академик М.А. Лаврентьев» 21–24.04.2014 г. На верхней оси указано положение и номера океанографических станций

эти воды поступают в вихри С и D. Таким образом, через цепочку вихрей субтропическая вода поступает в район возвышенности Ямато с юга.

Кроме того, вихри переносят в своих ядрах захваченную при формировании водную массу [26, 29, 30]. Антициклоны субарктической области формируются в западной части района, у побережья КНДР [10, 29] и перемещаются на восток, перенося с собой захваченную воду северо-западной части моря. Таким образом, стационарирование вихрей над возвышенностью Ямато и струйный перенос водных масс с запада, юга и севера формируют здесь особенные гидролого-гидрохимические условия.

На рис. 8 приведено вертикальное распределение температуры воды и содержания хлорофилла-а по данным судовой СТД-съемки на разрезе вдоль меридиана 134 в.д. между станциями 17–12 и далее через область теплых вод между станциями 7–11 (рис. 7, б). Струя теплых вод шириной около 100 км распространяется по границе субполярного фронта между станциями 6 и 10 и прослеживается до глубин более 100 м. Она располагается над вершиной возвышенности Кита-Ямато. В распределении хлорофилла-а отчетливо виден максимум на горизонтах 20–35 м именно в этой области, превышающий 2,5–3,0 мг/л. Это указывает на повышенное содержание фитопланктона, что может обуславливать и повышенную концентрацию щетинкочелюстных.

Таким образом, за счет вихревой динамики вод над возвышенностью Ямато формируются особые океанографические условия, которые и могут быть причиной обнаружения здесь нового вида щетинкочелюстных.

Заключение

В результате экспедиционных исследований ТОИ ДВО РАН в центре Японского моря над подводной возвышенностью Ямато был обнаружены щетинкочелюстные (*Chaetognatha*, *Sagittoidea*). Изучение анатомии экземпляров привело к заключению, что это новый для фауны щетинкочелюстных вид. Наличие желеобразных структур (*Sa-like gelatinous structures*, SG) показывает их принадлежность к подсемейству *Flaccisagittinae*. Признаками нового вида являются распределение плавников на SG/S/, форма мерцательной петли, расположение лучевых структур на теле и семенных пузырьков относительно хвостового плавника.

Проведенный анализ спутниковых изображений и результатов судовых СТД-измерений показывает, что в районе банки Ямато формируется особая циркуляция вод, обусловленная частым присутствием здесь вихрей синоптического масштаба. Взаимодействие между вихрями и струйный перенос вод по цепочке вихрей может формировать особые гидрологические условия в районе возвышенности Ямато, что может служить причиной находки нового вида щетинкочелюстных именно в этом районе.

Биоиндикация на основе изучения видового состава требует тщательного морфологического анализа и знания фауны Мирового океана. Таксономическое изучение находок новых видов, их сравнение с видами, обитающими в Мировом океане, не только расширяет наши знания о биоразнообразии водной толщи, но также представляет определенный интерес в изучении глобальных изменений в океане. Японское море с сопредельными водами достаточно хорошо изучено относительно фауны щетинкочелюстных. Тем не менее находка нового вида может служить индикатором и своеобразной подсказкой к пониманию происходящих изменений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nagai N., Tadokoro K., Kuroda K., Sugimoto T. Chaetognath species-specific responses to climate regime shifts in the Tsushima Warm Current of the Japan Sea // *Plankton Benthos Res.* 2008. Vol. 3. P. 86–95.
2. Kitou M. Chaetognaths collected on the fifth cruise of the Japanese Expedition of deep seas // *La Mer.* 1966. Vol. 4. P. 169–177.
3. Choo S., Jeong M.-K., Soh H.Y. Taxonomic reassessment of chaetognaths (Chaetognatha, Sagittoida, Apheroglossa) from Korean waters // *ZooKeys.* 2022. Vol. 1106. P. 165–211. <https://doi.org/10.3897/zookeys.1106.80184>.
4. Касаткина А.П., Столярова М.В. Морфология, систематика, экология щетинкочелюстных Японского моря и сопредельных акваторий. Владивосток: Дальнаука, 2010. 200 с.
5. Park K.-A., Park J.-E., Choi B.-J., Byun D.-S., Lee E.-I. An oceanic current map of the East Sea for science textbooks based on scientific knowledge acquired from oceanic measurements // *J. Korean Soc. Oceanogr.* 2013. Vol. 18, No. 4. P. 234–265.
6. Зенкевич Н.Л., Медведев В.С., Скорнякова Н.С. Основные черты геологии и гидрологии Японского моря / отв. ред. В.Н. Степанов. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 224 с.
7. Preller R.H., Hogan P.J. Oceanography of the Sea of Okhotsk and the Japan/East Seas // *The Sea/Ed. by A.R. Robinson and K.H. Brink. John Wiley and Sons Inc., 1998. Vol. 11. P. 429–481.*
8. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / ред. А.С. Васильев, А.Н. Косарев, Ф.С. Терзиев. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. 394 с.
9. Morimoto A., Yanagi T., Kaneko A. Eddy field in the Japan Sea derived from satellite altimetric data // *J. Oceanogr.* 2000. Vol. 56. P. 449–462.
10. Жабин И.А., Дмитриева Е.В., Таранова С.Н., Лобанов В.Б. Циркуляция вод и мезомасштабные вихри в Японском море по данным спутниковой альтиметрии // *Исследование Земли из Космоса.* 2023. № 6. С. 52–72.
11. Kassatkina A.P. New species of the genus *Sagitta* s. str. (Chaetognatha) from the Sea of Japan with the original methods of the coloring and dissection technique // *Zoosystematica Rossica.* 2008. Vol. 17, No. 1. P. 3–6.
12. Schlitzer, 2019. Ocean data view. URL: <http://odv.awi.de> (date of application: January 20, 2025).
13. Касаткина А.П. Новые виды *Aidano sagitta* из северо-западной части Японского моря // *Биол. моря.* 2007. Т. 33, № 4. С. 272–277.
14. Tokioka T. The taxonomical outline of Chaetognatha // *Publ. Seto Mar. Biol. Lab.* 1965. Vol. 12, No. 5. P. 335–357.
15. Germain L., Joubin L. Chaetognathes // *Prince Albert Result. Camp. Sci.* 1916. Vol. 49. P. 1–118.
16. Касаткина А.П. Новые неритические щетинкочелюстные из залива Посыета Японского моря // *Исследование фауны морей.* 1971. Т. 8. С. 265–294.
17. Касаткина А.П. Находка новых видов бесплавниковых Sagittidae (Chaetognatha) в северо-западной части Японского моря // *Биол. моря.* 2006. Т. 32, № 6. С. 419–420.
18. Orbigny A.D., d. Mollusken // *In Voyage dans l’Amerique meridionale. 1834–1835. 1843. Bd. 5, Teil 3. S. 1–140.*
19. Ritter-Záhony R. Revision der Chaetognathen // *Deutsche Südpolar Expedition. 1911. Bd. 13, Zool. 5. S. 1–71.*
20. Ritter-Záhony R. Chaetognatha // *Ergebnisse der Plankton Expedition der Humboldt Stiftung. 1911. Bd. 2, No. 25. S. 1–33.*
21. Касаткина А.П. Щетинкочелюстные морей СССР и сопредельных вод. Л.: Наука, 1982. 136 с.

22. Grassi B. Chaetognati // Fauna, Flora Neapoli. 1883. Vol. 5. P. 1–145.
23. Casanova J.-P. *Sagitta lucida* et *Sagitta adenensis*. Chaetognathes mesoplanctoniques nouveaux du nord-ouest de l’océan Indien // Rev. Inst. Pêches marit. 1983–1985. Vol. 47 (1 et 2). P. 25–35.
24. Яричин В.Г. Состояние изученности циркуляции вод Японского моря // Труды ДВНИГМИ. 1980. Т. 80. С. 46–61.
25. Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Riser S.C., Kim K., Takematsu M., Yoon J.-H. A history of physical oceanographic research in the Japan/East Sea // Oceanography. 2006. Vol. 19, No. 3. P. 18–31.
26. Isoda Y., Naganobu M., Watanabe H., Nukata K. Horizontal and vertical structures of a warm eddy above the Yamato Rise // Umi no Kenkyu. 1992. Vol. 1. P. 141–151 (In Japanese with English abstract).
27. Никитин А.А., Лобанов В.Б., Данченков М.А. Возможные пути переноса теплых субтропических вод в район Дальневосточного морского заповедника // Изв. ТИНРО. 2002. Т. 131. С. 41–53.
28. Никитин А.А., Данченков М.А., Лобанов В.Б., Юрасов Г.И. Новая схема поверхностной циркуляции Японского моря с учетом синоптических вихрей // Изв. ТИНРО. 2009. Т. 157. С. 158–167.
29. Лобанов В.Б., Пономарев В.И., Салюк А.Н., Тищенко П.Я., Тэлли Л.Д. Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // Дальневосточные моря России. Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 450–473.
30. Gordon A.L., Giulivi C.F., Lee C. M., Bower A, Furey H.H., Talley L.D. Japan/East Sea intra-thermocline eddies // J. Phys. Oceanogr. 2002. Vol. 32, No. 6. P. 1960–1974.

REFERENCES

1. Nagai N., Tadokoro K., Kuroda K., Sugimoto T. Chaetognath species-specific responses to climate regime shifts in the Tsushima Warm Current of the Japan Sea. *Plankton Benthos Res.* 2008;3:86–95.
2. Kitou M. Chaetognaths collected on the fifth cruise of the Japanese Expedition of deep seas. *La Mer.* 1966;4:169–177.
3. Choo S., Jeong M.-K., Soh H.Y. Taxonomic reassessment of chaetognaths (Chaetognatha, Sagittoidea, Aphragmophora) from Korean waters. *ZooKeys.* 2022;1106:165–211. <https://doi.org/10.3897/zookeys.1106.80184>.
4. Kasatkina A.P., Stolyarova M.V. Морфология, систематика, экология шхетинкочелюстных Японского моря и сопредельных акваторий = [Morphology, systematic, ecology of bristle-jaws of the Japan Sea and adjacent regions]. Vladivostok: Dal'nauka; 2010. 200 p. (In Russ.).
5. Park K.-A., Park J.-E., Choi B.-J., Byun D.-S., Lee E.-I. An Oceanic Current Map of the East Sea for Science Textbooks Based on Scientific Knowledge Acquired from Oceanic Measurements. *J. Korean Soc. Oceanogr.* 2013;18(4):234–265.
6. Zenkevich N.L., Medvedev V.S., Skorniyakova N.S. Main features of the geology and hydrology of the Sea of Japan. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Sciences; 1961. 224 p. (In Russ.).
7. Preller R.H., Hogan P.J. Oceanography of the Sea of Okhotsk and the Japan/East Seas. In: *The Sea*. John Wiley and Sons Inc.; 1998. Vol. 11. P. 429–481.
8. Vasil'yev A.S., Kosarev A.N., Terziyev F.S. (Eds.) Гидрометеорология и гидрохимия моря. Т. 8. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. St. Petersburg: Гидрометеоиздат, 2003. 394 p. = [Hydro meteorology and hydrochemistry of the seas. Vol. 8, Sea of Japan. Part 1. Hydro meteorological conditions]. St. Petersburg: Гидрометеоиздат; 2003. 394 p. (In Russ.)
9. Morimoto A., Yanagi T., Kaneko A. Eddy field in the Japan Sea derived from satellite altimetric data. *J. Oceanogr.* 2000;56:449–462.
10. Zhabin I.A., Dmitriyeva Ye.V., Taranova S.N., Lobanov V.B. Tsirkulyatsiya vod i mezomasshtabnyye vikhri v Yaponskom more po dannym sputnikovoy al'timetrii = [Water circulation and mesoscale eddies in the Sea of Japan based on satellite altimetry data]. *Earth Research from Space.* 2023;(6):52–72. (In Russ.).
11. Kassatkina A.P. New species of the genus *Sagitta* s. str. (Chaetognatha) from the Sea of Japan with the original methods of the coloring and dissection technique. *Zoosystematica Rossica.* 2008;17(1):3–6.
12. Schlitzer, 2019. Ocean data view. URL: <http://odv.awi.de> (date of application: January 20, 2025).
13. Kassatkina A.P. New species of *Aidanosagitta* from the northwestern part of the Sea of Japan. *Biol. Morya* (English translation: *Russ. J. Mar. Biol.*). 2007;33(4):272–277. (In Russ.).
14. Tokioka T. The taxonomical outline of Chaetognatha. *Publ. Seto Mar. Biol. Lab.* 1965;12(5):335–357.
15. Germain L., Joubin L. Chaetognathes. *Prince Albert Result. Camp. Sci.* 1916;49:1–118.

16. Kasatkina A.P. Novyye neriticheskiye shchetinkochelyustnyye iz zaliva Pos'yeta Yaponskogo morya = [New neritic species of chaetognaths from the Posjet Bay, the Sea of Japan]. *Issledovaniye Fauny Morey*. 1971;8:265–294 (In Russ.).
17. Kassatkina A.P. Finding of new species of finless sagittids (Sagittidae: Chaetognatha) in the north-western Sea of Japan. *Biol. Morya*. 2006;32(6):415–420. (In Russ.; English translation: *Russ. J. Mar. Biol.* 32(6):353–359).
18. Orbigny A.D., d. Mollusken. In: Voyage dans l’Amerique meridionale. 1834–1835. 1843. Bd. 5, Teil 3. S. 1–140.
19. Ritter-Záhony R. Revision der Chaetognathen. *Deutsche Südpolar Expedition*. 1911;13(5):1–71.
20. Ritter-Záhony R. Chaetognatha. In: Ergebnisse der Plankton Expedition der Humboldt Stiftung. 1911. Bd. 2, No. 25. S. 1–33.
21. Kassatkina A.P. Khetognaty morey SSSR i sopredel’nykh vod = [Chaetognaths of the USSR seas and adjacent waters]. Leningrad: Nauka; 1982. 136 s. (In Russ.).
22. Grassi B. Chetognati. *Fauna, Flora Neapoli*. 1883;5:1–145.
23. Casanova J.-P. *Sagitta lucida* et *Sagitta adenensis*. Chaetognathes mesoplanctoniques nouveaux du nord-ouest de l’océan Indien. *Rev. Inst. Peches Marit.* 1983–1985;47(1 et 2):25–35.
24. Yarichin V.G. Sostoyaniye izuchennosti tsirkulyatsii vod Yaponskogo moray = [State of knowledge of the water circulation of the Sea of Japan]. *Proceedings of DVNIGMI*. 1980;80:46–61. (In Russ.).
25. Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Riser S.C., Kim K., Takematsu M., Yoon J.-H. A history of physical oceanographic research in the Japan/East Sea. *Oceanography*. 2006;19(3):18–31.
26. Isoda Y., Naganobu M., Watanabe H., Nukata K. Horizontal and vertical structures of a warm eddy above the Yamato Rise. *Umi no Kenkyu*. 1992;1:141–151. (In Japanese with English abstract).
27. Nikitin A.A., Lobanov V.B., Danchenkov M.A. Vozmozhnyye puti perenosa teplykh subtropicheskikh vod v rayon Dal’nevostochnogo morskogo zapovednika = [Possible routes of transfer of warm subtropical waters to the area of the Far Eastern Marine Reserve]. *Izvestiya TINRO* (Pacific Research Fisheries Center). 2002;131:41–53 (In Russ.).
28. Nikitin A.A., Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Yurasov G.I. Novaya skhema poverkhnostnoy tsirkulyatsii Yaponskogo morya s uchedom sinopticheskikh vikhrey = [New scheme of surface circulation of the Sea of Japan taking into account synoptic eddies]. *Izvestiya TINRO* (Pacific Research Fisheries Center). 2009;157:158–167. (In Russ.).
29. Lobanov V.B., Ponomarev V.I., Salyuk A.N., Tishchenko P.YA., Telli L.D. Struktura i dinamika sinopticheskikh vikhrey severnoy chasti Yaponskogo morya = [Structure and dynamics of synoptic eddies in the northern part of the Sea of Japan]. In: Far Eastern Seas of Russia. Oceanological studies. Moscow: Nauka; 2007. P. 450–473. (In Russ.).
30. Gordon A.L., Giulivi C.F., Lee C. M., Bower A, Furey H.H., Talley L.D. Japan/East Sea Intra-thermocline eddies. *J. Phys. Oceanogr.* 2002;32(6):1960–1974.

Научная статья
УДК 551.551.3:551.509.329
DOI: 10.31857/S0869769825020079
EDN: GESPXW

Анализ данных самолетных наблюдений за атмосферной турбулентностью над Восточной Сибирью и Дальним Востоком

Е.М. Вербицкая[✉], З.В. Вербицкая, С.О. Романский

Евгения Митрофановна Вербицкая

кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник
Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, Владивосток, Россия
werbaem@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-5776-9736>

Зинаида Викторовна Вербицкая

младший научный сотрудник
Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, Владивосток, Россия
derez@ya.ru

Станислав Олегович Романский

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, Владивосток, Россия
khvrom@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6613-6881>

Аннотация. В статье представлен анализ данных самолетных наблюдений за атмосферной турбулентностью над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока с января 2020 г. по июль 2024 г. Рассмотрено распределение данных о турбулентности по сезонам года, географическим районам, вертикальным слоям и интенсивности. Получено, что наибольшее количество сообщений о турбулентности поступает с уровней, относящихся к верхней тропосфере. Сообщения из нижней тропосферы относятся в основном к планетарному пограничному слою и содержат информацию только об умеренной и сильной турбулентности преимущественно в окрестности крупных аэродромов. Обсуждается возможность определения типа наблюдаемой турбулентности по данным самолетных сообщений в совокупности с данными наземных и космических наблюдений с целью совершенствования методов прогнозирования турбулентности, опасной для авиационных полетов, по данным численных моделей прогноза погоды.

Ключевые слова: механическая турбулентность, термическая турбулентность, турбулентность в нижних уровнях, метеорологические прогнозы для авиации, Дальний Восток

Для цитирования: Вербицкая Е.М., Вербицкая З.В., Романский С.О. Анализ данных самолетных наблюдений за атмосферной турбулентностью над Восточной Сибирью и Дальним Востоком // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 90–101. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020079>

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы 1.4.4.2 Плана научно-исследовательских и технологических работ Росгидромета на 2020–2024 годы.

Original article

Analysis of the aircraft observations related to atmospheric turbulence in Eastern Siberia and Russian Far East

E.M. Verbitskaya, Z.V. Verbitskaya, S.O. Romanskiy

Eugenia M. Verbitskaya

Candidate of Sciences in Geography, Leading Researcher
Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia
werbaem@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-5776-9736>

Zinaida V. Verbitskaya

Junior Researcher
Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia
derez@ya.ru

Stanislav O. Romanskiy

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Senior Researcher
Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia
khvrom@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6613-6881>

Abstract. In the article, analysis of aircraft observations for atmospheric turbulence on the territories of Eastern Siberia and Russian Far East from January, 2020 to July, 2024 is presented. Observations have been divided by seasons, geographical areas, vertical layers and intensity. The majority of turbulence observations reported from the layers of the upper part of troposphere. Turbulence observations, in the lower part of troposphere, principally, fixed in the planetary boundary layer and showed moderate and severe turbulence near main airports of the region under consideration. Possibility to define type of turbulence based on aircraft, surface and satellite observations and numerical modeling is discussed.

Keywords: mechanical turbulence, thermal turbulence, low-level turbulence, meteorological forecasts for aviation, Far East

For citation: Verbitskaya E.M., Verbitskaya Z.V., Romanskiy S.O. Analysis of the aircraft observations related to atmospheric turbulence in Eastern Siberia and Russian Far East. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2): 90–101. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020079>

Funding. The work is supported as a part of the theme 1.4.2.2 of the Plan of research and technological works of Roshydromet for 2020–2024.

Введение

Прогнозирование местоположения, продолжительности и интенсивности атмосферной турбулентности имеет существенное значение для обеспечения безопасности авиационных полетов. Разработкой методов и технологий прогноза атмосферной турбулентности

различной природы, опасной для авиационных полетов, над Восточной Сибирью и Дальним Востоком России и прилегающими территориями (в том числе над акваториями дальневосточных морей) занимается ФГБУ «Дальневосточный научно-исследовательский региональный гидрометеорологический институт» (ДВНИГМИ) [1] на базе численной атмосферной модели Weather Research and Forecasting (WRF) с динамическим ядром Advanced Research WRF (WRF-ARW) [2]. Такие работы особенно актуальны, с учетом полного отсутствия специальных разработок этого направления для рассматриваемой территории в отечественной и тем более зарубежной практике.

Прогнозы турбулентности в верхней тропосфере (турбулентность ясного неба – ТЯН) выпускаются зональными центрами по данным глобальных моделей зарубежных метеорологических центров Вашингтон (США), Лондон (Великобритания) на стандартных изобарических поверхностях с достаточно большим горизонтальным шагом сетки (1,25°, что составляет около 125–140 км в средних широтах). Для больших высот такое разрешение можно считать удовлетворительным.

Для прогноза турбулентности в нижней тропосфере (в нижних уровнях), особенно в пограничном слое атмосферы, необходимо существенно более детальное пространственное разрешение сетки прогностической модели, как по горизонтали, так и по вертикали. Кроме того, необходимо достаточно подробное описание рельефа подстилающей поверхности. Для территории Восточной Сибири и Дальнего Востока прогнозирование турбулентности в нижних уровнях особенно важно в связи с интенсивным использованием легких воздушных судов, которые летают на относительно небольших высотах, в условиях практически полного отсутствия других видов транспорта между населенными пунктами в труднодоступной местности.

Для производства таких прогнозов необходимо иметь результаты расчетов системы численного прогноза погоды (ЧПП) высокого пространственного разрешения. В настоящее время в качестве базовой модели ЧПП в Дальневосточном регионе России используется модель WRF-ARW на сетках различного пространственного разрешения.

В средней и верхней тропосфере подробное горизонтальное разрешение модели тоже имеет важное значение, поскольку в расчете широко применяемых индексов [3, 4], по значениям которых определяют наличие и интенсивность турбулентных пульсаций, участвуют пространственные производные скорости ветра. При этом масштабы турбулентных вихрей, влияющих на болтанку воздушных судов, находятся в пределах от десятков метров до нескольких километров [4]. Необходимо также и хорошее вертикальное разрешение модели, так как наиболее существенным фактором возникновения ТЯН является вертикальный сдвиг горизонтального ветра [4, 5].

Основным фактором, определившим проведение исследования, является задача разработки отечественных технологий прогноза опасных для авиации явлений погоды, как для территории России в целом, так и для отдельных ее регионов, в частности для Восточной Сибири и Дальнего Востока, имеющих свою климатическую и физико-географическую специфику. В статье приводится анализ накопленных к настоящему времени (с января 2020 г. по июль 2024 г.) данных самолетных наблюдений за турбулентностью над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока России, используемых для разработки методов прогноза атмосферной турбулентности различных типов, а также верификации прогнозов.

Сводки наблюдений с бортов воздушных судов

В процессе исследований по разработке и адаптации методов диагноза и прогноза наличия и интенсивности турбулентности по модельным данным используются сводки наблюдений, поступающие с бортов воздушных судов (ВС) в кодовой форме AIREP. Примеры бортовых сообщений и их расшифровки приведены в табл. 1, где указана расшифровка сообщения (дата и время выпуска сообщения, источник информации (код борта ВС), географические координаты места наблюдения, высота или интервал высот, на которых наблюдалось явление, и его интенсивность), в последнем столбце размещен исходный текст сводки.

Как известно, атмосферная турбулентность имеет различную природу, т.е. формируется различными атмосферными процессами или их совокупностью [4–7]. Определение наблю-

Примеры сводок AIREP с данными о турбулентности

Срок наблюдения		Источник информации	Координаты		Высота, м	Интенсивность	Текст сообщения
дата	время (BCB)		с. ш.	в. д.			
4 мая 2020 г.	4:43	MI-8	52,5°	158,1°	0–300	Сильная	UARA61 RUPK 040444 ARS MI-8 SEV TURB OBS AT 0443Z N5250E15810 FL000/010=
13 декабря 2021 г.	16:19	SU95	64,44°	177,44°	0–60	Сильная	UARA61 RUMG 130431 ARS SU95 SEV TURB OBS AT 1619Z N6444E17744 SFC/FL002=
30 марта 2020 г.	8:03	UTA138	53,09°	103,47°	2450–4250	Умеренная	UARA61 RUIR 300805 ARS UTA138 MOD TURB OBS AT 0803Z N5309E10347 FL080/140=
12 октября 2020 г.	14:55	UAL2809	41,52°	173,5°	11900	Легкая	ARP UAL2809 4152N 17350E 1455 F390 264/139KT TB OCNL LGT CHOP IC=
13 января 2022 г.	5:20	UAL868	62,58°	91,28°	10650	Нет	UAUS31 KWBC 130524 ARP UAL868 6258N 09128E 0520 F350 MS63 337/056KT TB NONE SK CLEAR

Примечание. BCB – всемирное скоординированное время.

даемого типа турбулентности существенно при численном моделировании исследуемого явления. В сообщения AIREP иногда добавляют уточнения о типе турбулентности на больших высотах (более 9000 м): в ясном небе или в облачности. Но такие уточнения встречаются крайне редко, поэтому для определения типа турбулентности в средней и верхней тропосфере нужно привлекать данные о наличии и высоте облачности в окрестности указанных координат. В нижней тропосфере такие уточнения невозможны из-за сложной (часто комплексной) природы явления. Здесь для определения типа турбулентности необходимо использовать информацию наземных наблюдений и атмосферного радиозондирования в окрестности заданной точки, а если местоположение фиксации турбулентности BC удалено от пунктов наблюдений, необходимо привлекать данные численного моделирования.

Анализ сообщений о турбулентности

В табл. 2 представлена статистика данных наблюдений за турбулентностью от бортов воздушных судов, поступивших с рассматриваемой территории за период с января 2020 г. по июль 2024 г.

В исследуемой выборке всего 59 665 сообщений, что в среднем составляет 40 сводок в сутки и соответствует интенсивности полетов BC над рассматриваемой территорией

**Статистика сводок о турбулентности над территорией Восточной Сибири
и Дальнего Востока с 1 января 2020 г. по 31 июля 2024 г.**

Сезон года	Общее число сводок	Из них с данными о турбулентности				
		всего	отсутствует	легкая	умеренная	сильная
Зима	13 849 (23%)	174 (18,6%)	7 (4,0%)	11 (6,3%)	148 (85,1%)	8 (4,6%)
Весна	17 505 (29%)	332 (35,6%)	6 (1,8%)	20 (6,0%)	296 (89,2%)	10 (3,0%)
Лето	11 957 (20%)	241 (25,8%)	0 (0,0%)	14 (5,8%)	222 (92,1%)	5 (2,1%)
Осень	16 354 (27%)	187 (20,0%)	5 (2,7%)	23 (12,3%)	151 (80,7%)	8(4,3%)
Всего	59 665	934 (1,6%)	18 (1,9%)	68 (7,3%)	817 (87,5%)	31 (3,3%)

(с учетом снижения количества полетов в период пандемии 2020–2021 гг.). Из общего числа сообщений сведения о турбулентности содержат 934 сводки (1,6%). Максимальное количество сводок приходится на весну: 332 сообщения, что составляет 35,6% от общего числа сообщений с информацией о турбулентности. Меньше всего сводок, содержащих данные о турбулентности, поступило зимой – 174 сообщения (18,6%), т.е. практически в 2 раза меньше, чем весной. Летом и осенью количество сообщений о турбулентности также существенно меньше, чем весной, но несколько больше, чем в зимний период. При этом, если сводки с данными об отсутствии турбулентности не рассматривать, то процентные соотношения практически не изменяются. Подавляющее количество сообщений приходится на турбулентность умеренной интенсивности.

В табл. 3 приводится распределение данных о наличии турбулентности по рассматриваемой территории (без сообщений об отсутствии турбулентности). Всего учтено 910 сообщений, так как 18 сообщений содержали информацию об отсутствии турбулентности (все они относятся к верхней тропосфере), и в 6 сообщениях нет данных о географических координатах места наблюдения. Данные табл. 3 проиллюстрированы на рис. 1. Очевидно, что распределение общего количества сообщений о наличии турбулентности по рассматриваемой территории зависит прежде всего от интенсивности полетов ВС над конкретным регионом.

Распределение сезонных данных по высотам. Как сказано выше, формирование турбулентных движений в атмосфере обусловлено различными причинами. В нижней тропосфере основными факторами возникновения турбулентности являются трение воздушного потока о земную поверхность (механическая турбулентность), различие в нагреве отдельных участков земной поверхности солнечной радиацией (термическая турбулентность) и деформация воздушного потока, вызываемая обтеканием неровностей земной поверхности (орографическая турбулентность).

Турбулентность в верхней тропосфере возникает в основном за счет пульсаций скорости ветра, обусловленных пространственным сдвигом вектора ветра. Турбулентность в средней тропосфере обусловлена преимущественно наличием облачности, в отсутствие облачности ее можно отнести к турбулентности ясного неба.

В табл. 4 представлено распределение данных о турбулентности над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока по высотам в различные сезоны года. Наибольшее количество сообщений о наличии турбулентности получено из верхней тропосферы – в целом по выборке 68%. Второе место по числу сообщений занимает турбулентность в нижней тропосфере (20%), преимущественно в планетарном пограничном слое. В облакосодержащем слое (3–6 км от уровня земли) турбулентность отмечена в 8% сообщений. Наименьшее число сообщений

Распределение данных о наличии турбулентности по географическим районам
Восточной Сибири и Дальнего Востока с 1 января 2020 г. по 31 июля 2024 г.

Количество сводок с данными о турбулентности					
с. ш.	в. д.				Всего
	До 100°	100–140°	140–180°	От 180°	
Выше 60°	20	33	37	–	90
50–60°	142	241	126	2	511
40–50°	3	84	111	7	205
Ниже 40°	2	40	56	6	104
Всего	167	398	330	15	910

Количество сводок о турбулентности категорий: легкая/умеренная/сильная					
Выше 60°	1/17/2	0/31/2	0/35/2	Нет	1/83/6
50–60°	0/139/3	0/233/8	3/118/5	0/2/0	3/49/16
40–50°	0/3/0	2/79/3	31/75/5	3/4/0	36/161/8
Ниже 40°	1/1/0	7/33/0	15/40/1	5/1/0	28/75/1
Всего	2/160/5	9/376/13	49/268/13	8/7/0	68/811/31

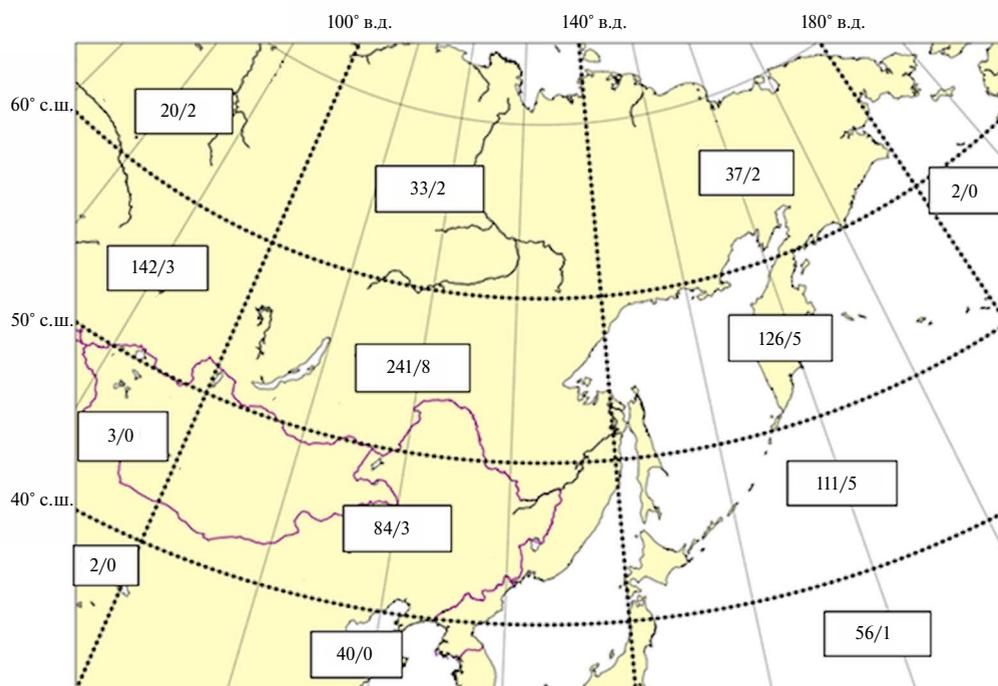


Рис. 1. Распределение общего количества сообщений о турбулентности по территории. Указано общее количество сообщений о наличии турбулентности, через дробь – количество сообщений о сильной турбулентности

Таблица 4

Распределение сообщений о турбулентности над Восточной Сибирью и Дальним Востоком по высотам в сезоны года с 1 января 2020 г. по 31 июля 2024 г.

Сезон	Сообщения о турбулентности					
	Высота от уровня земли, км	Всего	Нет	Легкая	Умеренная	Сильная
Зима (177 сводок)	Ниже 3	52 (30%)	–	–	49	3
	3–6	12 (7%)	–	–	12	–
	6–9	4 (2%)	–	–	4	–
	Выше 9	106 (61%)	7	11	83	5
	Всего	174	7	11	148	8
Весна (346 сводок)	Ниже 3	82 (25%)	–	–	81	1
	3–6	27 (8%)	–	–	27	–
	6–9	16 (5%)	–	–	15	1
	Выше 9	207 (62%)	6	20	173	8
	Всего	332	6	20	296	10
Лето (242 сводки)	Ниже 3	18 (8%)	–	–	18	–
	3–6	15 (6%)	–	–	15	–
	6–9	7 (3%)	–	–	7	–
	Выше 9	201 (83%)	–	14	182	5
	Всего	241	–	14	222	5
Осень (192 сводки)	Ниже 3	35 (19%)	–	–	33	2
	3–6	16 (9%)	–	–	16	–
	6–9	10 (5%)	–	1	9	–
	Выше 9	126 (67%)	5	22	93	6
	Всего	187	5	23	151	8
Всего (957 сводок)	Ниже 3	187 (20%)	–	–	181	6
	3–6	70 (8%)	–	–	70	–
	6–9	37 (4%)	–	1	35	1
	Выше 9	640 (68%)	18	67	531	24
	Всего	934	18	68	817	31

(4%) приходится на нижние слои верхней тропосферы (6–9 км от уровня земли). Распределение процентного соотношения сообщений о турбулентности по вертикальным слоям атмосферы имеет выраженный сезонный ход в нижней и верхней тропосфере и практически равномерный по сезонам года в средней тропосфере.

Турбулентность в верхней тропосфере имеет максимальную повторяемость летом (83%) и минимальную зимой (61%) и весной (62%). Это обусловлено двумя основными

факторами: общим снижением высоты тропосферы в холодный период года в Северном полушарии и развитием мощных конвективных процессов в теплый период года. Летом на Дальнем Востоке России конвективная облачность часто достигает высоты тропопаузы с верхней границей до 12–14 км.

Повторяемость турбулентности в нижних уровнях, напротив, максимальна зимой (30%) и минимальна летом (8%). Очевидно, зимой на рассматриваемой территории термическая турбулентность формируется редко. Механическая и особенно орографическая турбулентность зимой возникает часто за счет устойчивой стратификации атмосферы при относительно сильных ветрах (более 7 м/с) в горной и холмистой местности, которая занимает подавляющее большинство территории Восточной Сибири и Дальнего Востока и является следствием развития горных волн [8]. Весной термическая турбулентность усиливается за счет неравномерного прогрева подстилающей поверхности в континентальных районах и существенных градиентов температуры между сушей и морем в прибрежных и островных территориях. В совокупности с существенными перепадами высот турбулентность в нижней тропосфере на рассматриваемой территории часто носит комплексный характер.

Определение типа наблюдаемой турбулентности. Турбулентность в нижних уровнях атмосферы, как правило, имеет комплексную природу в силу одновременного воздействия нескольких факторов. Из-за небольших высот такая турбулентность главным образом отмечается воздушными судами в непосредственной близости от аэродромов (при взлете или посадке), где проводятся систематические метеорологические наблюдения, как наземные (данные в коде METAR поступают каждые 30 мин), так и аэрологические (2 раза в сутки в 00 ч и 12 ч ВСВ). Наличие, интенсивность, местоположение и продолжительность турбулентности в нижней тропосфере определяются скоростью и направлением ветра у земли и в планетарном пограничном слое, стратификацией атмосферы, шероховатостью земной поверхности и типом подстилающей поверхности. Поэтому, привлекая данные метеорологических и аэрологических наблюдений и зная физико-географические условия в окрестности точки наблюдения, указанной в сообщении о турбулентности, можно определить преобладающий тип наблюдаемой турбулентности: термическая, механическая, орографическая или комплексная.

Для примера рассмотрим сообщение, приведенное в первой строке табл. 1. Сообщение поступило с борта вертолета Ми-8 из точки с координатами (52,5° с. ш.; 158,1° в. д.), т.е. из района Авачинской бухты. Сильная турбулентность наблюдалась около 4:43 ВСВ 4 мая 2020 г. в слое 0–300 м. Ближайший пункт атмосферного радиозондирования находится в г. Петропавловск-Камчатский на расстоянии около 30 км, т.е. эти данные на высотах являются показательными. По аэрологическим и модельным данным днем 4 мая в окрестности указанной точки стратификация атмосферы была неустойчивой, что в совокупности с данными о скорости и направлении ветра у земли исключает формирование горных волн. Горизонтальные градиенты температуры воздуха над прогретой поверхностью земли и холодными водами бухты свидетельствуют о наличии условий для развития термической турбулентности, а сложный рельеф местности обуславливает формирование механической турбулентности.

На рис. 2 представлена иллюстрация вышеприведенного анализа картами прогноза механической (рис. 2, а) и термической (рис. 2, б) турбулентности, построенными по расчетам, выполненным на основе прогностической продукции модели WRF-ARW с горизонтальным шагом сетки 15 км. Видно, что основной вклад в окрестности точки фиксации сильной турбулентности в нижних уровнях вносит механическая турбулентность, которую дополняет термическая. Таким образом, наблюдаемое явление носит комплексный характер.

Пример развития механической турбулентности приведен во второй строке табл. 1. Это сообщение поступило от рейсового борта SU-95 в 16:19 ВСВ 13 декабря 2021 г. из окрестности аэродрома Угольный (г. Анадырь). В декабре на Чукотке установились полярная ночь и плотный ледяной покров в Анадырском лимане. Нет суточного прогрева подстилающей поверхности, так же, как и градиентов температуры «суша–море». Стратификация атмосферы устойчивая. Пункт радиозондирования расположен в г. Анадырь. Приземный северный ветер со скоростью 10–12 м/с может создавать зоны сжатия воздуха на наветренной стороне Золотого хребта и горную волну на подветренной стороне вблизи аэродрома.

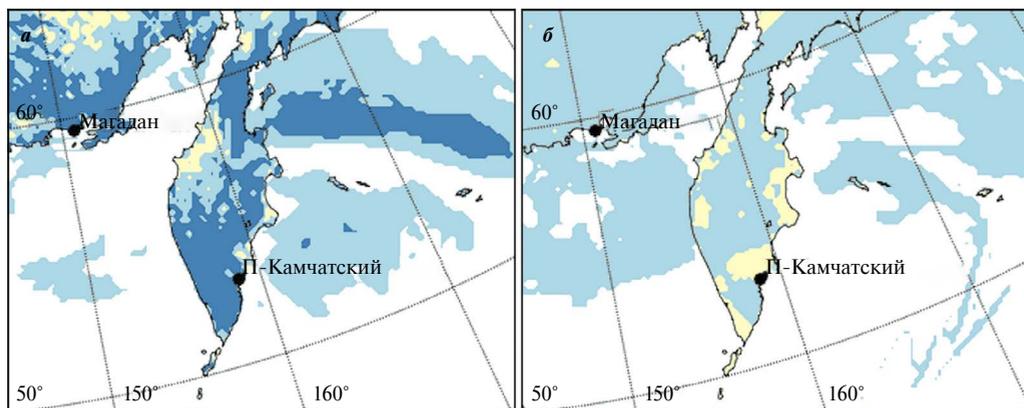


Рис. 2. Прогноз механической (а) и термической (б) турбулентности по данным модели WRF–ARW на 4 ч ВСВ 4 мая 2020 г. (темной и светлой заливкой указаны соответственно умеренная и слабая турбулентность)

Иллюстрация вышеприведенного анализа представлена на рис. 3 картами прогноза механической и термической турбулентности, построенными по модельным данным. На картах отчетливо видны вкрапления сильной механической турбулентности в окрестности г. Анадырь (рис. 3, а) и отсутствие даже легкой термической турбулентности у побережья Анадырского залива (рис. 3, б).

Распределение сообщений о турбулентности в нижней тропосфере представлено на рис. 4. Детализация приведена только для территории Дальнего Востока и Восточной Сибири, т.е. зоны ответственности ФГБУ ДВНИГМИ, хотя в область расчета модели WRF–ARW входит и восточная часть Среднесибирского региона. Приведенные на рис. 4 данные показывают, что сообщения о турбулентности в нижней тропосфере поступают из окрестности достаточно крупных аэродромов (аэрд.), с относительно большой интенсивностью полетов ВС. Так, с Чукотского полуострова из 7 сообщений 5 поступило из аэрд. Угольный (г. Анадырь). В квадранте (50–60° с. ш.; 140–180° в. д.), охватывающем Камчатку, почти все сообщения относятся либо к аэрд. Сокол (г. Магадан) – 36 сообщений (из них 2 о сильной турбулентности) и 29 из аэрд. Елизово (г. Петропавловск-Камчатский) или его ближайшего окружения (окрестностей Авачинской бухты). Из 26 сообщений средних широт Восточной

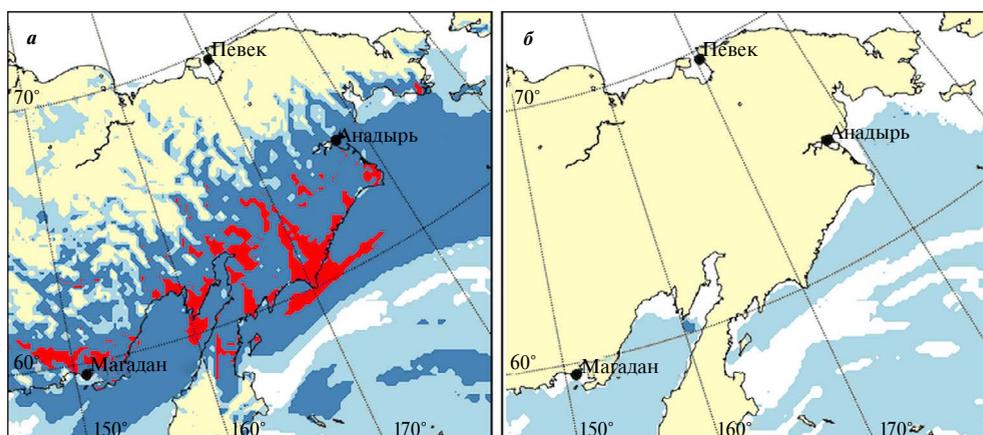


Рис. 3. Прогноз механической (а) и термической (б) турбулентности по данным модели WRF–ARW на 16 ч ВСВ 13 декабря 2021 г. (яркость заливки соответствует интенсивности турбулентности: сильная, умеренная, слабая)

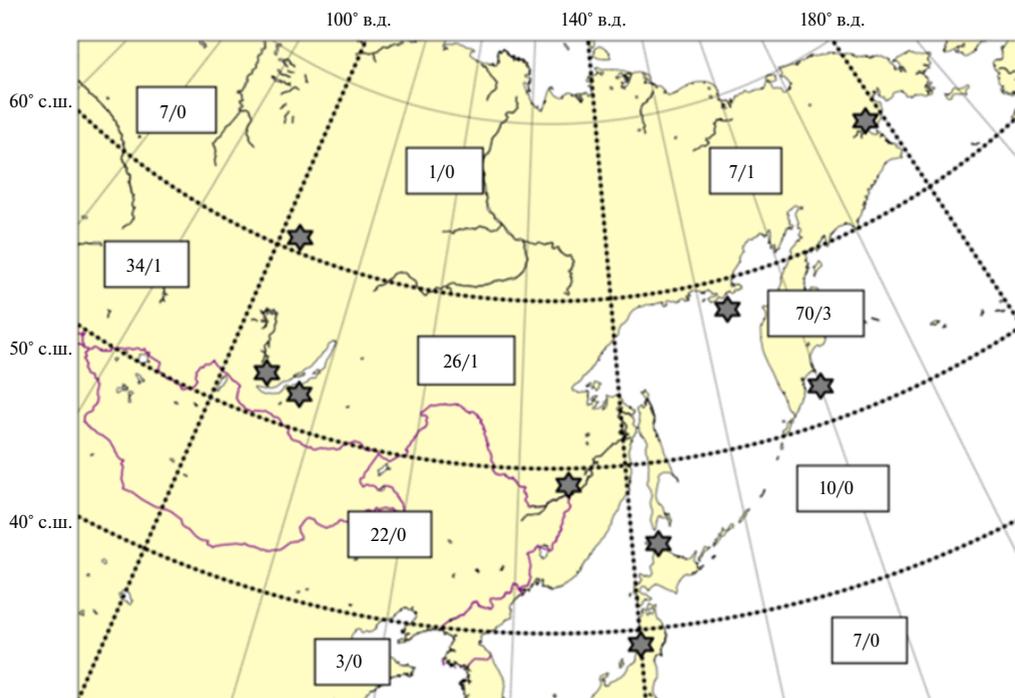


Рис. 4. Распределение сообщений о турбулентности в нижней тропосфере по территории. Обозначения как на рис. 1. Звездочками отмечены места преимущественной локализации сообщений на территории квадранта

Сибири и материковой части Дальнего Востока 20 поступило из аэрд. Кадала г. Иркутск (8 сводок) и аэрд. Байкал г. Улан-Удэ (12). Южнее, в квадранте, содержащем Монголию, часть Китая, Приморье и юг Хабаровского края, из 22 сообщений 18 поступила из аэрд. Новый (г. Хабаровск). Восточнее на тех же широтах основным источником сообщений является аэродром, расположенный на северной оконечности о-ва Хоккайдо (10 сводок). И, наконец, южнее 40° с. ш. единственный источник сообщений о турбулентности нижних уровней расположен на северо-западе о-ва Хонсю.

В непосредственной близости от всех перечисленных источников информации расположены пункты радиозондирования, а на территории аэродромов ведутся наземные наблюдения. Это дает возможность определять тип наблюдавшейся турбулентности, настраивать методы прогноза того или иного типа турбулентности, проводить их калибровку (настраивать дискриминантные значения индексов, отделяющие классы интенсивности: «нет или слабая», «умеренная», «сильная») и верифицировать модельные прогнозы турбулентности. Заметим, что сообщений о слабой турбулентности в нижней тропосфере не поступает, т.е. по имеющимся данным наблюдений можно откалибровать только умеренную и сильную турбулентность.

Аналогично по данным аэрологических наблюдений в окрестности точки с указанными в сообщении координатами и/или спутниковым снимкам облачности можно определить тип наблюдаемой турбулентности в средней и нижней части верхней тропосферы. На больших высотах (более 9000 м) наблюдаемая турбулентность относится преимущественно к ТЯН. На рис. 5 представлено распределение сообщений о наличии турбулентности в верхней тропосфере. Очевидно, сообщения о турбулентности в свободной атмосфере, особенно в верхней тропосфере, не привязаны к местоположению аэродромов. Их количество в определенной степени связано с положением авиационных трасс. В них представлены данные по всем видам интенсивности, в том числе и об отсутствии явления, что дает возможность провести калибровку модельных прогнозов и выполнить их проверку.

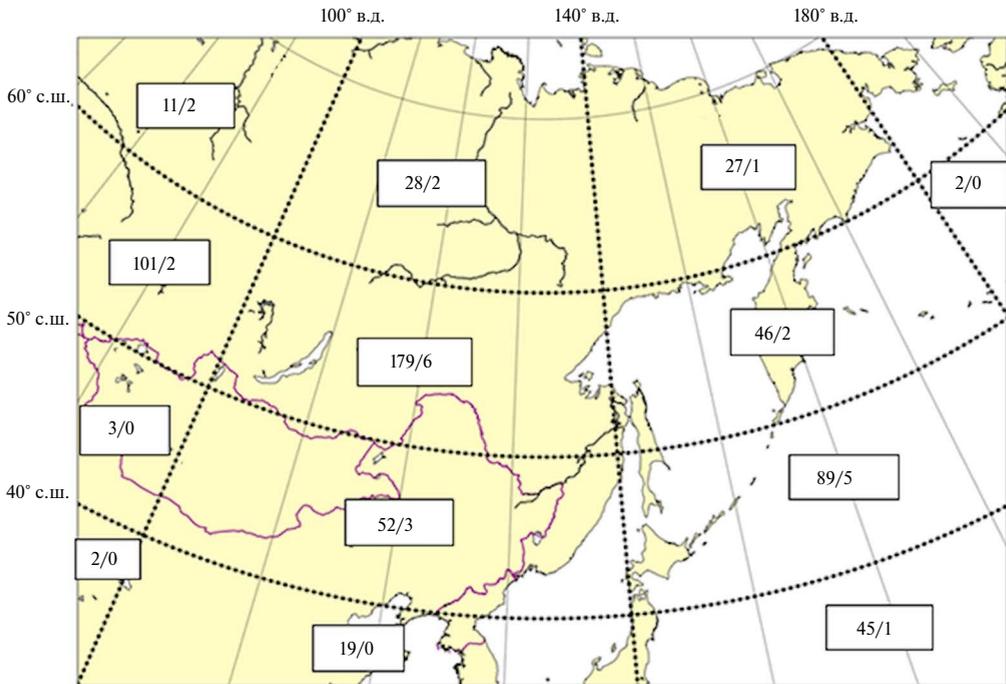


Рис. 5. Распределение сообщений о турбулентности в верхней тропосфере по территории. Обозначения как на рис. 1

Результаты и выводы

В статье представлено распределение данных самолетных наблюдений об атмосферной турбулентности по сезонам года, атмосферным слоям (высотам) и территории Восточной Сибири и Дальнего Востока. Показано, что наибольшее количество сообщений о турбулентности поступает с высот, относящихся к верхней тропосфере. Здесь дается наиболее полная информация об интенсивности явления, поступают также данные об отсутствии турбулентности. Сообщения из нижней тропосферы относятся преимущественно к планетарному пограничному слою и несут в себе информацию только об умеренной и сильной турбулентности в окрестности крупных аэродромов, где есть данные наземных наблюдений и радиозондирования. Обсуждается возможность определения типа наблюдаемой турбулентности по данным самолетных сообщений в совокупности с данными метеорологических наблюдений, спутниковых снимков облачности и модельных прогнозов. Отмечено, что такая информация представляет безусловную ценность при проведении исследований по численному моделированию и прогнозированию атмосферной турбулентности: ее отдельных типов и совокупной реализации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вербицкая Е.М., Романский С.О. Использование высокопроизводительной вычислительной техники для численного моделирования и прогнозирования опасных для авиации явлений погоды в Дальневосточном регионе // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления: материалы VI Международной научно-практической конференции (Хабаровск, 14–16 сентября 2021 г.). Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2021. С. 40–45.
2. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X. A description of the advanced research WRF model version 4 (No. NCAR/TN-556+STR). Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2021. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.

3. Lee D., Chun H., Kim S., Sharman R.D., Kim J. Development and evaluation of global Korean aviation turbulence forecast systems based on an operational numerical weather prediction model and *in situ* flight turbulence observation data // *Weather and Forecasting*. 2022. Vol. 37. P. 371–392. DOI: 10.1175/WAF-D-22-0086.1.
4. Sharman R.D., Lane T. (Eds.) *Aviation turbulence: processes, detection, prediction*. Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-23630-8.
5. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н. Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 288 с.
6. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 414 с.
7. Foudad M., Sanchez-Gomez E., Jaravel T., Rochoux M., Terray L. Past and future trends in clear-air turbulence over the Northern Hemisphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2024. Vol. 129. e2023JD040261. DOI: 10.1029/2023JD040261.
8. Barry R.G. *Mountain weather and climate*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511754753.

REFERENCES

1. Verbickaja E.M., Romanskij S.O. Ispol'zovanie vysokoproizvoditel'noj vychislitel'noj tehniki dlja chislennogo modelirovaniya i prognozirovaniya opasnyh dlja aviacii javlenij pogody v Dal'nevostochnom regione. In: *Informacionnye tehnologii i vysokoproizvoditel'nye vychisleniya: materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii* (Habarovsk, 14–16 sentjabrja 2021 g.). Habarovsk: Tihookeanskiy Gosudarstvennyj Universitet; 2021. S. 40–45. (In Russ.).
2. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X. A description of the advanced research WRF model version 4 (No. NCAR/TN-556+STR). Boulder: National Center for Atmospheric Research; 2021. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.
3. Lee D., Chun H., Kim S., Sharman R.D., Kim J. Development and evaluation of global Korean aviation turbulence forecast systems based on an operational numerical weather prediction model and *in situ* flight turbulence observation data. *Weather and Forecasting*. 2022;37:371–392. DOI: 10.1175/WAF-D-22-0086.1.
4. Sharman R.D., Lane T. (Eds.) *Aviation turbulence: processes, detection, prediction*. Springer International Publishing; 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-23630-8.
5. Vinnichenko N.K., Pinus N.Z., Shmeter S.M., Shur G.N. *Turbulentnost' v svobodnoj atmosfere*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1976. 288 s. (In Russ.).
6. Obuhov A.M. *Turbulentnost' i dinamika atmosfery*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1984. 414 s. (In Russ.).
7. Foudad M., Sanchez-Gomez E., Jaravel T., Rochoux M., Terray L. Past and future trends in clear-air turbulence over the Northern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2024;129. e2023JD040261. DOI: 10.1029/2023JD040261.
8. Barry R.G. *Mountain weather and climate*. Cambridge: Cambridge university press; 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511754753.

Обзорная статья
УДК 574.34:575.174.4
DOI: 10.31857/S0869769825020084
EDN: GEPNKM

Математические модели, объединяющие экологический и генетический подходы в популяционной биологии

Е.Я. Фрисман, О.Л. Жданова[✉], Г.П. Неверова

Ефим Яковлевич Фрисман

член-корреспондент РАН, профессор, научный руководитель института
Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия
frisman@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-1629-2610>

Оксана Леонидовна Жданова

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
axanka@iacp.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-3090-986X>

Галина Петровна Неверова

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
galina.nev@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0001-7567-7188>

Аннотация. В данном обзоре предлагается обобщение экологического и генетического подходов в задачах, традиционно рассматриваемых в рамках математической популяционной биологии. Такой подход не является единственно возможным, но представляется нам оригинальным и перспективным, поскольку объединение математических моделей естественного отбора и динамики численности популяций позволяет выявить возможные механизмы появления сложной временной организации генетического биоразнообразия, весьма чувствительной к внешнему воздействию. При учете возрастной структуры популяций в моделях возникает мультирежимность, которая не только позволяет объяснить смену режима динамики, но и по-новому взглянуть на общепризнанные представления о существующих закономерностях в динамике популяций. Сценарии микроэволюции генетического состава популяции, возникающие при флуктуирующей численности, позволяют объяснять и описывать выраженную генетическую дифференциацию особей разных поколений в популяциях с сезонным характером размножения, например происхождение различий в генетической структуре у смежных поколений тихоокеанской горбуши *Oncorhynchus gorbuscha*. Такие модели хорошо объясняют полиморфизм размера помета в различных (естественных и искусственных) популяциях песцов *Alopex lagopus*, а также возникновение и прекращение колебаний численности ряда видов грызунов, которое наблюдается в последнее время во

многих северных популяциях Западной Европы (например, исчезновение популяционных циклов полевков в ряде популяций Финляндии и Швеции). Выявленные особенности динамического поведения подобных систем важны с точки зрения пересмотра и развития устоявшихся теоретических представлений, поскольку в таких системах нарушается принцип простого объединения (суперпозиции) результатов двух моделей: плотностно-независимого естественного отбора лучших генотипов и плотностно-зависимой регуляции роста численности; появляются режимы, которые не наблюдались отдельно в каждой из моделей.

Ключевые слова: эволюция, естественный отбор, динамика популяций, сообщество «хищник–жертва», математическое моделирование, полиморфизм, мультистабильность, эколого-генетическая модель

Для цитирования: Фрисман Е.Я., Жданова О.Л., Неверова Г.П. Математические модели, объединяющие экологический и генетический подходы в популяционной биологии // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 102–123. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020084>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственных заданий Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН (тема FFW-2021-0004) и Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН (тема FWUG-2024-0005).

Review article

Mathematical models combining ecological and genetic approaches in population biology

E.Ya. Frisman, O.L. Zhdanova, G.P. Neverova

Efim Ya. Frisman

Corresponding Member of RAS, Professor, Scientific Director of the Institute
Institute for Comprehensive Analysis of Regional Problems, FEB RAS, Birobidzhan, Russia
frisman@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-1629-2610>

Oksana L. Zhdanova

Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Leading Researcher
Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia
axanka@iacp.dvo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-3090-986X>

Galina P. Neverova

Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Senior Researcher
Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia
galina.nev@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0001-7567-7188>

Abstract. The review proposes a generalization of ecological and genetic approaches to problems traditionally considered within the framework of mathematical population biology. This approach is not the only possible one, but it seems to us original and promising, since combining mathematical models of natural selection and population dynamics allows identifying possible mechanisms for the emergence of a complex temporal organization of genetic biodiversity very sensitive to external influences. When taking into account the age structure of populations in models, a multimodality appears, which not only makes it possible to explain the change in the dynamics mode, but also to take a fresh look at general biological ideas about existing patterns in population dynamics. Scenarios for the microevolution of the genetic composition of a population that arise with fluctuating numbers allow to explain and describe the pronounced genetic differentiation of individuals of different generations in populations with a seasonal pattern of reproduction;

for example, the origin of differences in genetic structure among successive generations of Pacific pink salmon *Oncorhynchus gorbuscha*. Such models explain litter size polymorphism well in different (natural and artificial) populations of Arctic foxes *Alopex lagopus*; as well as the emergence and cessation of fluctuations in the numbers of several rodent species, which have recently been observed in many northern populations of Western Europe (for example, the disappearance of population cycles of voles in a number of populations in Finland and Sweden). The identified features of the dynamic behavior of such systems are important from the point of view of the revision and development of established theoretical concepts, since in such systems the principle of simple combination (superposition) of the results of two models is violated: density-independent natural selection of the best genotypes and density-dependent regulation of population growth; modes appear that were not observed separately in each of the models.

Keywords: evolution, natural selection, population dynamics, predator–prey community, mathematical modeling, polymorphism, multistability, eco-genetic model

For citation: Frisman E.Ya., Zhdanova O.L., Neverova G.P. Mathematical models combining ecological and genetic approaches in population biology. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2): 102–123. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020084>

Funding. The work was carried out within the framework of state assignments of the Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS (topic No. FFW-2021-0004) and the Institute for Complex Analysis of Regional Problems FEB RAS (topic No. FWUG-2024-0005).

Введение

В 1798 г. Томас Мальтус опубликовал книгу *Essay on the Principle of Population* [1]. В этой работе он приходит к выводу, что, пока достаточно средств существования, численность популяции растет во времени по геометрической прогрессии (за каждую единицу времени численность популяции умножается на одну и ту же величину, называемую показателем прогрессии). Показатель геометрической прогрессии популяционного роста был впоследствии назван мальтузианским параметром. Данная работа вызвала большую весьма содержательную, хотя и критическую дискуссию у многих различных обществоведов и политологов. Существенно меньше известно об основополагающей роли модели Мальтуса в становлении и развитии большинства современных популяционно-биологических и эволюционных концепций. Например, в первых главах фундаментальной основополагающей работы Чарльза Дарвина о естественном отборе [2] проводится подробный анализ предельных Мальтуса о росте численности популяции.

В первой половине XX столетия начался «золотой век» математической биологии, который феерическим всплеском работ надолго определил последующее развитие теоретической экологии и математической популяционной генетики – основы синтетической теории эволюции. При этом в работах как по динамике биологических сообществ, так и по математической популяционной генетике рассматривались фактически различные модификации модели Мальтуса, в которых мальтузианский параметр не считался постоянной величиной, а зависел от различных факторов. Ряд исследователей, таких, как Пьер Ферхюльст, Альфред Лотка, Вито Вольтерра, Г.Ф. Гаузе, разрабатывали модели популяционной динамики и динамики биологических сообществ с учетом того, что мальтузианский параметр зависит от численностей всех популяций, составляющих сообщество, отражая особенности взаимодействия этих популяций (например, конкуренция или взаимодействия «хищник–жертва») [3].

Другой ряд исследователей, основоположников синтетической теории эволюции, таких как Роберт Фишер, Сьюэлл Райт, Джон Холдейн, Сергей Сергеевич Четвериков, полагали, что мальтузианский параметр зависит от генотипической структуры популяции и от приспособленностей генотипов особей, составляющих популяцию. В целом следует отметить, что и создатели синтетической «генетической» теории эволюции, и основоположники теоретической экологии (динамической теории экосистем) Пьер Ферхюльст и Вито Вольтера, а также Г.Ф. Гаузе рассматривали эволюционные и экологические процессы как неотъемлемые характеристики одного целого.

Математической базой всех первоначальных работ по математической популяционной биологии были изящные модели, построенные на основе систем дифференциальных уравнений и удачно описывающие многие популяционные феномены, наблюдающиеся в природных биологических сообществах: колебания численностей, конкурентное вытеснение, полиморфное разнообразие и многое другое [3–5].

В начале 70-х годов XX в., в основном благодаря базовым работам дальневосточного исследователя Александра Павловича Шапиро [6] и англо-американского исследователя Роберта Мэя [7, 8], математическая популяционная биология пополнилась достаточно простыми, но весьма эффективными моделями, основанными на рекуррентных уравнениях. Эти модели были предназначены для описания и анализа динамики численности популяций тех биологических видов, которые имеют фиксированный небольшой сезон размножения. При этом предполагалось, что рост численности экологически лимитирован: мальтузианский параметр убывает с ростом численности популяции. Неожиданно оказалось, что «простенькие» модели, построенные Р. Мэем и А.П. Шапиро, обладают колоссальным разнообразием возможных динамических режимов. Исследование моделей показало, что для видов, у которых малый репродуктивный потенциал, изменение численности популяции происходит монотонно и стремится к некоторому устойчивому равновесному значению. Для видов, у которых репродуктивный потенциал чуть больше, переход к равновесию происходит путем затухающих колебаний. Если репродуктивный потенциал еще больше, то равновесие численности популяции оказывается неустойчивым и возникают колебания.

Более детальные представления о механизме взаимосвязи эволюционных и экологических процессов появились в 1950-х и 1960-х годах. Одной из первых была гипотеза Читти [9] о том, что циклические изменения численности полевых животных могут быть следствием естественного отбора, благоприятствующего различным генотипам в противоположные фазы цикла внешних условий. Более того, появилось предположение, что именно эволюция создает условия для контроля численности травоядных, паразитов и хищников в природе [10]. Развивались представления о плотностно- и частотно-зависимых составляющих в действии естественного отбора [11, 12], а также о плотностно-независимых формах естественного отбора, действие которых в условиях экологического лимитирования способно вызвать изменение характера динамики численности популяций [13–15].

Позже интерес к этой теме практически пропал в связи с неудачными попытками экспериментально подтвердить взаимосвязь эколого-генетических процессов (например, гипотезу Читти [16]), в результате укоренилось мнение, что у эволюционных и экологических процессов значительно отличаются временные шкалы (подробнее см. в обзоре [17]). Несмотря на преобладающий пессимизм, постепенно накапливались результаты исследований, подтверждающие возможность наблюдать существенные адаптивные генетические изменения, происходящие в настоящее время (например, изменение окраски и признаков жизненного цикла гуппи при смене хищника [18–20]; изменения признаков жизненного цикла комаров, завезенных на Гавайи [21]; фенотипические признаки кроликов, завезенных в Новую Зеландию [22]). Позже удалось экспериментально подтвердить, что естественный отбор и генетическая изменчивость могут влиять на популяционную динамику [23, 24]. В последнее время наблюдается рост исследовательского интереса к анализу экоэволюционной динамики, однако полного синтеза экологических и генетических представлений и концепций нет до сих пор [17, 25], экологические и генетические популяционные процессы, как правило, рассматриваются отдельно [26, 27]. В частности, в популяционно-генетических моделях изучается динамика генетических частот в зависимости от различных особенностей наследования, при этом используются относительные значения приспособленностей генотипов, что позволяет считать численность популяции постоянной (модель Фишера–Райта) [21, 28–31].

В наших исследованиях мы попытались объединить «экологический поход», развиваемый в работах А.П. Шапиро, которые рассматривали **динамику численности** экологически лимитированных популяций, с подходом эволюционистов (популяционных генетиков), развиваемом в работах Р. Фишера и др., которые описывали **эволюцию** «свободных» нелIMITированных популяций. Остановимся кратко на моделях, в которых показано, что

эволюционный процесс естественного отбора может привести к изменению параметров роста популяции и связанной с этим смене динамических режимов ее численности. Обсудим возможные механизмы и направленность этих изменений.

Основные предположения

Для понимания основных закономерностей эволюции динамического поведения численности лимитированной популяции ограничимся подробным рассмотрением простой модельной ситуации, когда все адаптивное разнообразие в популяции определяется одним диаллельным локусом с аллеломорфами A и a , причем фенотип особи жестко определяется ее генотипом; популяция панмиктична, в ней действуют менделевские правила наследования, а смежные поколения особей не перекрываются. В этом случае действие отбора можно описать количественно, поставив в соответствие каждому из генотипических классов особей AA , Aa и aa по одному коэффициенту w_{AA} , w_{Aa} и w_{aa} соответственно, называемому приспособленностью особей данного генотипа (fitness). Будем считать, что w_{ij} равно среднему числу потомков, произведенных одной особью данного генотипического класса и доживших до репродуктивного возраста (давших вклад в следующее поколение). Это определение приспособленности формально эквивалентно определению Р.А. Фишера [32].

Несмотря на максимальное упрощение, моногенная модель отбора не является полностью оторванной от реальности. В качестве яркого примера можно привести моногенный характер наследования размера помета у арктических песцов *Alopex lagopus*. В работе [33] на основе комплексного сегрегационного анализа типа наследования размера приплода в расширенной генеалогии фермерских песцов было показано, что для данного адаптивного (напрямую определяющего приспособленность) признака наследование среднего размера приплода можно описать в рамках моногенной модели с контролем малого размера приплода по рецессивному типу.

Теперь нужно описать основные переменные модели. Прежде всего это численность популяции, обозначим ее через X . В нашем случае популяция состоит из трех генотипов с численностями X_{AA} , X_{Aa} и X_{aa} , и, соответственно, генетическая структура определяется частотами этих генотипов (величинами X_{AA}/X , X_{Aa}/X и X_{aa}/X). Однако предположение о панмиксии в популяции позволяет перейти от частоты генотипов к частотам аллелей генов. Аллеля всего два, суммы их частот равны 1, поэтому для характеристики генетической структуры популяции в нашем случае достаточно использовать одну переменную. Для определенности выберем в качестве такой переменной частоту аллеля A и обозначим ее через q .

Теперь можно выписать основные динамические уравнения, связывающие выбранные переменные в смежных поколениях [32]:

$$\begin{cases} X_{n+1} = \bar{w}_n X_n \\ q_{n+1} = q_n (w_{AA} q_n + w_{Aa} (1 - q_n)) / \bar{w}_n, \end{cases} \quad (1)$$

где n – номер поколения, $\bar{w}_n = w_{AA} q_n^2 + w_{Aa} q_n (1 - q_n) + w_{aa} (1 - q_n)^2$ – средняя приспособленность особей в популяции.

В случае, когда отсутствует ресурсное лимитирование роста численности популяции и нет отбора: все приспособленности одинаковые константы ($w_{AA} = w_{Aa} = w_{aa} = w$) – частоты аллелей не меняются, а численность популяции, в соответствии с первым уравнением системы (1) и в соответствии с представлениями Т. Мальгуса, изменяется по геометрической прогрессии со знаменателем w . В случае, когда нет ресурсного лимитирования роста численности, но есть отбор (приспособленности константы, но не все одинаковые), частоты аллелей эволюционно изменяются согласно второму уравнению системы (1). При этом изменяется и средняя приспособленность, причем, согласно фундаментальной теореме естественного отбора Р. Фишера, средняя приспособленность может только возрастать: $\bar{w}_{n+1} \geq \bar{w}_n$. Таким образом, в отсутствие ресурсного лимитирования естественный отбор приводит к увеличению скорости роста численности популяции.

Эволюция характера динамики численности лимитированной популяции

Рассмотрим теперь ситуации, когда популяция находится в условиях ресурсных ограничений роста численности. При этом в популяции действует отбор, который не зависит от уровня численности (плотности населения) популяции. Такое представление, по-видимому, соответствует реальному действию отбора на те признаки, которые определяют общую жизнеспособность организмов. Вместе с тем, поскольку есть ресурсные ограничения роста численности, то приспособленности генотипов должны зависеть от уровня численности, однако соотношения между приспособленностями не будут меняться при его изменении. Этим требованиям можно удовлетворить, если предположить, что абсолютные приспособленности зависят от численностей следующим образом:

$$w_{AA} = r_{AA}f(X_n), w_{Aa} = r_{Aa}f(X_n), w_{aa} = r_{aa}f(X_n), \quad (2)$$

где $f(X_n)$ – функция, характеризующая плотностную регуляцию роста численности популяции, одинаковая для каждого генотипа. Поскольку речь идет о ресурсном ограничении роста, то мы будем считать $f(X_n)$ монотонно убывающей, причем $f(0) = 1$. В этом случае коэффициенты r_{AA} , r_{Aa} и r_{aa} оказываются равными максимально возможному (возможному при ресурсном избытии) среднему числу потомков соответствующего генотипа, и их естественно называть репродуктивными потенциалами этих генотипов. Описанный тип естественного отбора предложено называть « F -отбор», подчеркивая данным названием, что это отбор в лимитированных по ресурсам популяциях, который осуществляется при постоянных (хотя и различных) репродуктивных потенциалах генотипов и, соответственно, при постоянных относительных приспособленностях (fitness).

Подставляя выражения (2) в систему (1), получаем после преобразований:

$$\begin{cases} X_{n+1} = \bar{r}_n X_n f(X_n) \\ q_{n+1} = q_n (r_{AA} q_n + r_{Aa} (1 - q_n)) / \bar{r}_n, \end{cases} \quad (3)$$

где $\bar{r}_n = r_{AA} q_n^2 + r_{Aa} q_n (1 - q_n) + r_{aa} (1 - q_n)^2$ – среднее значение репродуктивного потенциала особей в популяции.

Заметим, что в системе (3) второе уравнение, характеризующее изменение генетической структуры, не зависит от динамики численности. Более того, оно с точностью до обозначений совпадает с аналогичным уравнением для нелимитированной популяции. Следовательно, для этой генетической подсистемы должна выполняться теорема Фишера, которая в наших обозначениях имеет вид $\bar{r}_{n+1} \geq \bar{r}_n$.

На рис. 1 приведены графики изменения частоты аллеля A (q_n) среднего значения репродуктивного потенциала (\bar{r}_n) и численности популяции (x_n), полученные путем численных итераций системы (3) для некоторых наборов значений репродуктивных потенциалов генотипов и видов функций $f(x)$. Как видим на этих графиках, в случае, когда репродуктивный потенциал гетерозигот имеет промежуточное значение между репродуктивными потенциалами гомозигот, происходит полное вытеснение аллеля, определяющего меньший репродуктивный потенциал. Если репродуктивный потенциал гетерозигот больше, чем у каждой из гомозигот, то в популяции устанавливается сбалансированный полиморфизм: устойчиво присутствуют все три генотипа. Монотонное изменение величин q_n и \bar{r}_n сопровождается весьма сложным динамическим поведением численности популяции, которая проходит стадии достаточно равномерной динамики, затем колебаний разного периода и, наконец, попадает в область нерегулярного хаоса.

Таким образом, мы видим, что для лимитированных популяций прогрессивный эволюционный рост среднего репродуктивного потенциала может оказаться в диссонансе со стабильностью роста ее численности.

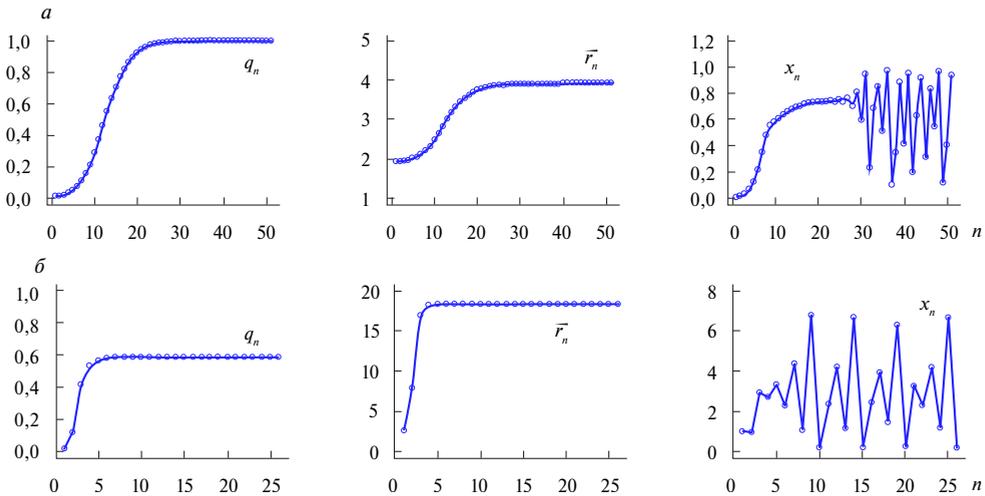


Рис. 1. Динамика q_n , r_n , и x_n , полученная по модели (3). $a - r_{AA} = 3,9$; $r_{Aa} = 2,9$; $r_{aa} = 1,9$; $f(x) = 1 - X/M$; $x = X/M$; $q_0 = 0,35$; $x_0 = 0,01$. $\text{б} - r_{AA} = 10$; $r_{Aa} = 30$; $r_{aa} = 2$; $f(x) = \exp(-bX)$; $x = bX$; $q_0 = 0,001$; $x_0 = 1$

Моделирование эволюции локальных популяций с простой возрастной структурой

Рассмотрим теперь модель динамики структурированной популяции, содержащей два возрастных класса, соответствующих разным стадиям развития: младшей, включающей неполовозрелых особей, и старшей, состоящей из особей, участвующих в размножении. Пусть времени, протекающего между двумя последовательными периодами размножения, достаточно для развития особей младшего возраста до половозрелого состояния, а новорожденных особей – до состояния младшего возраста. Выживаемость и репродуктивная способность половозрелых особей не зависят от возраста, т.е. отсутствуют возрастные различия у взрослых особей, а регуляция численности популяции осуществляется путем плотностно-зависимого лимитирования рождаемости. Подобный тип саморегуляции наблюдается у достаточно многих животных, особенно мелких млекопитающих, когда рождаемость заметно снижается по мере увеличения численности популяции. Основным проявлением плотностно-зависимой регуляции рождаемости является стресс-синдром, приводящий к снижению половой активности и уменьшению плодовитости особей, вплоть до рассасывания части заложенных эмбрионов. В частности, это характерно для видов, подверженных сильным колебаниям численности, например, леммингов, полевок и др. [34].

Уравнения динамики численности двухвозрастной лимитированной популяции с учетом описанных особенностей жизненного цикла имеют вид:

$$\begin{cases} X_{n+1} = R(X_n, Y_n) \cdot Y_n, \\ Y_{n+1} = sX_n f(X_n, Y_n) + vY_n, \end{cases} \quad (4)$$

где X – численность младшего возрастного класса, Y – численность старшего возрастного класса, составляющего репродуктивную часть популяции, n – номер периода размножения, $R(X, Y)$ – интенсивность рождаемости (среднее число выживших потомков, приходящихся на одну половозрелую особь), v ($0 \leq v < 1$) – коэффициент выживаемости половозрелых особей, $sf(X_n, Y_n)$ – коэффициент выживаемости неполовозрелых особей, зависящий от уровня численностей возрастных групп, причем s ($0 \leq s < 1$) – это показатель, характеризующий максимально возможный уровень выживаемости, а $f(X_n, Y_n)$ – функция, описывающая падение выживаемости молодежи с ростом численности.

В теоретических исследованиях двухвозрастных популяций неоднократно было показано, что увеличение репродуктивного потенциала и параметров, характеризующих выживаемость особей, приводит к усложнению динамики численности от стабильных режимов до нерегулярных колебаний. Однако механизмы роста репродуктивного потенциала, как правило, не рассматривались. Вместе с тем можно предположить, что рост потенциальной плодовитости особей в природных популяциях происходит в процессе их эволюции под действием естественного отбора.

Предположим, что рождаемость (фертильность) особей определяется генетически и подвержена действию естественного отбора. Отметим, что в данном случае, когда рождаемость определяется генетически одним адаптивным аутосомным диаллельным локусом, уравнения динамики численностей возрастных групп популяции преобразуются очевидным образом, и к ним добавляются уравнения динамики частот генов, характеризующие изменение генетической структуры в ходе эволюции двухвозрастной популяции:

$$\begin{cases} X_{n+1} = R_n Y_n \\ Y_{n+1} = sX_n f(X_n, Y_n) + vY_n \\ q_{n+1} = \frac{p_n (R_{AA} p_n + R_{Aa} (1 - p_n))}{R_n} \\ p_{n+1} = \frac{sX_n f(X_n, Y_n) q_n + vY_n p_n}{sX_n f(X_n, Y_n) + vY_n} \end{cases} \quad (5)$$

Здесь p – частота аллеля A в старшем возрастном классе; q – частота аллеля A в младшем возрастном классе.

Рождаемость половозрелых особей является адаптивным признаком, который определяется одним аутосомным диаллельным локусом с аллеломорфами A и a . В соответствии с выбранной моделью предполагается, что в популяции существуют три генотипических группы AA , Aa и aa с различающимися коэффициентами рождаемости. Обозначим коэффициенты рождаемости этих генотипов R_{AA} , R_{Aa} и R_{aa} соответственно. $R_n = R_{AA} p_n^2 + 2R_{Aa} p_n (1 - p_n) + R_{aa} (1 - p_n)^2$ – средняя рождаемость особей в году n .

В ходе исследования были рассмотрены линейная и экспоненциальная виды функции $f(X_n, Y_n)$. Линейная функция описания лимитирования выживаемости молодежи имеет вид $f(X, Y) = 1 - X/K$, где K – максимально возможная численность младшего возрастного класса, т.е. предполагалось, что выживаемость молодежи линейно падает с увеличением численности (плотности) исключительно ювенильной группы популяции. В ходе исследования модели (5) с линейной функцией выживаемости молодежи было показано, что потеря устойчивости неподвижных точек возможна только по сценарию Неймарка–Сакера, при этом генетический состав популяции, а именно, будет ли она полиморфной или мономорфной, во многом определяется взаимным расположением коэффициентов фертильности гетерозиготы и гомозигот. В свою очередь фертильность присутствующих в популяции генотипов определяет количество зародышей, приходящихся на одну особь, и уже эта величина в паре с коэффициентом выживаемости старшего возрастного класса определяет характер динамики численности возрастных групп популяции [35]. Рост среднего количества приходящихся на одну особь зародышей приводит к дестабилизации сначала численности, а затем (если популяция полиморфна) и генетического состава возрастных групп популяции. При этом в аналогичной модели однолокусного отбора в одновозрастной популяции не наблюдалось устойчивых колебаний ее генетического состава ни при каких значениях популяционных параметров, и, следовательно, именно введение в модель возрастной структуры позволило наблюдать нестабильную динамику генетического состава возрастных групп популяции (рис. 2, а).

Экспоненциальная функция описания лимитирования выживаемости молодежи имеет вид: $f(X, Y) = \exp(-\alpha X - \beta Y)$, где α и β – коэффициенты, характеризующие интенсивности воздействия особей неполовозрелого и половозрелого возрастного класса на выживаемость молодежи. В модели (5) с экспоненциальной функцией выживаемости молодежи на основе анализа условий существования и устойчивости неподвижных точек, так же, как и в пре-

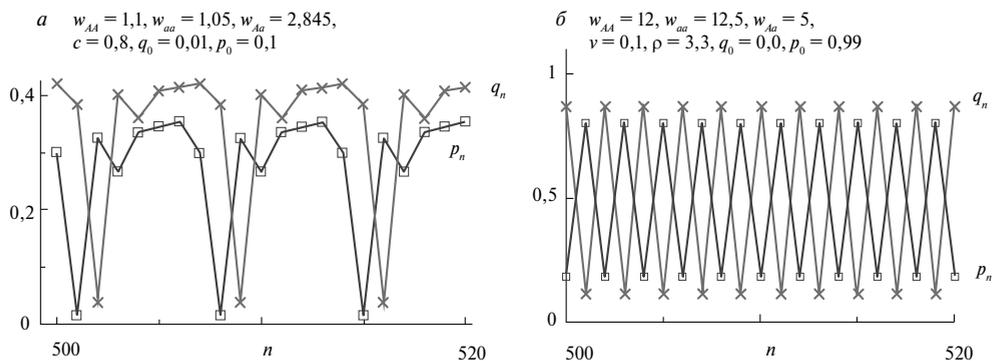


Рис. 2. Колебания генетического состава в модели (5) при линейной (а) и экспоненциальной (б) функции лимитирования выживаемости молоди. $\rho = \beta s/\alpha$ – относительный вклад старшей возрастной группы в лимитирование процесса выживаемости молоди. Параметры $w_{AA} = sR_{AA}$, $w_{Aa} = sR_{Aa}$ и $w_{aa} = sR_{aa}$ в этом случае характеризуют фертильность генотипов AA , Aa и aa с учетом выживаемости потомков до взрослого возрастного класса

дыдущей модели, показано, что при достижении достаточно больших средних значений коэффициентов рождаемости в популяциях их равновесная численность теряет устойчивость и возникают колебания. При этом генетическая структура определяется соотношением коэффициентов рождаемости разных генотипов: при движущем отборе – мономорфизм, при сверхдоминировании – полиморфизм, при пониженном репродуктивном потенциале гетерозигот – ловушка бистабильности [36]. Наличие возрастной структуры обеспечивает возможность двух сценариев: известный из одномерных моделей сценарий удвоения периода, приводящий к «пилообразным» колебаниям численности, редко встречающимся в природе, и сценарий рождения инвариантной кривой (аналог предельного цикла в системах дифференциальных уравнений), при котором возникают квазипериодические колебания, сравнительно часто наблюдающиеся в природе.

Динамические режимы, наблюдаемые в наших эколого-генетических моделях, являются следствием объединения (т.е. суперпозиции) двух подходов: естественный отбор приводит к эволюционному росту приспособленности, а плотностное регулирование при увеличении коэффициентов рождаемости – к бифуркациям, обеспечивающим возникновение устойчивых колебаний численности.

Принципиально новое и, по-видимому, самое интересное, это то, что здесь обнаружилось возникновение устойчивых колебаний не только численности, но и частот генов. Заметим, что F -отбор не является плотностно-зависимым отбором: репродуктивные потенциалы генотипов являются константами и не зависят ни от уровня численности, ни от уровня плотности. Ожидалось, что F -отбор вызовет монотонное изменение частот, которое может привести к изменению динамического режима популяции, однако оказалось, что в рамках F -отбора возможны бифуркации, которые приводят к возникновению устойчивых колебаний частот аллелей (рис. 2, б). При этом нарушается принцип суперпозиции результатов двух моделей: плотностно-независимого естественного отбора и плотностно-зависимой регуляции роста численности; появляются режимы, которые не наблюдались отдельно в каждой из моделей: колебания частот генов, связанные с бифуркационным появлением новых устойчивых аттракторов. Другой парадокс F -отбора заключается в том, что он, будучи независимым от плотности, приводит к периодическим колебаниям и нерегулярным режимам динамики численности, которые создают условия для плотностно-зависимого отбора, такого как r - и K -отбор.

Важно отметить, что смена режима динамики численности может произойти не только в случае вариации численностей возрастных групп в популяции, но и в результате изменения ее генетического состава. В частности, в случае пониженной приспособленности гетерозиготы изменение структуры популяции как возрастной, так и генетической может привести к изменению направления эволюции, когда один из генотипов вытесняет другой.

Колебания генетического состава в популяции тихоокеанской горбуши

Наиболее ярким примером вида с перекрывающимися поколениями и выраженной стадийностью развития особей является тихоокеанская горбуша *Oncorhynchus gorbuscha*. Особи этого проходного вида созревают на втором году жизни и идут на нерест летом или ранней осенью из морской воды в пресноводный бассейн, где откладывают икру и гибнут после нереста [37–39]. Более того, на основе данных об аллозимной изменчивости для популяции тихоокеанской горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* было показано наличие заметных генетических различий (выраженной генетической дифференциации) между поколениями четных и нечетных лет, которые устойчиво сохраняются в череде поколений [37–40]. Как результат каждое поколение характеризуется своим набором и частотой встречаемости генов, что сказывается на демографических параметрах и, соответственно, развитии популяции в целом. Следовательно, модель динамики подобной популяции должна учитывать сезонность размножения, плотностно-зависимую регуляцию и возрастную и генетическую структуру популяции.

Уравнения динамики численности лимитированной популяции с перекрывающимися поколениями с учетом генетического состава имеют вид [41]

$$\begin{cases} X_{n+1} = R_n Y_n \exp(-\alpha X_n - \beta Y_n) \\ Y_{n+1} = s X_n \\ q_{n+1} = \frac{p_n (R_{AA} p_n + R_{Aa} (1 - p_n))}{R_n} \\ p_{n+1} = q_n \end{cases} \quad (6)$$

Здесь q_n – частота аллеля A в младшем возрастном классе; p_n – частота аллеля A в старшем возрастном классе; $R_n = R_{AA} p_n^2 + 2R_{Aa} p_n (1 - p_n) + R_{aa} (1 - p_n)^2$ – средний репродуктивный потенциал зрелого класса (средняя максимально возможная плодовитость особей с учетом выживаемости потомков) в году n ; s – выживаемость особей на втором году жизни. Смысл остальных переменных следует из модели (5).

Аналитическое и численное исследование модели (6) показало, что генетический состав популяции (а именно, будет ли она полиморфной или мономорфной) определяется значениями репродуктивных потенциалов гетерозиготы и гомозигот. При этом режимы динамики численности популяции определяются величиной среднего репродуктивного потенциала зрелых особей и интенсивностью процессов саморегуляции. В свою очередь, эволюционный рост среднего значения репродуктивного потенциала при плотностной регуляции рождаемости приводит к дестабилизации динамики численности возрастных групп, в то время как интенсивность процессов саморегуляции определяет характер возникающих колебаний, поскольку от соотношения степени воздействия численностей разных возрастных групп на снижение рождаемости зависит сценарий потери устойчивости равновесных состояний.

На рис. 3, *а* показано, что значения репродуктивных потенциалов генотипов, представляющих популяцию, определяют сценарии ее развития, соответствующие разному генетическому составу. В случае пониженного репродуктивного потенциала гетерозиготы устойчивы три варианта генетического разнообразия популяции (рис. 3, *а*), одним из которых является полиморфизм, представляющий собой двухлетние колебания генетического состава. Возникающий 2-цикл по переменным p и q устойчив всегда, при этом двухгодичные колебания численности популяции могут бифурцировать как по сценарию Фейгенбаума, так и по сценарию Неймарка–Сакера (рис. 3, *б, в*). Также возникает мультистабильность, на рис. 3, *б* видны области, в которых перекрываются циклы с разными периодами, в частности, этим объясняется нарушение симметрии на карте рис. 3, *б*. Другим примером мультистабильности являются области 3-цикла, нарушающие целостность областей притяжения нетривиального равновесия (области 1_1 и 1_2 на рис. 3, *в*).

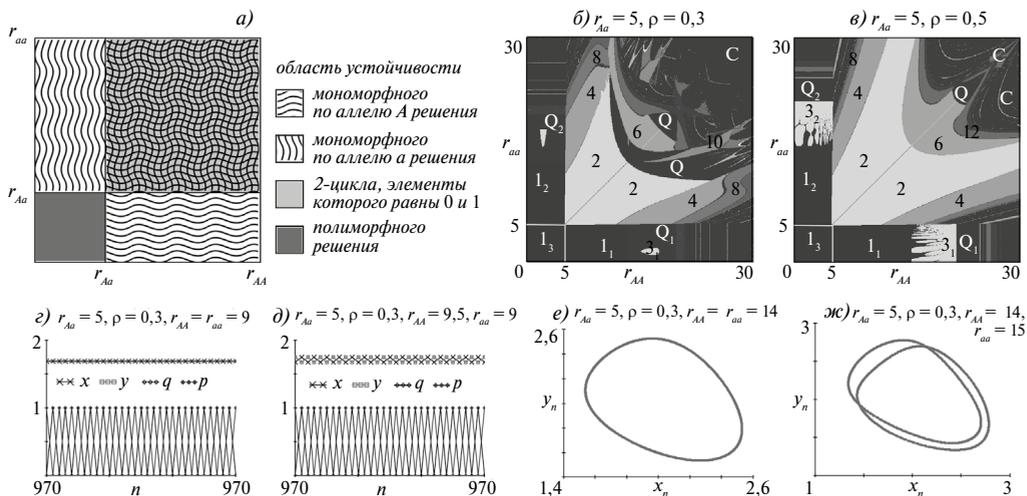


Рис. 3. Карты режимов динамики: *a* – генетического состава; *б–в* – численности популяции, дополненные траекториями (*z, д*) и фазовыми портретами (*е, ж*) модели (6) для начального условия $x_0 = y_0 = 1, q_0 = 0,99, p_0 = 0,01$. Числа соответствуют длине наблюдаемого цикла. Индекс 1 отражает, что популяция мономорфна по аллелю *a*, индекс 2 – популяция мономорфна по аллелю *A*, в областях без индекса генетический состав совершает двухлетние колебания. $\rho = \alpha/(s\beta)$ – относительный вклад младшей возрастной группы в лимитирование процесса воспроизводства. Параметры $r_{AA} = sR_{AA}$, $r_{Aa} = sR_{Aa}$ и $r_{aa} = sR_{aa}$ в этом случае характеризуют репродуктивные потенциалы генотипов *AA, Aa* и *aa* старшего возрастного класса с учетом выживаемости потомков до достижения зрелости

В случае возникновения двухлетних колебаний генетического состава режим динамики численности представляет собой наложение двух аттракторов, характерных для ведущих генотипов, каждой из субпопуляций смежных поколений. Однако численность популяции может стабилизироваться, если значения репродуктивных потенциалов гомозигот равны (рис. 3, *z*). В частности, на картах (рис. 3) видно, что на диагонали, соответствующей случаю равенства репродуктивных потенциалов гомозигот, два аттрактора – элементы 2-цикла совпадают и как результат популяция демонстрирует стабильную динамику. Если же репродуктивные потенциалы гомозигот отличаются, даже незначительно, колебания генетического состава сопровождаются колебаниями численностей возрастных классов (рис. 3, *д*). В области квазипериодической динамики при $r_{aa} = r_{AA}$ два аттрактора совпадают, и наблюдается одна инвариантная кривая (рис. 3, *е, ж*).

Таким образом, при одних и тех же значениях демографических параметров в зависимости от текущего генетического состава существует три пути эволюционного развития популяции (рис. 4, *a*), в рамках каждого из которых динамика численности популяции определяется значением среднего репродуктивного потенциала и процессами саморегуляции (рис. 4, *б*). Так, если закрепится аллель *a* и генотип *aa* вытеснит генотип *AA*, то мономорфная популяция будет демонстрировать нерегулярные колебания в силу высокого репродуктивного потенциала особей ($r_{aa} > r_{AA}$) и плотностной регуляции рождаемости (рис. 4, *д*). При других условиях может сложиться ситуация, что более перспективная форма не способна естественным образом вытеснить явно более слабого по репродуктивным показателям генетического конкурента, и тогда будет наблюдаться стабилизация численности (рис. 4, *е*). Однако возможна ситуация, когда будет реализован полиморфизм в виде 2-цикла, в рамках которого генетический состав будет совершать колебания подобные «бисениям» и оба генотипа будут оказывать влияние на развитие популяции, в результате чего динамика численности популяции также перейдет к колебаниям (рис. 4, *б, ж*). При этом изменение текущей численности может привести к смене наблюдаемого режима динамики, если наблюдается мультирежимность, однако направление эволюции сохранится, если соотношение генотипов не изменится (рис. 4, *в, z*).

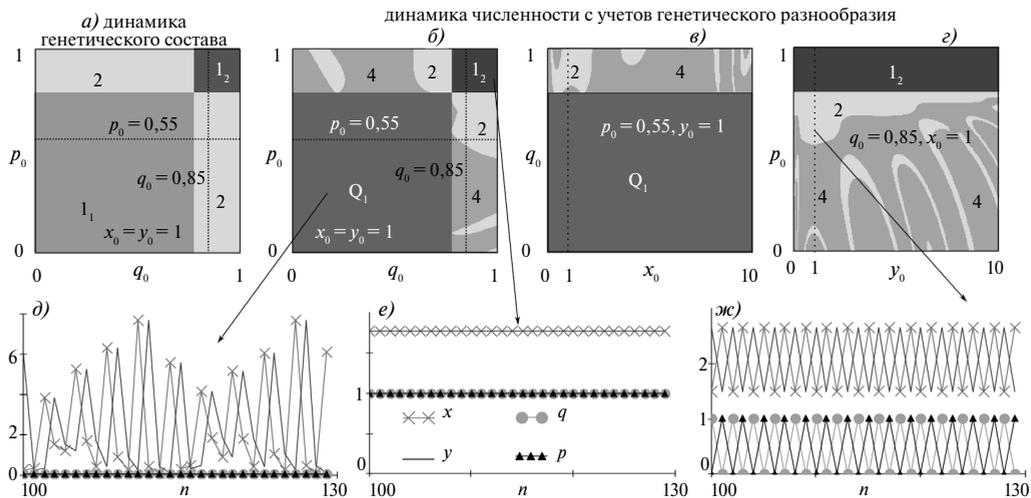


Рис. 4. а–г. Бассейны притяжения режимов динамики модели (6) при $r_{Aa} = 5$, $r_{AA} = 9.9$, $r_{aa} = 22.4$, $\rho = 0,3$. Числа соответствуют длине наблюдаемого цикла. Индекс 1 отражает, что популяция мономорфна относительно аллеля a , индекс 2 – популяция мономорфна относительно аллеля A . д–ж. Динамика генетического состава и численностей возрастных групп популяции

Следует отметить, что выявленные закономерности возникновения и эволюции 2-циклов модели (6) и характер динамического поведения популяции при пониженной приспособленности гетерозиготы в большой степени определяются особенностями жизненного цикла особей, составляющих моделируемую популяцию. Именно жизненный цикл определяет наличие изолированных субпопуляций разных лет, что, в свою очередь, приводит к возможности независимой микроэволюции этих субпопуляций и возникновения сложных сценариев динамики как численности, так и генетической структуры. Закрепление разных адаптивных мутаций постепенно приведет к генетической (а возможно, и морфологической) дифференциации и к различиям в средних репродуктивных потенциалах субпопуляций и достижению ими разного равновесного уровня численности. Дальнейший эволюционный рост репродуктивного потенциала экологически лимитированных субпопуляций приводит к колебаниям их численности, которые могут отличаться не только амплитудой, но и фазой. Обнаруженные в предложенной модели сценарии микроэволюции генетического состава популяции, связанные с колебаниями численности, вполне согласуются с результатами исследования популяции тихоокеанской горбуши, которая демонстрирует не только колебания численности, но и наличие генетически дифференцированных субпопуляций смежных поколений.

Сохранение полиморфизма у песцов под действием циклического отбора

Другой интересный пример для эволюционных исследований представляют собой естественные популяции песца, населяющие прибрежные и континентальные территории; являясь представителями одного вида, эти популяции радикально отличаются по своей репродуктивной стратегии. Прибрежные песцы производят приплод небольшого размера каждый год [42], в то время как репродуктивный успех континентальных песцов значительно варьирует вместе с доступностью их пищевых ресурсов. Континентальные песцы питаются мелкими грызунами, главным образом полевками, численность которых характеризуется циклическими колебаниями [43]. В голодные годы популяции континентальных песцов демонстрируют крайне низкий репродуктивный уровень, а в годы с обильной пищей (когда в популяциях жертвы наблюдается подъем численности) резко увеличивают свою плодовитость [44]. Прибрежные песцы питаются морскими птицами, рыбой, тюленями

и морскими беспозвоночными [45]. Из года в год наблюдаются лишь очень небольшие колебания доступности этих ресурсов. Это позволило предположить, что прибрежные песцы однородны по размеру помета, а континентальные неоднородны и представлены особями с разной потенциальной плодовитостью. В работе Т.И. Аксенович и соавторов [33] на основе комплексного сегрегационного анализа типа наследования размера приплода в расширенной генеалогии фермерских песцов было показано, что данный признак является аутосомным женским признаком, а его наследование можно описать в рамках модели с основным геном и контролем малого размера приплода по рецессивному типу.

Для объяснения существующего генетического разнообразия по размеру помета в различных (естественных и искусственных) популяциях песцов Аксенович и др. [33] была использована смешанная модель с однолокусным основным геном. В соответствии с проведенными оценками полагалось, что самки с генотипами AA и Aa производят большие пометы (со средним m_1 щенков на помет) каждый год, а самки aa – маленькие (со средним m_2). Далее предполагалось, что коэффициент выживаемости щенков из маленьких пометов, произведенных матерями с генотипом aa , в k раз превосходит выживаемость щенков из больших пометов, произведенных матерями с генотипами Aa и AA ; было предложено следующее уравнение динамики частоты аллеля a в череде поколений:

$$p_a(n) = p_a(n-1) \frac{m_1 - p_a(n-1)(m_1 - km_2)}{m_1 - p_a^2(n-1)(m_1 - km_2)}.$$

Это уравнение оказывается эквивалентно частному случаю классической модели отбора по признаку, влияющему на приспособленность особей и контролирующемуся одним аутосомным диаллельным локусом в менделевской панмиктической изолированной популяции диплоидных организмов [32]. Условие установления полиморфизма в данной модели представляет собой довольно строгое ограничение на соотношение выживаемости потомства в больших и малых пометах в голодные годы: $1.666 < k < 1.718$.

Отметим, что рассматриваемую ситуацию более точно описывает модель действия отбора по признаку, ограниченному полом, влияющему на приспособленность и проявляющемуся у женской части популяции. При построении такой модели естественно сделать следующие основные предположения:

1. Признак аутосомный, т.е. генотип потомка определяют оба родителя.
2. Приспособленность w_{ij} определяется генотипом матери как произведение **средней** выживаемости v_{ij} женских особей с генотипом ij на **среднее** число потомков m_{ij} , произведенных одной женской особью этого генотипа.
3. Считаем, что частоты генов одинаковы в мужской и женской частях популяции, однако на этапе вывода модели необходимо рассматривать процесс размножения с учетом разделения полов, так как важно отследить влияние генотипа матери.

В работе [46] получены уравнения динамики частот генотипов в популяции с перекрывающимися поколениями, находящейся под действием отбора по признаку, ограниченному полом, влияющему на приспособленность и проявляющемуся у женской части популяции. Рассматривается диаллельный признак с произвольным доминированием и предполагается, что условия среды не меняются:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{AA}(n+1) = \left(w_{AA} p_{AA}(n) + \frac{1}{2} w_{Aa} p_{Aa}(n) \right) (p_{AA}(n) + \frac{1}{2} p_{Aa}(n)) / W(n), \\ p_{Aa}(n+1) = \left\{ \frac{1}{2} w_{Aa} p_{Aa}(n) + w_{AA} p_{AA}(n) \left(1 - p_{AA}(n) + \frac{1}{2} p_{Aa}(n) \right) + \right. \\ \left. + w_{aa} (1 - p_{AA}(n) - p_{Aa}(n)) (p_{AA}(n) + \frac{1}{2} p_{Aa}(n)) \right\} / W(n), \end{array} \right. \quad (7)$$

где $p_{AA}(n)$, $p_{Aa}(n)$ и p_{aa} – частоты соответствующих генотипов в n -м поколении, w_{ij} – приспособленность генотипа ij женской части популяции, представляет произведение **средней**

выживаемости v_{ij} женских особей с генотипом ij на **среднее** число потомков m_{ij} , произведенных одной женской особью этого генотипа,

$$W(n) = w_{AA} p_{AA}(n) + w_{Aa} p_{Aa}(n) + w_{aa} (1 - p_{AA}(n) - p_{Aa}(n)).$$

Для однородной популяции результаты анализа влияния различной длины цикла и соотношения репродуктивных потенциалов генотипов на область существования полиморфизма оказываются вполне ожидаемыми. Материнский отбор всегда расширяет область полиморфизма по сравнению с простым отбором; удлинение внешнего цикла ожидаемо сужает ее, так же, как и уменьшение разницы в репродуктивных потенциалах генотипов (рис. 5).

Считается, что возможности поддержания полиморфизма в условиях изменяющейся среды значительно увеличиваются не только за счет материнских генетических эффектов [31], но и перекрывающихся поколений [28, 47]. Далее мы рассмотрели комплексное влияние сразу двух этих факторов на поддержание полиморфизма в циклически изменяющихся условиях, представленных несимметричным циклическим отбором, позволяющим описывать флуктуации внешних условий по аналогии с циклами пищевых ресурсов песцов с редкими всплесками численности жертвы и долгими спадами. Такая динамика внешней среды создает условия для реализации r -, K -отбора, при котором одни генотипические группы быстрее размножаются и, соответственно, имеют больший репродуктивный потенциал r (r -стратегия), другие – более приспособлены к условиям ограниченности жизненных ресурсов и обеспечивают большую равновесную численность K при заданной емкости экологической ниши (K -стратегия) [12, 48]. При несимметричных циклах внешних условий большую часть времени преимущество оказывается у рецессивного генотипа, который обладает меньшим репродуктивным потенциалом, но более приспособлен к ограничениям по пищевым ресурсам.

Результаты действия комплекса факторов – материнского отбора и перекрывающихся поколений оказались значительно менее предсказуемы [49]. В большинстве случаев можно наблюдать расширение области полиморфизма за счет перекрывающихся поколений, однако четные и нечетные циклы создают разные формы областей существования полиморфизма с отличающимися эффектами. Так, нечетные внешние циклы при низкой выживаемости особей репродуктивного возраста дают лишь незначительное расширение области существования полиморфизма; с ростом выживаемости репродуктивных особей эта область расширяется, а расширение области за счет материнского отбора плавно уменьшается.

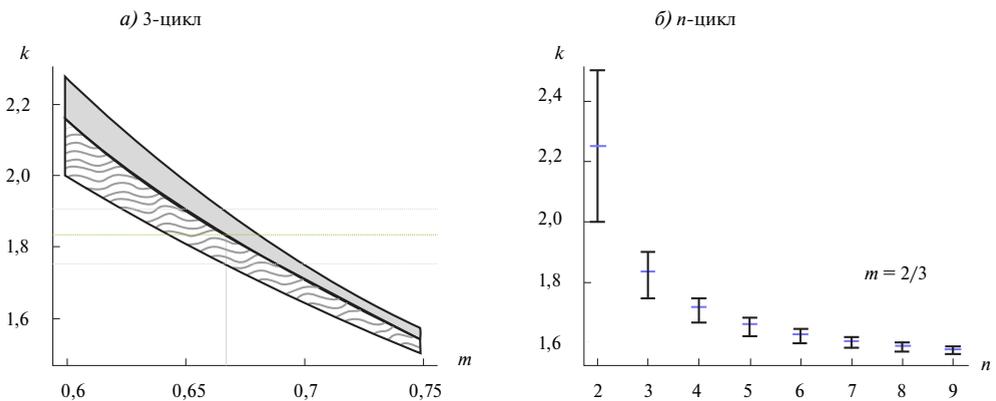


Рис. 5. а. Границы существования полиморфизма для 3-годовых циклов при изменяющемся значении m . Заштрихованная область – полиморфизм в случае простого отбора; расширение области за счет отбора по материнской линии закрашено серым. б. Границы существования полиморфизма для 2–9-летних циклов (n – длина цикла) при $m = 2/3$. Простому отбору соответствует нижняя и средняя граница интервала, материнскому – нижняя и верхняя

Для четных циклов, наоборот, при небольшой выживаемости репродуктивной группы характерно наибольшее расширение области полиморфизма; при этом материнской отбор лишь немного расширяет область полиморфизма относительно простого, а при некоторых значениях выживаемости репродуктивной группы даже сужает ее. Вариация соотношения репродуктивных потенциалов генотипов (m) при нечетных циклах практически не меняет форму области существования «защищенного полиморфизма», лишь изменяя диапазон значений k , в которых сохраняется полиморфизм.

Проведенное моделирование имеет ясную биологическую интерпретацию, так как при построении моделей мы в значительной степени ориентировались на ситуацию, наблюдаемую у песцов. Один из основных признаков жизненного цикла этих животных – размер помета – является ограниченным полом женским признаком, который подвержен материнскому отбору с циклическими флуктуациями из-за циклов кормовых ресурсов. При этом внешний цикл оказывается несимметричным, так как в течение этого цикла есть только один пик ресурсов и три такта с малым их количеством; наиболее плодовитый доминантный генотип при ограничении пищевых ресурсов оказывается менее приспособленным, чем рецессивный генотип с меньшей плодовитостью. Кроме того, песцы являются долгоживущим видом, характеризующимся стадийной структурой. А вопрос о подержании полиморфизма по размеру помета у этого вида не вполне ясен. Моделирование, проведенное в наших работах, учитывающее, что данный признак подвержен материнскому отбору, позволяет расширить диапазон значений k , обеспечивающих поддержание полиморфизма. Кроме того, обобщение модели отбора на популяцию с двумя стадиями развития позволило увидеть, что полиморфизм возможен в еще более широких границах значений рассматриваемого параметра. Поддержанию полиморфизма в континентальных популяциях песцов может также способствовать приток генов из прибрежных популяций за счет миграций, в результате отбор по материнской линии и наличие возрастной структуры увеличивают возможность сохранения полиморфизма в популяции континентальных песцов.

Моделирование эволюционной динамики сообщества «хищник–жертва»

Далее рассмотрим эколого-генетическую модель сообщества «хищник–жертва», которая в явном виде описывает менделевский механизм наследования одного из признаков жизненного цикла хищника, его репродуктивный уровень. При моделировании мы ориентировались на сообщество «песец – мышевидные грызуны», представляющее собой пример межвидового взаимодействия типа «хищник – жертва», при описании которого важно учитывать не только экологические переменные, но и генетическую структуру хищника. Поскольку один из важнейших признаков жизненного цикла песца – размер помета определяется генетически одним диаллельным локусом, то использование однолокусной диаллельной модели наследования в данном случае вполне оправдано. При ограниченности ресурсов питания (в данном случае при малой численности мышевидных грызунов – жертвы) в больших и малых пометах песцов выживаемость щенков отличается, поэтому рассматриваемый локус определяет не только репродуктивный уровень, но и выживаемость потомства в популяции песцов, т.е. его можно считать плейотропным. Вместе с тем выживаемость песцов, особенно в больших пометах, будет существенно зависеть от уровня обеспеченности кормом – от численности жертвы – мышевидных грызунов в данном случае. Для моделирования такой ситуации вместо постоянных приспособленностей генотипов, используемых в классических работах, введем функциональную зависимость приспособленностей генотипических групп хищника от численности жертвы. В соответствии с этим текущая абсолютная приспособленность генотипа хищника, представляющая собой произведение рождаемости и выживаемости, определяются теперь не только его собственным генотипом, но и численностью жертвы.

Такая постановка позволяет продолжить исследования механизма дифференциации репродуктивных стратегий в естественных популяциях песцов. Выше мы рассмотрели динамику генетического состава локальной популяции, учитывая циклы кормовой базы с помощью периодически изменяющихся параметров. Такое упрощение позволило оценить

степень влияния особенностей наследования размера помета (ограниченность полом этого признака), а также наличие возрастной структуры в популяции на условия существования полиморфизма по рассматриваемому признаку. Изменение цикла кормовой базы может значительно изменять условия существования полиморфизма, при этом реальная динамика жертвы может быть достаточно разнообразна, начиная от стационарной и строго периодической и заканчивая нестрогими (или зашумленными) циклами и даже нерегулярными колебаниями. Явное включение в модель популяционной динамики жертвы и рассмотрение полного сообщества вместо локальной популяции позволит избавиться от искусственного циклически изменяющегося параметра, вариация значений которого весьма ограничена, и оценить возможности поддержания полиморфизма в популяциях хищника в более реалистичных условиях.

Полагаем, что различные генотипы хищника отличаются по репродуктивному потенциалу и неодинаково приспособлены и к ограничению по пищевым ресурсам, т.е. приспособленности функционально зависят от численности жертвы. Модель представлена уравнениями с дискретным временем, что позволяет учитывать ярко выраженную цикличность жизненного цикла видов, составляющих сообщество.

$$\begin{cases} x(n+1) = bx(n)(1-x(n)) - \alpha \cdot y(n) \cdot \psi(n) \\ y(n+1) = \bar{w}(n) \cdot y(n) \cdot (1-y(n)) \\ p(n+1) = p(n) \left(w_{AA}(x(n))p(n) + w_{Aa}(x(n))(1-p(n)) \right) / \bar{w}(n) \end{cases} \quad (8)$$

Здесь $x(n)$ и $y(n)$ – относительные численности жертвы и хищника соответственно; $p(n)$ – частота аллеля A в популяции хищника, n – сезон размножения; b – репродуктивный потенциал жертвы, r_{ij} – репродуктивный потенциал или максимально возможное значение коэффициента рождаемости и, соответственно, максимально возможное значение приспособленности ij -го генотипа, c_{ij} – константа полунасыщения хищника ij -го генотипа, выраженная в относительных единицах.

$$w_{ij}(x(n)) = \frac{r_{ij} \cdot x(n)}{c_{ij} + x(n)} \quad \text{– функция приспособленности } ij\text{-го генотипа хищника,}$$

$\bar{w}(n) = w_{AA}(x(n))p(n)^2 + 2w_{Aa}(x(n))p(n)(1-p(n)) + w_{aa}(x(n))(1-p(n))^2$ – средняя приспособленность популяции хищника, $\psi(n) = x(n) \left(\frac{p(n)^2}{c_{AA} + x(n)} + \frac{2p(n)(1-p(n))}{c_{Aa} + x(n)} + \frac{(1-p(n))^2}{c_{aa} + x(n)} \right)$ –

средневзвешенная по генетическому составу хищника доля (от максимально возможного количества) жертвы, потребляемая в данном сезоне одним хищником.

Аналитическое и численное исследование предложенной модели (8) показало [50], что направление эволюции популяции, как и в классической модели отбора с постоянными приспособленностями генотипов, определяется взаимным расположением приспособленностей генотипов хищника, при этом характер динамики обусловлен уже набором параметров, характеризующих репродуктивные способности жертвы и хищника, а также характеристиками межвидового взаимодействия. То есть при повышенной приспособленности гетерозиготы устанавливается полиморфизм, при промежуточной под действием направленного отбора происходит планомерное вытеснение неоптимального генотипа, а в случае пониженной приспособленности гетерозиготы наблюдается бистабильность двух мономорфных равновесий, в каждом из которых может оказаться популяция, в зависимости от начальных условий. Причем при нестационарной динамике жертвы (что весьма характерно для естественных популяций) область бистабильности в генетически различных мономорфных состояниях хищника характеризуется различной динамикой популяций, составляющих сообщество. При этом бассейны притяжения мономорфных равновесий обладают фрактальной структурой, т.е. небольшое изменение численности хищника или жертвы за счет случайных факторов может привести к закреплению другого аллеля в популяции хищника и смене динамического режима численности сообщества.

Возможность нарушения реализации классических эволюционных сценариев (приведенных выше) связана с тем, что приспособленности генотипов зависят от текущей численности жертвы, которая может стабилизироваться в стационарном состоянии или флуктуировать, не достигая его и изменяя значения приспособленностей различных генотипов хищника. и если хищник неоднороден по плодовитости и приспособленности к ограничению пищевых ресурсов, то в разных фазах динамики жертвы меняется направление отбора в популяции хищника. Таким образом, флуктуации обилия жертвы порождают разнонаправленный естественный отбор у хищника, при котором взаимное расположение приспособленностей его генотипов меняется. Здесь появляются радикально отличающиеся сценарии эволюции хищника, обусловленные различными репродуктивными способностями жертвы. Отметим, что этот эффект возникает в естественной ситуации, когда более плодовитые генотипы хищника более требовательны к обилию пищевых ресурсов (как у песцов). Так, при небольшом уровне воспроизводства в популяции жертвы происходит вытеснение гомозигот с большим репродуктивным потенциалом и требованиями к пищевым ресурсам, что приводит к установлению мономорфизма; при большем репродуктивном потенциале жертвы отбор идет уже против гомозигот, побеждавших в предыдущих условиях, а жертва с еще большей плодовитостью (приводящей к значительным флуктуациям ее популяционной численности) создает хищнику условия, в которых он сохраняет оба аллеля; для такого полиморфизма характерны долгие процессы вытеснения и накопления аллелей, не приводящие к полной потере ни одного из них, и значительно отличающаяся визуально динамика численности в разных фазах этого процесса, что может распознаваться наблюдателем как смена динамического режима в популяции любого из видов сообщества (рис. 6). При этом приспособленность гетерозиготы занимает промежуточное положение, т.е. при больших и малых численностях жертвы максимальными являются приспособленности противоположных гомозигот, и в рамках классической теории естественного отбора установление полиморфизма при таких условиях было бы невозможно.

Отметим, что подобный флуктуирующий полиморфизм может существовать в естественных популяциях континентальных песцов, поскольку в отсутствие сверхдоминирования (из-за рецессивного типа наследования пометов большого размера у песца) значительные колебания численности мышевидных грызунов, являющихся их основным пищевым ресурсом, интенсивно меняют условия естественного отбора для своего хищника, и в результате ни один из имеющихся аллелей не исчезает. В свою очередь, неодинаковое давление

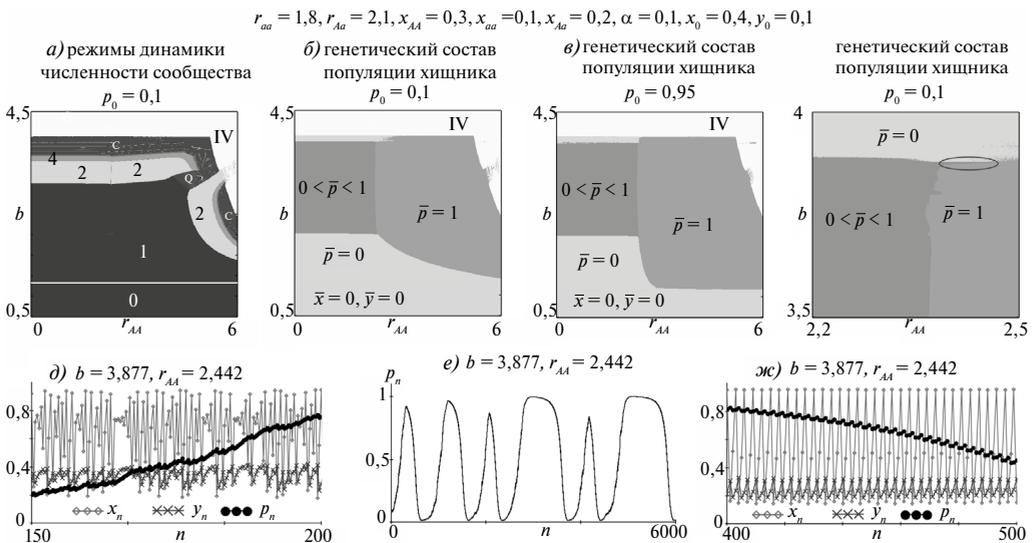


Рис. 6. Полиморфизм хищника: а – карта динамических режимов численности популяций сообщества; б–г – карта генетического состава хищника; д–ж – примеры динамики: полиморфизм хищника и смена динамического режима в популяции жертвы

хищника на популяцию жертвы в разных фазах динамики его генетического состава может влиять уже на характер динамики самой жертвы. Это влияние может быть одной из причин наблюдаемой смены динамического режима в природных популяциях грызунов, сообщения о которых неоднократно появлялись в печати, например изменение цикла в популяциях лемминга *Lemmus lemmus* на юге Норвегии [51] и красно-серой полевки *Clethrionomys rufocanus*, обитающей в Финляндии [52].

Заключение

В данном обзоре предлагается некоторое обобщение экологического и генетического подходов в задачах, традиционно рассматриваемых в математической популяционной биологии. Это обобщение происходит путем объединения математических моделей динамики численности популяций и математических моделей естественного отбора. Показано, что эволюционное изменение частот аллелей, сопровождающееся ростом средней приспособленности популяции, может привести к циклическим и хаотическим режимам динамики ее численности. При этом на фоне колебаний численности появляются условия для возникновения «конкуренции» между генотипами, чувствительными к уровню численности. Действие такого отбора приводит к возникновению сложных режимов динамики уже не только численности, но и генетической структуры популяции. Таким образом, показаны возможные механизмы появления очень сложной временной организации генетического биоразнообразия, весьма чувствительной к внешнему воздействию. Более того, при учете возрастной структуры популяций в моделях возникает мультирежимность, которая не только позволяет объяснить смену режима динамики, но и по-новому взглянуть на общепризнанные представления о существующих закономерностях в динамике популяций. Такая мультирежимность, наблюдаемая при одних и тех же значениях популяционных параметров, в ситуации случайной вариации текущего возрастного и/или генетического состава популяции может привести не только к смене динамического режима за счет эволюционного роста приспособленности особей, но и к смене направления эволюции. Более того, подобные сценарии микроэволюции генетического состава популяции, связанные с колебаниями численности, позволяют объяснять и описывать выраженную генетическую дифференциацию особей разных поколений в популяциях с сезонным характером размножения. В частности, разработанные нами модели позволили объяснить происхождение различий в генетической структуре у смежных поколений тихоокеанской горбуши *Oncorhynchus gorbuscha*. Такие различия выявлены биологами у многих локальных субпопуляций горбуши. Также наши модели хорошо объясняют полиморфизм (существующего генетического разнообразия) по размеру помета в различных (естественных и искусственных – фермерских) популяциях песцов *Alopex lagopus*. Кроме того, разработанные нами модели позволяют объяснить как возникновение, так и прекращение колебаний численности ряда видов грызунов, которое наблюдается в последнее время во многих северных популяциях Западной Европы (например, исчезновения популяционных циклов полевок в ряде популяций Финляндии и Швеции).

В целом выявленные особенности динамического поведения подобных систем важны с точки зрения пересмотра и развития устоявшихся теоретических представлений, поскольку в таких системах нарушается принцип простого объединения (суперпозиции) результатов двух моделей: плотно-независимого естественного отбора лучших генотипов и плотно-зависимой регуляции роста численности; появляются режимы, которые не наблюдались отдельно в каждой из моделей – колебания частот генов, колебания численности, связанные, в частности, с колебаниями мальтузианского параметра – среднего значения репродуктивного потенциала, и многое другое.

Следует отметить, что для дальнейшего развития эколого-генетического подхода просматриваются серьезные сложности, связанные с качественной верификацией и калибровкой (привязкой к конкретным природным популяциям и сообществам) исследуемых моделей. Для оценки используемых экологических и генетических параметров необходимы данные как экологического, так и генетического мониторинга за естественными биологическими популяциями на длительном временном промежутке. Получить такие данные удовлетворительного

объема и содержания крайне сложно. Вместе с тем достигнутые предварительные результаты позволяют определить вектор будущих исследований и со сдержанным оптимизмом надеяться на достойное их продолжение. В целом же эколого-генетический подход открывает большие перспективы для изучения эволюции естественных популяций, а также прогнозирования изменений, связанных с антропогенным воздействием и изменением климата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мальтус Т. Опыт о законе народонаселения. М.: Директмедиа Пабблишинг, 2007. 358 с.
2. Darwin C. On the Origin of Species by Means of Natural Selection. London: John Murray, 1859. 440 p.
3. Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б. Биофизическая динамика продукционных процессов. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 464 с.
4. Свиричев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.
5. Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2003. 367 с.
6. Шапиро А.П., Луппов С.П. Рекуррентные уравнения в теории популяционной биологии. М.: Наука, 1983. 132 с.
7. May R.M. Biological populations with non-overlapping generations: stable points, stable cycles and chaos // Science. 1974. Vol. 186. P. 645–647.
8. May R.M. Biological diversity: How many species are there? // Nature. 1986. Vol. 324, No. 6097. P. 514–515.
9. Chitty D. Population processes in the vole and their relevance to general theory // Can. J. Zool. 1960. Vol. 38. P. 99–113.
10. Pimentel D. Population regulation and genetic feedback // Science. 1968. Vol. 159. P. 1432–1437. <https://doi.org/10.1126/science.159.3822.1432>
11. Birch L.C. Selection in *Drosophila pseudoobscura* in relation to crowding // Evolution. 1955. Vol. 9, No. 4. P. 389–399.
12. Charlesworth B. Selection in density-regulated populations // Ecology. 1971. Vol. 52, No. 3. P. 469–474.
13. Gottlieb L.D. Genetic stability in a peripheral isolate of *Stephanomeria exigua* ssp. *coronaria* that fluctuates in population size // Genetics. 1974. Vol. 76, No. 3. P. 551–556.
14. Gaines M.S., Leroy R., McClenaghan Jr., Rose R.K. Temporal patterns of allozymic variation in fluctuating populations of *Microtus ochrogaster* // Evolution. 1978. Vol. 32, No. 4. P. 723–739.
15. Фрисман Е.Я. Изменение характера динамики численности популяции: механизмы перехода к хаосу // Вестн. ДВО РАН. 1995. № 4. С. 97–106.
16. Boonstra R., Boag P.T. A test of the Chitty hypothesis: inheritance of life-history traits in meadow voles *Microtus pennsylvanicus* // Evolution. 1987. Vol. 41, No. 5. P. 929–947.
17. Carroll S.P., Hendry A.P., Reznick D.N., Fox C.W. Evolution on ecological time-scales // Func. Ecol. 2007. Vol. 21, No. 3. P. 387–393.
18. Endler J.A. Natural selection on color patterns in *Poecilia reticulata* // Evolution. 1980. Vol. 34, No. 1. P. 76–91.
19. Reznick D.N., Bryga H. Life-history evolution in guppies (*Poecilia reticulata*): 1. Phenotypic and genetic changes in an introduction experiment // Evolution. 1987. Vol. 41, No. 6. P. 1370–1385.
20. Reznick D.A., Bryga H., Endler J.A. Experimentally induced life-history evolution in a natural population // Nature. 1990. Vol. 346, No. 6282. P. 357–359.
21. Stearns S.C. The Evolution of Life Histories. Oxford: Oxford University Press, 1992. 264 p.
22. Williams D.W., Liebhold A. Detection of Delayed Density Dependence: Effects of Autocorrelation in an Exogenous Factor // Ecology. 1995. Vol. 76, No. 3. P. 1005–1008.
23. Sinervo B., Svensson E., Comendant T. Density cycles and an offspring quantity and quality game driven by natural selection // Nature. 2000. Vol. 406. P. 985–988.
24. Yoshida T., Jones L.E., Ellner S.P., Fussmann G.F., Hairston Jr.N.G. Rapid evolution drives ecological dynamics in a predator–prey system // Nature. 2003. Vol. 424. P. 303–306.
25. Pelletier F., Garant D., Hendry A.P. Eco-evolutionary dynamics // Phil. Trans. R. Soc. B. 2009. Vol. 364. P. 1483–1489.

26. Mallet J. The struggle for existence. How the notion of carrying capacity, K , obscures the links between demography, Darwinian evolution and speciation // *Evolutionary Ecology Research*. 2012. Vol. 14. P. 627–665.
27. Bertram J., Masel J. Density-dependent selection and the limits of relative fitness // *Theor. Popul. Biol.* 2019. Vol. 129. P. 81–92.
28. Ellner S. Environmental fluctuations and the maintenance of genetic diversity in age or stage-structured populations // *Bull. Math. Biol.* 1996. Vol. 58, No. 1. P. 103–127.
29. Barton N., Briggs D., Eisen J., Goldstein D., Patel N. *Evolution*. N.Y.: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2007. 649 p.
30. Yamamichi M., Ellner S.P. Antagonistic coevolution between quantitative and Mendelian traits // *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 2016. Vol. 283. 20152926.
31. Yamamichi M., Hosono M. Roles of maternal effects in maintaining genetic variation: Maternal storage effect // *Evolution*. 2017. Vol. 71, No. 2. P. 449–457.
32. Ратнер В.А. Динамическая теория биологических популяций. М.: Наука, 1974. 456 с.
33. Ахенович Т.И., Зорколтсева И.В., Акбердин И.Р., Бекетов С.В., Каштанов С.Н., Захаров И.А., Борodin P.M. Inheritance of litter size at birth in farmed arctic foxes (*Alopex lagopus*, Canidae, Carnivora) // *Heredity*. 2007. Vol. 98, No. 2. P. 99–105.
34. Дажо Р. Основы экологии. М.: Прогресс, 1975. 416 с.
35. Фрисман Е.Я., Жданова О.Л. Эволюционный переход к сложным режимам динамики численности двухвозрастной популяции // *Генетика*. 2009. Т. 45, № 9. С. 1277–1286.
36. Неверова Г.П., Жданова О.Л., Фрисман Е.Я. Возникновение сложных режимов динамики численности в ходе эволюции структурированной лимитированной популяции // *Генетика*. 2020. Т. 56, № 7. С. 714–725.
37. Животовский Л.А., Глубоковский М.К., Викторковский Р.М., Броневский А.М., Афанасьев К.И., Ефремов В.В. и др. Генетическая дифференциация горбуши // *Генетика*. 1989. Т. 25, № 7. С. 1261–1274.
38. Пустовойт С.П. Тридцать лет гипотезе флуктуирующих стад горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum) // *Известия ТИНРО*. 2017. Т. 188. С. 162–172.
39. Sato S., Urawa S. Genetic variation of Japanese pink salmon populations inferred from nucleotide sequence analysis of the mitochondrial DNA control region // *Environmental Biology of Fishes*. 2017. Vol. 100, No. 10. P. 1355–1372.
40. Ефремов В.В. Аллозимная изменчивость горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* Сахалина // *Вопросы ихтиологии*. 2002. Т. 42, № 3. С. 409–417.
41. Неверова Г.П., Фрисман Е.Я. Режимы динамики популяции с неперекрывающимися поколениями с учетом генетической и стадийной структур // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020. Т. 12, № 5. С. 1165–1190.
42. Hersteinsson P., Macdonald D.W. Diet of Arctic foxes (*Alopex lagopus*) in Iceland // *J. Zool.* 1996. Vol. 240. P. 457–474.
43. Angerbjörn A., Tannerfeldt M., Erlinge S. Predator-prey relationships: Arctic foxes and lemmings // *J. Anim Ecol.* 1999. Vol. 68. P. 34–49.
44. Elmhagen B., Tannerfeldt M., Verucci P., Angerbjörn A. The arctic fox (*Alopex lagopus*) – an opportunistic specialist // *J. Zool.* 2000. Vol. 251. P. 139–149.
45. Володин И.А., Калашникова М.В., Клинкава Е.С. и др. Структура поселения песца *Alopex lagopus beringensis* на северной оконечности острова Беринга // *Зоологический журнал*. 2012. Т. 91, № 10. С. 1231–1231.
46. Жданова О.Л., Фрисман Е.Я. Математическое моделирование отбора по ограниченному полом признаку: к вопросу о существовании полиморфизма по размеру помета в естественных популяциях песцов // *Генетика*. 2021. Т. 57, № 2. С. 229–240.
47. Turelli M., Schemske D.W., Bierzychudek P. Stable two-allele polymorphisms maintained by fluctuating fitnesses and seed banks: protecting the blues in *Linanthus parryae* // *Evolution*. 2001. Vol. 55. P. 1283–1298.
48. MacArthur R.H., Wilson E.O. *The Theory of Island Biogeography*. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1967.
49. Zhdanova O.L., Frisman E.Ya. Genetic polymorphism under cyclical selection in long-lived species: the complex effect of age structure and maternal selection // *Journal of Theoretical Biology*. 2021. Vol. 512. 110564.
50. Жданова О.Л., Неверова Г.П., Фрисман Е.Я. Эволюция хищника в модели взаимодействующих видов: к вопросу о существовании полиморфизма по размеру помета в естественных популяциях песцов // *Генетика*. 2022. Т. 58, № 1. С. 99–115.

51. Kausrud K.L., Mysterud A., Steen H. et al. Linking climate change to lemming cycles // *Nature*. 2008. Vol. 456. P. 93–97.
52. Henttonen H., Wallgren H. Small rodent dynamics and communities in the birch forest zone of northern Fennoscandia // *Nordic Mountain Birch Ecosystems*/Ed. F.E. Wielgolaski. New York: Parthenon, 2001. P. 262–278.

REFERENCES

1. Malthus T.R. *An Essay on the Principle of Population*. London: Yale University Press; 2018. 448 p.
2. Darwin C. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*. London: John Murray; 1859. 440 p.
3. Rizinchenko G.Yu., Rubin A.B. *Biofizicheskaya dinamika produktsionnykh protsessov*. Moscow; Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy; 2004. 464 s. (In Russ.).
4. Svirezhev Yu.M., Logofet D.O. *Ustoychivost' biologicheskikh soobshchestv*. Moscow: Nauka; 1978. 352 s. (In Russ.).
5. Bazykin A.D. *Nelineynaya dinamika vzaimodeystviyushchikh populyatsiy*. Moscow; Izhevsk: In-t Kompyut. Issled.; 2003. 367 s. (In Russ.).
6. Shapiro A.P., Luppov S.P. *Rekurrentnye uravneniya v teorii populyatsionnoi biologii*. Moscow: Nauka; 1983. 132 s. (In Russ.).
7. May R.M. Biological populations with non-overlapping generations: stable points, stable cycles and chaos. *Science*. 1974;186:645–647.
8. May R.M. Biological diversity: How many species are there? *Nature*. 1986;324(6097):514–515.
9. Chitty D. Population processes in the vole and their relevance to general theory. *Can. J. Zool.* 1960;38:99–113.
10. Pimentel D. Population regulation and genetic feedback. *Science*. 1968;159:1432–1437. <https://doi.org/10.1126/science.159.3822.1432>
11. Birch L.C. Selection in *Drosophila pseudoobscura* in relation to crowding. *Evolution*. 1955;9(4):389–399.
12. Charlesworth B. Selection in density-regulated populations. *Ecology*. 1971;52(3):469–474.
13. Gottlieb L.D. Genetic stability in a peripheral isolate of *Stephanomeria exigua* ssp. *coronaria* that fluctuates in population size. *Genetics*. 1974;76(3):551–556.
14. Gaines M.S., Leroy R., McClenaghan Jr., Rose R.K. Temporal patterns of allozymic variation in fluctuating populations of *Microtus ochrogaster*. *Evolution*. 1978;32(4):723–739.
15. Frisman E.Ya. *Izmeneniye kharaktera dinamiki chislennosti populyatsii: mekhanizmy perekhoda k khaosu*. *Vestnik of the FEB RAS*. 1995;(4):97–106. (In Russ.).
16. Boonstra R., Boag P.T. A test of the Chitty hypothesis: inheritance of life-history traits in meadow voles *Microtus pennsylvanicus*. *Evolution*. 1987;41(5):929–947.
17. Carroll S.P., Hendry A.P., Reznick D.N., Fox C.W. Evolution on ecological time-scales. *Func. Ecol.* 2007;21(3):387–393.
18. Endler J.A. Natural selection on color patterns in *Poecilia reticulata*. *Evolution*. 1980;34(1):76–91.
19. Reznick D.N., Bryga H. Life-history evolution in guppies (*Poecilia reticulata*): 1. Phenotypic and genetic changes in an introduction experiment. *Evolution*. 1987;41(6):1370–1385.
20. Reznick D.A., Bryga H., Endler J.A. Experimentally induced life-history evolution in a natural population. *Nature*. 1990;346(6282):357–359.
21. Stearns S.C. *The Evolution of Life Histories*. Oxford: Oxford University Press; 1992. 264 p.
22. Williams D.W., Liebold A. Detection of Delayed Density Dependence: Effects of Autocorrelation in an Exogenous Factor. *Ecology*. 1995;76(3):1005–1008.
23. Sinervo B., Svensson E., Comendant T. Density cycles and an offspring quantity and quality game driven by natural selection. *Nature*. 2000;406:985–988.
24. Yoshida T., Jones L.E., Ellner S.P., Fussmann G.F., Hairston Jr.N.G. Rapid evolution drives ecological dynamics in a predator–prey system. *Nature*. 2003;424:303–306.
25. Pelletier F., Garant D., Hendry A.P. Eco-evolutionary dynamics // *Phil. Trans. R. Soc. B*. 2009;364:1483–1489.
26. Mallet J. The struggle for existence. How the notion of carrying capacity, K, obscures the links between demography, Darwinian evolution and speciation. *Evolutionary Ecology Research*. 2012;14:627–665.

27. Bertram J., Masel J. Density-dependent selection and the limits of relative fitness. *Theor. Popul. Biol.* 2019;129:81–92.
28. Ellner S. Environmental fluctuations and the maintenance of genetic diversity in age or stage-structured populations. *Bull. Math. Biol.* 1996;58(1):103–127.
29. Barton N., Briggs D., Eisen J., Goldstein D., Patel N. *Evolution*. N.Y.: Cold Spring Harbor Laboratory Press; 2007. 649 p.
30. Yamamichi M., Ellner S.P. Antagonistic coevolution between quantitative and Mendelian traits. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 2016;283. 20152926.
31. Yamamichi M., Hosono M. Roles of maternal effects in maintaining genetic variation: Maternal storage effect. *Evolution*. 2017;71(2):449–457.
32. Ratner V.A. *Dinamicheskaya teoriya biologicheskikh populyatsii*. Moscow: Nauka; 1974. 456 s. (In Russ.).
33. Axenovich T.I., Zorkoltseva I.V., Akberdin I.R., Beketov S.V., Kashtanov S.N., Zakharov I.A., Borodin P.M. Inheritance of litter size at birth in farmed arctic foxes (*Alopex lagopus*, Canidae, Carnivora). *Heredity*. 2007;98(2):99–105.
34. Dazho R. *Osnovy ehkologii*. Moscow: Progress; 1975. 416 s. (In Russ.).
35. Frisman E.Y., Zhdanova O.L. Evolutionary transition to complex population dynamic patterns in a two-age population. *Russ. J. Genet.* 2009;45(9):1124–1133.
36. Neverova G.P., Zhdanova O.L., Frisman E.Y. The emergence of complex dynamics during the evolution of a structured limited population. *Russ. J. Genet.* 2020.56(7):747–757.
37. Zhivotovskii L.A., Glubokovskii M.K., Viktorovskii R.M., Bronevskii A.M., Afanas'ev K.I., Efremov V.V. et al. Geneticheskaya differentsiatsiya gorbushi. *Genetika*. 1989;25(7):1261–1274. (In Russ.).
38. Pustovoit S.P. Tridsat' let gipoteze flyuktuiruyushchikh stad gorbushi *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum). *Izvestiya TINRO*. 2017;188:162–172. (In Russ.).
39. Sato S., Urawa S. Genetic variation of Japanese pink salmon populations inferred from nucleotide sequence analysis of the mitochondrial DNA control region. *Environmental Biology of Fishes*. 2017;100(10):1355–1372. (In Russ.).
40. Efremov V.V. Allozimmaya izmenchivost' gorbushi (*Oncorhynchus gorbuscha*) Sakhalina. *Voprosy Ikhtiologii*. 2002;42(3):409–417. (In Russ.).
41. Neverova G.P., Frisman E.YA. Rezhimy dinamiki populyatsii s neperekryvayushchimisya pokoleniyami s uchetom geneticheskoi i stadiinnoi struktur. *Computer Research and Modeling*. 2020;12(5):1165–1190. (In Russ.).
42. Hersteinsson P., Macdonald D.W. Diet of Arctic foxes (*Alopex lagopus*) in Iceland. *J. Zool.* 1996;240:457–474.
43. Angerbjörn A., Tannerfeldt M., Erlinge S. Predator-prey relationships: Arctic foxes and lemmings. *J. Anim. Ecol.* 1999;68:34–49.
44. Elmhagen B., Tannerfeldt M., Verucci P., Angerbjörn A. The arctic fox (*Alopex lagopus*) – an opportunistic specialist. *J. Zool.* 2000;251:139–149.
45. Volodin I.A., Kalashnikova M.V., Klinkova E.S. et al. Structure of arctic fox (*Alopex lagopus beringensis*) colonies in the northern extremity of Bering Island. *Biology Bulletin*. 2013;40(7):614–625.
46. Zhdanova O.L., Frisman E.Ya. Mathematical modeling of selection by sex-limited trait: to the question of maintenance of litter size polymorphism in natural populations of arctic foxes. *Russ. J. Genet.* 2021;57(2):227–237.
47. Turelli M., Schemske D.W., Bierzychudek P. Stable two-allele polymorphisms maintained by fluctuating fitnesses and seed banks: protecting the blues in *Linanthus parryae*. *Evolution*. 2001;55:1283–1298.
48. MacArthur R.H., Wilson E.O. *The Theory of Island Biogeography*. Princeton, N.J.: Princeton University Press; 1967.
49. Zhdanova O.L., Frisman E.Ya. Genetic polymorphism under cyclical selection in long-lived species: the complex effect of age structure and maternal selection. *J. Theor. Biol.* 2021;512. 110564.
50. Zhdanova O.L., Neverova G.P., Frisman E.Y. Predator evolution in a model of interacting species: to the question about maintaining polymorphism by litter size in natural populations of arctic fox. *Russ. J. Genet.* 2022. 58(1):94–108.
51. Kausrud K.L., Myrsetrud A., Steen H. et al. Linking climate change to lemming cycles. *Nature*. 2008;456:93–97.
52. Henttonen H., Wallgren H. Small rodent dynamics and communities in the birch forest zone of northern Fennoscandia. In: F.E. Wielgolaski (Ed.). *Nordic Mountain Birch Ecosystems*. New York: Parthenon; 2001. P. 262–278.

Обзорная статья

УДК 633.11:581.1:631.5:535.243:772.962

DOI: 10.31857/S0869769825020094

EDN: GEIDEE

Неинвазивные оптические методы (спектрометрия, тепловидение) при определении дефицита азота и физиологического состояния пшеницы в полевых условиях

Д.В. Русаков✉, Е.В. Канаш, Ю.В. Чесноков

Дмитрий Валерьевич Русаков

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник
Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
rdv_vgsha@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8753-4440>

Елена Всеволодовна Канаш

доктор биологических наук, главный научный сотрудник
Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
ykanash@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8214-8193>

Юрий Валентинович Чесноков

член-корреспондент РАН, доктор биологических наук, директор
Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
yuv_chesnokov@agrophys.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1134-0292>

Аннотация. Спектры отражения и температура поверхности листьев были измерены в полевом опыте при выращивании пшеницы сорта Дарья на Меньковской опытной станции Агрофизического НИИ. Растения вегетировали при различных уровнях азотного питания (0–200 кг/га с шагом 40 кг/га). Удобрения вносили в 2 этапа: 2/3 дозы азота (азофоска) перед посевом и 1/3 (аммиачная селитра) на стадии завершения кущения. Анализ индексов диффузного отражения поверхности листьев выявил тесную положительную взаимосвязь индекса хлорофилла (ChlRI) и тесную отрицательную взаимосвязь фотохимического индекса отражения (PRI) с дозой внесенных азотных удобрений на ранних этапах возникновения дефицита азота, когда видимые симптомы угнетения растений еще отсутствуют. Индексы отражения SIPI, R_{800} , ARI и FRI помимо оценки обеспеченности растений азотом могут быть полезны при оценке специфической ответной реакции растений на действие различных стрессоров, например на дефицит почвенной влаги или недостаток почвенного азота. Использование тепловизионной съемки позволило оценить транспирационную активность растений пшеницы в зависимости от уровня азотного питания и ее изменение в течение дня.

Ключевые слова: спектроскопия, индексы диффузного отражения, термальные изображения, дефицит азота, дефицит воды

Для цитирования: Русаков Д.В., Канаш Е.В., Чесноков Ю.В. Неинвазивные оптические методы (спектрометрия, тепловидение) при определении дефицита азота и физиологического состояния пшеницы в полевых условиях // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 124–137. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020094>

Review article

Non-invasive optical methods (spectrometry, thermal imaging) when determining nitrogen deficiency and the physiological state of wheat in the field conditions

D.V. Rusakov, E.V. Kanash, Yu.V. Chesnokov

Dmitryi V. Rusakov

Candidate of Sciences in Agriculture, Senior Researcher
Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russia
rdv_vgsha@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8753-4440>

Elena V. Kanash

Doctor of Sciences in Biology, Chief Researcher
Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russia
ykanash@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8214-8193>

Yuriy V. Chesnokov

Corresponding Member of RAS, Doctor of Sciences in Biology, Director
Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russia
yuv_chesnokov@agrophys.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1134-0292>

Abstract. The reflection spectra and leaf surface temperature were measured in a field experiment when growing wheat of the Daria variety in the field conditions of the Menkovo experimental station of the Agrophysical Research Institute. The plants were vegetated at different levels of nitrogen nutrition (0–200 kg/ha in increments of 40 kg/ha). Fertilizers were applied in 2 stages: 2/3 of the dose of nitrogen (nitrogen strip) before sowing and 1/3 (ammonium nitrate) at the stage of completion of tillering. The analysis of the diffuse reflection indices of the leaf surface revealed a close positive relationship between the chlorophyll index (ChlRI) and a close negative relationship between the photochemical reflection index (PRI) and the dose of nitrogen fertilizers applied at the early stages of nitrogen deficiency, when there are no visible symptoms of plant oppression. The reflection indices SIPI, R_{800} , ARI and FRI, in addition to assessing the nitrogen supply of plants, can be useful in assessing the specific response of plants to the action of various stressors, for example, to a deficiency of soil moisture or a lack of soil nitrogen. The use of thermal imaging made it possible to assess the transpiration activity of wheat plants depending on the level of nitrogen nutrition and its change during the day.

Keywords: spectroscopy, diffuse reflection indices, thermal images, nitrogen deficiency, water deficiency

For citation: Rusakov D.V., Kanash E.V., Chesnokov Yu.V. Non-invasive optical methods (spectrometry, thermal imaging) when determining nitrogen deficiency and the physiological state of wheat in the field conditions. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2): 124–137. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020094>

Введение

Растения на протяжении вегетации в любой климатической зоне испытывают действие неблагоприятных факторов среды (прежде всего – засуха, дефицит минерального питания), которые вызывают неспецифическую ответную реакцию – окислительный стресс и активизацию вторичного метаболизма. В ответ на действие различных стрессоров спектральные и оптические характеристики радиации, отраженной от поверхности листьев, меняются до появления внешних симптомов угнетения и/или повреждения растений. Поскольку любой стресс вызывает физиологические изменения, приводящие к значительному снижению урожайности сельскохозяйственных культур, охватывающему большие площади, определение ее актуально независимо от погодных прогнозирований, при котором имеется возможность детально описать каждый участок поля или растений на наличие потенциального окислительного стресса, в зависимости от выбранного способа диагностирования.

Изменение оптических характеристик листьев в ответ на действие различных абиотических стрессоров изучалось достаточно широко. Проведенные ранее исследования были посвящены влиянию на различные виды и сорта растений повышенных уровней высокой температуры [1], тяжелых металлов [2], ультрафиолетовой радиации [3], дефицита воды [1, 4–6] и элементов питания [3, 7].

Во многих из этих исследований спектральные характеристики были рассмотрены с точки зрения прогноза ухудшения состояния растений и снижения их урожайности. Наличие взаимосвязей между физиологическим состоянием растений и оптическими характеристиками их листьев или оптическими характеристиками растительного покрова, который формируют вегетирующие растения, определяется тем, что неблагоприятные условия произрастания приводят к морфологическим, физиологическим и биохимическим изменениям, которые и могут быть зарегистрированы с помощью различных оптических методов.

Материал и методика

Растения пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья выращивали в полевых условиях на поле Меньковской опытной станции ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» в 2021–2022 гг. Температура и влажность воздуха в период проведения эксперимента и выполнения измерений спектральных характеристик листьев и получения термограмм отличались от средних многолетних значений существенно более низким количеством выпавших осадков и более высокой температурой. Почва опыта дерново-слабоподзолистая среднеоккультурная легкосуглинистая, мощность пахотного слоя 22 см, характеризовалась следующими показателями: содержание гумуса – 2,07%, $\text{pH}_{\text{KCl}} - 5,7$, содержание обменного кальция – 8,38 мМоль/100 г, подвижных соединений фосфора и калия – 565 и 140 мг кг^{-1} , аммонийного и нитратного азота – 12,37 и 8,21 мг/кг соответственно. Всего было заложено 6 тестовых площадок площадью 100 м^2 , в почве которых доза азота варьировала от 0 (удобрения не вносили) до 200 кг/га с шагом 40 кг/га. Удобрения вносили в 2 этапа: азофоску перед посевом в количестве 2/3 дозы азота и оставшуюся 1/3 дозы – в виде подкормки аммиачной селитрой на стадии завершения кушения (ВВСН 29).

Для регистрации диффузного отражения листьев использовали миниатюрную оптоволоконную спектрорадиометрическую систему фирмы Ocean Insight (США), которая обеспечивает оптическое разрешение 0,065 нм в диапазоне от 300 до 1000 нм с шагом 0,3 нм, и программу Spectra Suite. После записи спектров отражения (не менее 15 спектров для каждой дозы внесенного азота) рассчитывали спектральные индексы отражения, позволяющие оценить емкость фотосинтетического аппарата и эффективность его работы. Расчетные формулы индексов приведены ниже в табл. 1. Поскольку иногда индекс фотохимического отражения (PRI) и индекс флавоноидов (FRI) при стрессе могут иметь отрицательные значения, введение постоянной константы (С) в их расчетные формулы обеспечивает более удобное сравнение изученных показателей и их представление [3, 5]. Значения с были выбраны эмпирически и для данного эксперимента равнялись 0,7.

Индексы диффузного отражения листьев, которые были использованы для диагностики физиологического состояния растений

Индекс	Измеряемый параметр	Формула для расчета	Авторы индекса
ChlRI	Содержание хлорофилла, емкость фотосинтетического аппарата	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$	Sims, Gamon, 2002
PRI	Фотохимическая активность фотосинтетического аппарата. Позволяет оценить интенсивность нефотохимического тушения, тесно связан с превращением пигментов ксантофиллового цикла	$(R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$	Peñuelas et al., 1995
ARI	Содержание антоцианов, накопление которых обычно является признаком фотоингибирования, угнетения растений и торможения их роста	$[(1/R_{550}) - (1/R_{700})] \cdot R_{750}$	Merzlyak et al., 2003
FRI	Содержание флавоноидов, накопление которых обычно является признаком фотоингибирования, угнетения растений и торможения их роста	$((1/R_{410}) - (1/R_{460})) \cdot R_{800}$	Merzlyak et al., 2003
R_{800}	Показатель рассеяния света, тесно связанный с внутренней структурой листа	R_{800}	Sims, Gamon, 2002
WRI	Индекс водной полосы, характеризует содержание воды в листе	$(R_{920} - R_{970}) / (R_{920} + R_{970})$	Plasad et al., 2007

Температуру растительного покрова, сформированного растениями яровой пшеницы сорта Дарья, определяли с помощью тепловизора RGK TL-80 со специальным программным обеспечением RGK Vision. Инфракрасные снимки изображения фрагментов растительного покрова на каждой из тестовых площадок, отличающихся дозой внесенных азотных удобрений, получали в утренние часы (10 ч) на стадиях ВВСН 25–27 (завершение кущения), ВВСН 30–31 (выход в трубку), ВВСН 71–73 (водная спелость – ранняя молочная спелость). На стадии ВВСН 71–73 измерения выполнены также днем (14 ч). Все измерения сделаны в 5-кратной повторности с расстояния 2–2,5 м в полевых условиях Меньковской опытной станции. При обработке полученных инфракрасных снимков определяли температуру растительного покрова и открытых участков почвы.

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программ MS Excel 16 и Statistica 12. Были определены средние значения исследуемых показателей. Достоверность различий между вариантами оценивалась методами параметрической статистики (t-критерий Стьюдента). Различия между вариантами были признаны значительными при $P \leq 0,05$. Корреляция между двумя параметрами считалась значимой, если коэффициент корреляции составлял $P \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

Дистанционное зондирование в современном земледелии может являться мощным инструментом для предоставления своевременной и точной информации о состоянии посевов. Контактная спектроскопия более простой метод, в отличие от гиперспектральной съемки не имеет возможности охватывать большие площади растительного покрова, однако более точно диагностирует состояние растений и выявляет изменения их оптических

свойств, что является следствием изменения содержания фотосинтетических пигментов и других метаболитов, связанных с эффективностью фотосинтеза.

Список вегетационных индексов очень большой, и выбор оптимальных для конкретных исследований требует своего подхода. Это связано с тем, что для расчета некоторых индексов используются конкретные длины волн, где происходит поглощение того или иного пигмента, напрямую связанного с протеканием разных физиологических процессов. Но в большей части индексы можно разделить на 2 группы: характеризующие емкость фотосинтетического аппарата, которая определяется содержанием хлорофилла в тканях растения, например индекс хлорофилла (ChlRI) [8], и позволяющие оценить эффективность превращения поглощенной солнечной энергии в фотохимических реакциях фотосинтеза: индекс содержания флавоноидов [9], соотношение содержания хлорофилла к каротиноидам (SIPI) [10], индекс диффузного рассеяния листа светом R_{800} [8], фотохимический индекс (PRI) [11] (табл. 1). Последний напрямую связан с действием пигментов ксантофиллового цикла, участвующих в нефотохимическом тушении [12]. Все индексы отражения, характеризующие эффективность использования света, реагируют на ухудшение условий роста и как следствие его торможение или остановку, поэтому их часто используют для оценки стресс-устойчивости растений.

Некоторые индексы (ChlRI, SIPI) претерпевают значительные изменения только при усилении стрессового фактора и могут быть зафиксированы только при необратимом угнетении роста, например при дефиците азота или под влиянием засухи [6].

Получение снимков с помощью термальной камеры (тепловизора), принцип изменения которой основывается на работе в инфракрасном спектре, анализе и регистрации отраженной температуры поверхности объектов, оказалось крайне эффективным приемом определения водного статуса растений и в целом воздействия засухи в некоторых исследованиях [13–18]. Физическая сущность тепловидения основана на том, что любое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля, испускает в пространство тепловое (инфракрасное) излучение. Величина этого излучения изменяется с изменением температуры. Камера визуализации оснащена инфракрасным детектором, обычно в матрице фокальной плоскости, состоящей из детектирующих элементов микронного размера или «пикселей».

Основным ключевым показателем тепловизионной оценки состояния посевов является мониторинг температуры растительного полого, которая тесным образом коррелирует с влажностью воды, изменением интенсивности фотосинтеза и транспирации, закрытием или открытием устьиц. Исследования показали, что по мере увеличения транспирации происходит снижение температуры листа за счет рассеивания энергии в виде скрытого тепла [19], и в то же время температура листьев верхнего полого обычно повышается с уменьшением влажности почвы [20–22]. Транспирация через открытые устьица является основным механизмом поддержания температуры поверхности листа. При водном стрессе транспирация снижается, что становится причиной увеличения температуры листа и может быть зарегистрировано термографически [23].

Учитывая, что важной ролью транспирации является охлаждение листьев, температура растительного покрова и ее уменьшение по сравнению с температурой окружающего воздуха свидетельствуют о степени, с которой транспирация охлаждает листья в соответствии с потребностью растений, возникающей под влиянием окружающей среды. Более высокая транспирация подразумевает более сильное охлаждение листьев и более высокую устьичную проводимость, оба аспекта способствуют чистому фотосинтезу и продолжительности его работы. Относительно более низкая температура растительного покрова означает повышенную способность поглощать влагу из почвы или поддерживать лучший водный статус растений. Таким образом, более высокая транспирация свидетельствует о лучшем физиологическом состоянии растений [24].

Анализ спектральных характеристик отраженной от поверхности листьев радиации выявил тесную положительную взаимосвязь индекса хлорофилла (ChlRI) и тесную отрицательную взаимосвязь фотохимического индекса отражения (PRI) с дозой внесенных азотных удобрений (рис. 1, 2). Связь величины ChlRI и PRI с дозой внесенного в почву азота линейная, четко выраженная на всех этапах развития растений пшеницы (табл. 2). В табл. 2

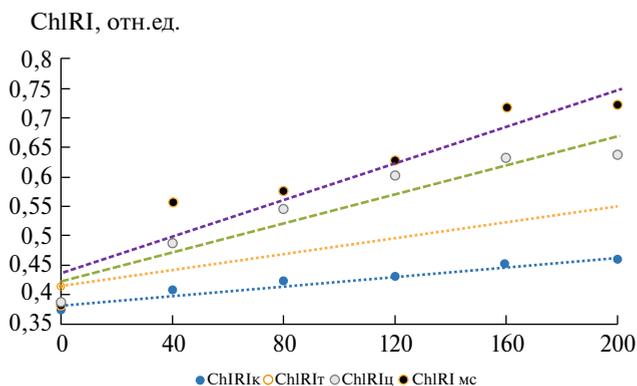


Рис. 1. Индекс отражения хлорофилла (ChlRI) листьев пшеницы в зависимости от дозы внесенных азотных удобрений. Приведены значения ChlRI, полученные на стадиях кушения (ChlRIк), выхода в трубку (ChlRIт), цветения (ChlRIц) и молочной спелости (ChlRIмс)

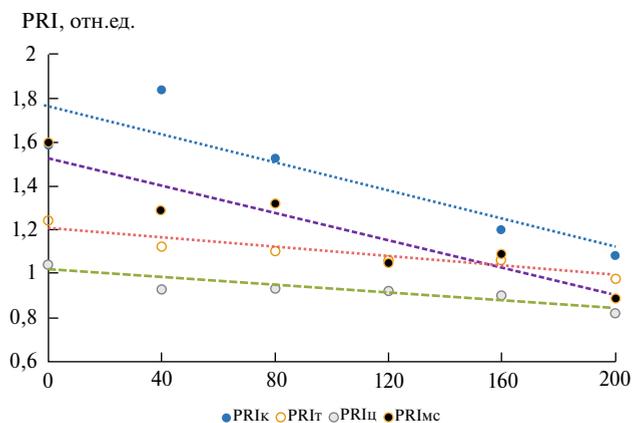


Рис. 2. Фотохимический индекс отражения (PRI_{mod}) листьев пшеницы в зависимости от дозы внесенных азотных удобрений. Приведены значения PRI_{mod} , полученные на стадиях кушения (PRIк), выхода в трубку (PRIт), цветения (PRIц) и молочной спелости (PRIмс)

приведены только те индексы, для которых выявлена статистически значимая связь с дозой внесенных азотных удобрений. Достоверная взаимосвязь дозы азота с индексами R_{800} и ARI не выявлена во все сроки проведения анализов, с индексами SIPI и FRI она обнаружена только на ранних этапах развития растений яровой пшеницы (стадия «кушение»), в более поздние сроки из-за значительного варьирования величины данных индексов достоверной связи выявить не удалось.

Данные табл. 2 позволяют заключить, что на стадии кушения озимой пшеницы при температуре 10,2 °C и влажной почве только индексы SIPI и ARI не были достоверно связаны с уровнем азотного питания растений. Как было обнаружено, величина остальных подобранных для оценки физиологического состояния растений индексов находится в тесной корреляционной связи с уровнем азотного питания, который был создан на тестовых площадках поля Меньковской опытной станции АФИ.

Индекс хлорофилла (ChlRI) и фотохимический индекс отражения (PRI) были тесно взаимосвязаны с дозой внесенных азотных удобрений. Обнаруженная на ранних этапах развития связь между показателями сохранялась и в более поздние сроки вегетации вплоть до стадии молочной спелости. Характерно, что величина индексов SIPI и FRI отрицательно коррелировала с дозой внесенных азотных удобрений только в ранние сроки развития

Взаимосвязь между индексами отражения и дозой внесенных азотных удобрений у растений яровой пшеницы сорта Дарья в зависимости от этапа их развития

Индекс отражения	Стадия развития ВВСН	Уравнение связи между индексом отражения и дозой азота (N)	r	r^2	P
ChlRI	25–27	$0.382 + (0,0004 \times N)$	0.946	0.95	0.0046
	30–31	$0.414 + (0,007 \times N)$	0.995	0.99	0.00004
	59–61	$0.422 + (0,0012 \times N)$	0.955	0.91	0.0042
	71–73	$0.435 + (0,0016 \times N)$	0.945	0.90	0.0042
PRI	25–27	$1.760 - (0,0033 \times N)$	-0.895	0.80	0.0400
	30–31	$1.201 - (0,0011 \times N)$	-0.942	0.89	0.0050
	59–61	$1.004 - (0,0008 \times N)$	-0.918	0.84	0.0096
	71–73	$1.519 - (0,0032 \times N)$	-0.945	0.89	0.0045
SIPI	25–27	$1.090 - (0,0003 \times N)$	-0.958	0.92	0.042
FRI	25–27	$9.621 - (0.0368 \times N)$	-0.961	0.92	0.039

Примечание. Приведены только те индексы, для величины которых обнаружена статистически достоверная связь ($p \leq 0,05$) с уровнем азотного питания. N – доза азотных удобрений, внесенных в почву тестовых площадок, варьировала от 0 до 200 кг/га с шагом 40 кг/га.

растений (стадия ВВСН 25–27, завершение кущения). На более поздних этапах развития (стадия ВВСН 30–31, выход в трубку) зависимости этих индексов от обеспеченности растений азотом не выявлено.

На рис. 1 представлены значения индекса отражения хлорофилла (ChlRI), характерные для растений яровой пшеницы в зависимости от стадии развития и уровня азотного питания, созданного на тестовых площадках. Видно, что содержание хлорофилла в листьях возрастает с дозой внесенного в почву азота. Индекс хлорофилла характеризует емкость фотосинтетического аппарата и потенциальную способность растений поглощать свет. Этот показатель тесно связан с урожайностью растений. Было обнаружено наличие тесной корреляционной связи между числом и массой семян, формируемых в колосе главного побега с ChlRI (измерение спектральных характеристик отраженной от поверхности листьев радиации выполнены на стадии «выход в трубку»):

$$M3_{гк} = 2,907 + (9,304 \times \text{ChlRI}), \quad r = 0,69, \quad r^2 = 0,48, \quad p = 0,009,$$

$$Ч3_{гк} = 33,99 + (133,5 \times \text{ChlRI}), \quad r = 0,58, \quad r^2 = 0,33 \quad p = 0,039,$$

где M3 гк и Ч3 гк – масса зерен и число зерен, сформированных в главном колосе.

Поскольку ChlRI находится в достоверной положительной корреляционной связи с показателями урожайности (число и масса семян), этот показатель может рассматриваться в качестве признака потенциальной продуктивности.

Фотохимический индекс отражения (PRI) характеризует эффективность превращения света в фотохимических процессах фотосинтеза. Рост PRI свидетельствует об усилении тепловой диссипации и является симптомом снижения эффективности фотосинтетических процессов. с ростом дозы внесенных азотных удобрений PRI уменьшается (рис. 2).

Связь между величиной PRI и уровнем азотного питания сохраняется от ранних этапов развития растений (кущение) до поздних (молочная спелость). Индексы отражения SIPI, R_{800} , ARI и FRI помимо обеспеченности растений азотом реагируют на изменение условий окружающей среды и, по-видимому, могут быть полезны при оценке специфический

ответной реакции растений на действие различных стрессоров, например повышенную температуру воздуха или дефицит почвенной влаги.

Термограммы растительного покрова, сформированного растениями яровой пшеницы на стадии ВВСН 25–27, выращенной при различных дозах внесенных азотных удобрений, приведены на рис. 3.

Для сравнения представлены видимые и инфракрасные изображения растительного покрова, сформированного при N0, N80 и N160. Видны существенные отличия в температуре у участков растительного покрова, отличающихся дозой внесенных азотных удобрений.

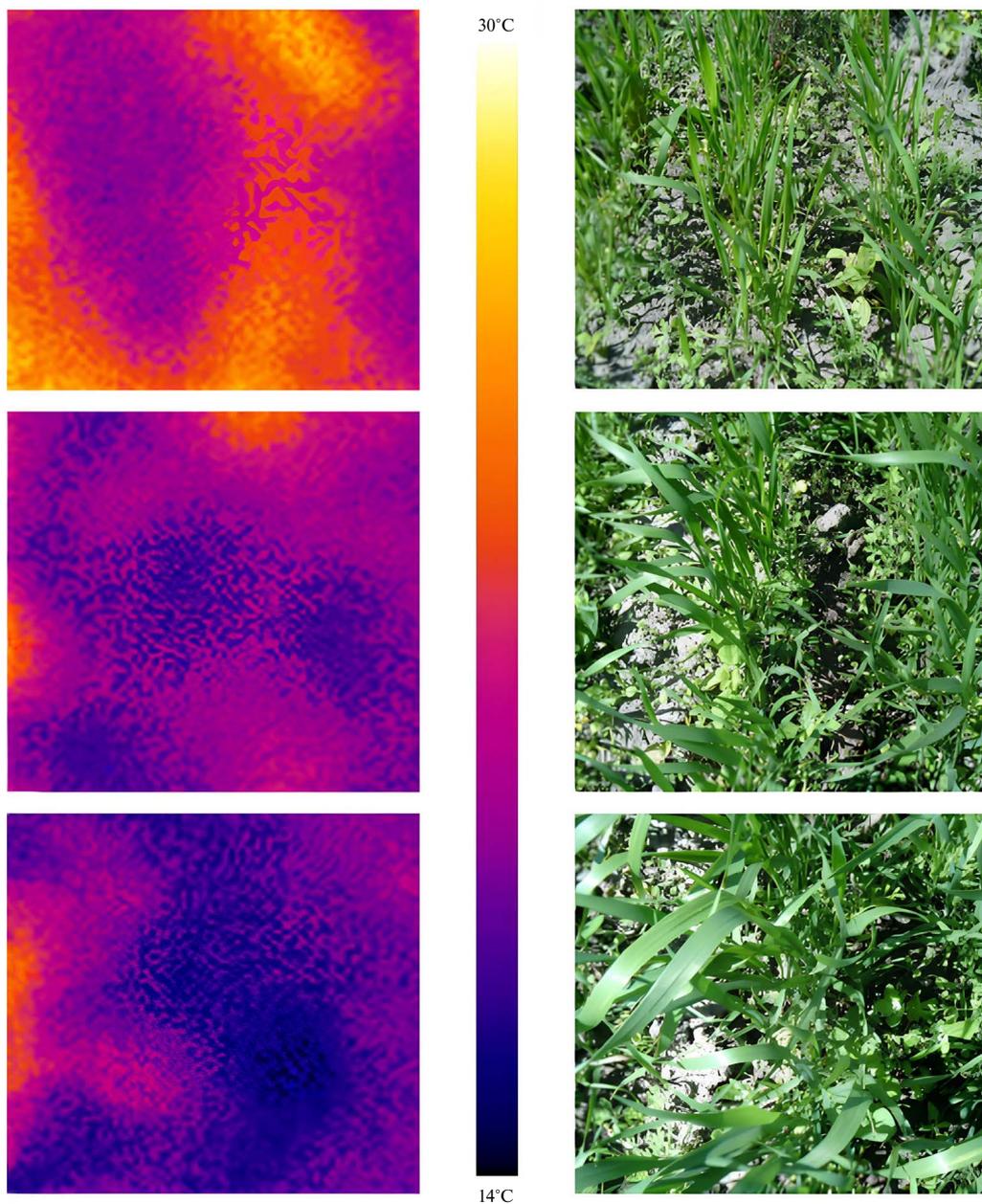


Рис. 3. Видимое и инфракрасное изображение растительного покрова, сформированного растениями яровой пшеницы сорта Дарья на стадии ВВСН 25–27 – завершение кушения при дозе азотных удобрений N0 (верхний ряд), N80 (средний ряд) и N160 (нижний ряд)

Температура воздуха в 12 ч в среднем была равна 18–20 °С. Средняя температура открытых участков почвы 23,6 °С. Максимальная, минимальная и средняя температура растительного покрова в зависимости от дозы внесенного азота приведена в табл. 3. Максимальная температура растительного покрова, сформированного при дефиците азота, выше на 4,5 °С, чем в варианте с внесением самой высокой дозы азота 200 кг/га. Различия между вариантами N0 и N200 по минимальной температуре сформированного растительного покрова составляют 2,1 °С. Средняя температура у этих вариантов отличается на 2,7 °С.

Отличия по температуре открытой почвы между вариантами связаны с разной степенью ее затенения листьями, площадь которых существенно зависит от дозы удобрений. Большая площадь листовой ассимилирующей поверхности, сформированной в вариантах № 80 и № 160, в сравнении с вариантом № 0, инфракрасное и видимое изображение которых представлено на рис. 3, частично экранирует почву, создавая тень, что способствует уменьшению нагрева последней. Видно, что с увеличением уровня азотного питания температура растительного покрова остается более низкой, чем в варианте с дефицитом азота, даже в самое напряженное время суток.

На стадии ВВСН 30–31 (выход в трубку) средняя температура воздуха в 12 ч дня была немного выше (20,2 °С), чем при прохождении стадии ВВСН 22–25 (завершение кущения).

Таблица 3

Температура открытой почвы и растительного покрова, сформированного растениями пшеницы сорта Дарья на стадии ВВСН 25–27 (завершение кущения) в зависимости от дозы внесенных азотных удобрений

Доза азота	Почва			Растительный покров		
	Т °С макс	Т °С мин	Т °С средняя	Т °С макс	Т °С мин	Т °С средняя
0	30,1	22,7	26,4	22,3	16,4	18,8
40	–	–	–	20,2	16,3	18,3
80	27,4	22,4	24,1	19,2	15,8	17,1
120	28,5	23,3	26,0	20,2	15,6	17,0
160	25,1	19,2	22	18,3	14,5	16,3
200	24,3	20,7	22,5	17,8	14,3	16,1

Примечание. Здесь и в табл. 4 прочерк означает, что измерения не проводили.

Таблица 4

Температура открытой почвы и растительного покрова, сформированного растениями пшеницы сорта Дарья на стадии ВВСН 30–31 (выход в трубку) в зависимости от дозы внесенных азотных удобрений

Доза азота	Почва			Растительный покров		
	Т °С макс	Т °С мин	Т °С средняя	Т °С макс	Т °С мин	Т °С средняя
0	30,6	22,9	26,7	20,9	16,7	18,4
40	–	–	–	19,7	15,5	17,9
80	28,3	22,7	25,3	19,3	15,8	17,3
120	27,4	21,7	24,3	19,0	14,6	16,3
160	24,9	18,8	22	17,9	14,3	15,8
200	25,8	20,6	22,0	17,2	14,2	16,0

ния). Почва на стадии развития растений ВВСН 30–31 в варианте № 0 прогрелась сильнее, чем в вариантах с внесением азотных удобрений (табл. 4). Более низкой была максимальная, минимальная и средняя температура растительного покрова, сформированного растениями яровой пшеницы в вариантах с внесением азотных удобрений. Например, различия между вариантами N0 и N200 достигали 3,7, 2,5 и 2,4 °С соответственно для максимальной, минимальной и средней температуры открытой почвы.

Результаты тепловизионного исследования в утренние (рис. 4) и дневные (рис. 5) часы выявили достоверную тесную корреляционную взаимосвязь и в фазу молочной спелости между дозой внесенного азота и средней температурой растительного покрова, сформированного посевом пшеницы сорта Дарья.

Различия между максимальной, минимальной и средней температурой растительного покрова на стадии ВВСН 71–73, измеренной в утренние и дневные часы при дефиците азотного питания, были соответственно равны 11, 13 и 12 °С. Внесение азотных удобрений сокращало различия между утренними и дневными температурами растительного покрова на 2–2,5 °С.

Ранее было показано, что на уровне растительного покрова термальное изображение в комбинации с дополнительной информацией от видимого изображения является улучшенным способом получения корреляционных зависимостей между устьичной проводимостью, температурой поверхности листьев и их водным дефицитом [25]. Биотические стрессы также выявляются с помощью термографии, поскольку вызываемое патогенами увеличе-

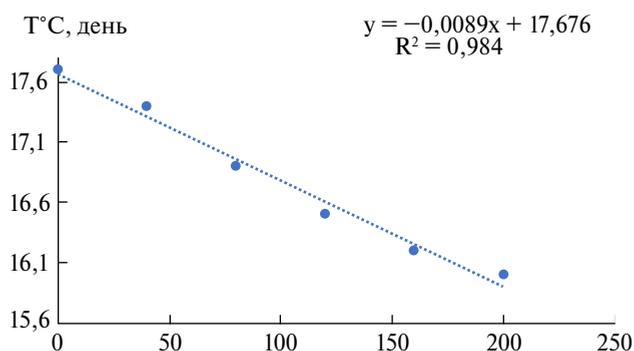


Рис. 4. Корреляционная зависимость между температурой растительного покрова пшеницы и дозой внесенных азотных удобрений в утренние часы (10 ч). Приведено уравнение линейной регрессии и коэффициент детерминации. Достоверность линейной связи $p = 0,0001$

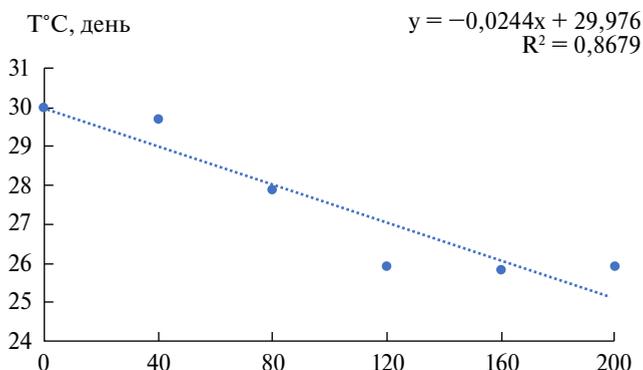


Рис. 5. Корреляционная зависимость между температурой растительного покрова пшеницы и дозой внесенных азотных удобрений в дневные часы (14 ч). Приведено уравнение линейной регрессии и коэффициент детерминации. Достоверность линейной связи $p = 0,024$

ние основного защитного компонента салициловой кислоты приводит к закрытию устьиц с сопутствующим повышением температуры. В настоящее время величина различий между температурой растительного покрова и температурой окружающего воздуха используется в селекционных программах при отборе генотипов по признаку «засухоустойчивость» [26]. Наряду с очевидной перспективностью применения метода тепловидения для оценки водного статуса растений имеется и ряд ограничений для его использования, обусловленных неоднородностью растительного покрова, различиями в степени проективного покрытия почвы (фоновая почва), влиянием ветра и облачности. Однако эти ограничения могут быть преодолены при выравнивании нормы высева семян и выполнении измерений в ясные солнечные безветренные дни. Следует отметить, что перспективный метод тепловизионной оценки водного статуса растений в полевых и контролируемых условиях до сих пор недостаточно разработан.

Ранее нами впервые было проведено картирование QTL (quantitative trait loci) индексов диффузного отражения листовой пластинки, определяющих содержание хлорофилла, отношение каротиноидов к хлорофиллу, фотохимическую активность фотосинтетического аппарата, содержание антоцианов, меру рассеяния света листом, а также площади листовой ассимилирующей поверхности и показателей зерновой продуктивности яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), проявляющихся в контролируемых условиях светокультуры в отсутствие и при внесении азотного удобрения [27]. В общей сложности картирован 31 QTL. Для пяти из шести исследованных оптических характеристик активности фотосинтетического аппарата яровой мягкой пшеницы установлена достоверная корреляционная зависимость от внесения азотного удобрения. Полученные результаты свидетельствуют, что применение неинвазивных оптических методов позволяет не только выявлять угнетение дефицита азота или воды на ранних этапах его возникновения, но и с высокой пропускной способностью оценивать интенсивность фотосинтетического аппарата растений, в связи с чем может быть использовано для эффективного отбора перспективных генотипов пшеницы при селекции по признаку зерновой продуктивности не только в контролируемых условиях светокультуры, но в перспективе и в полевых условиях.

Таким образом, работа при изучении воздействия негативных факторов должна вестись в зависимости от поставленной цели и задачи исследования: это создание теоретической базы в более идеальных лабораторных условиях с точки зрения эксперимента для изучения исследуемого стресса с возможностью его комбинации с различными факторами, с целью исключения в дальнейшем «помех», которые так или иначе могут присутствовать на поле в виде открытой почвы при не сомкнутом растительном пологе, при разной освещенности и наличии сорняков, а также использование моделей с последующим обучением совместно с применением вегетационных индексов

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dobrowski S.Z., Pushnik J.C., Zarco-Tejada P.J., Ustin S.L. Simple reflectance indices track heat and water-stress induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy level // *Remote Sensing of Environment*. 2005. Vol. 97 (3). P. 403–414. DOI: 10.1016/j.rse.2005.05.006.
2. Rosso P.H., Pushnik, J.C., Lay M., Ustin S.L. Reflectance properties and physiological responses of *Salicornia virginica* to heavy metal and petroleum contamination // *Environmental Pollution*. 2005. Vol. 137 (2). P. 241–252. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.02.025.
3. Kanash E.V., Panova G.G., Blokhina S.Yu. Optical criteria for assessment of efficiency and adaptive characteristics of biologically active preparations // *Acta Horticulturae*. 2013. 1009 (ISHS). P. 37–44. DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.1009.2.
4. Graeff S., Claupein W. Quantifying nitrogen status of corn (*Zea mays* L.) in the field by reflectance measurements // *European Journal of Agronomy*. 2003. Vol. 19 (4). P. 611–618. DOI: 10.1016/S1161-0301(03)00007-8.
5. Kanash E.V., Osipov Y.A. Optical signals of oxidative stress in crops physiological state diagnostics. *Precision agriculture Wageningen*. Netherlands, 2009. P. 81–89. DOI: 10.3920/978-90-8686-664-9.

6. Yakushev V., Kanash E., Rusakov D., Blokhina S. Specific and non-specific changes in optical characteristics of spring wheat leaves under nitrogen and water deficiency // *Advances in Animal Biosciences: Precision Agriculture*. 2017. Vol. 8 (02). P. 229–232. DOI: 10.1017/S204047001700053X.
7. Yakushev V.P., Kanash E.V. Evaluation of wheat nitrogen status by colorimetric characteristics of crop canopy presented in digital images // *Journal of Agricultural Informatics*. 2016. Vol. 7(1). P. 65–74. DOI: 10.17700/JAI.2016.7.1.268.
8. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 81(2/3). P. 337–354. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.
9. Merzlyak M.N., Solovchenko A.E., Smagin A.I., Gitelson A.A. Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and techniques for non-destructive assessment // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2005. Vol. 162 (2). P. 151–160. DOI: 10.1016/j.jplph.2004.07.002.
10. Penuelas J., Baret F., Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance // *Photosynthetica*. 1995. Vol. 31 (2). P. 221–230.
11. Gamon J., Penuelas J., Field C. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency // *Remote Sensing of Environment*. 1992. Vol. 41 (1). P. 35–44.
12. Rusakov D.V., Kanash E.V. Spectral characteristics of leaves diffuse reflection in conditions of soil drought: a study of soft spring wheat cultivars of different drought resistance // *Plant. Soil and Environment*. 2022. Vol. 68. (3). P. 137–145. DOI: 10.17221/483/2021-PSE.
13. Xu H., Ying Y. Application of infrared thermal imaging in the identification of citrus on trees // *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 2004. Vol. 23. P. 353–356.
14. Möller M., Alchanatis V., Cohen Y., Meron M., Tsipris J., Ostrovsky V. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine // *Journal of Experimental Botany*. 2007. Vol. 58. P. 827–838. DOI: 10.1093/jxb/erl115.
15. Xu J., Lv Y., Liu X., Dalson T., Yang S., Wu J. Diagnosing Crop Water Stress of Rice using Infrared Thermal Imager under Water Deficit Condition // *International Journal of Agriculture and Biology*. 2015. Vol. 18. P. 565–572. DOI: 10.17957/IJAB/15.0125.
16. Ghazouani H., Capodici F., Ciralo G., Maltese A., Rallo G., Provenzano G. Potential of Thermal Images and Simulation Models to Assess Water and Salt Stress: Application to Potato Crop in Central Tunisia // *Chemical Engineering Transactions*. 2017. Vol. 58. P. 709–714. DOI: 10.3303/CET1758119.
17. García-Tejero I.F., Rubio A.E., Viñuela I., Hernández A., Gutiérrez-Gordillo S., Rodríguez-Pleguezuelo C.R., Durán-Zuazo V.H. Thermal imaging at plant level to assess the crop-water status in almond trees (cv. Guara) under deficit irrigation strategies // *Agricultural Water Management*. 2018. Vol. 208. P. 176–186. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.06.002.
18. Vieira G.H.S., Ferrarezi R.S. Use of Thermal Imaging to Assess Water Status in Citrus Plants in Greenhouses // *Horticulturae*. 2021. Vol. 7 (8), 249. DOI: 10.3390/horticulturae7080249.
19. Trentin R., Zolnier S., Ribeiro A., Steidle Neto A.J. Transpiration and leaf temperature of sugarcane under different matric potential values // *Engenharia Agrícola*. 2011. Vol. 31 (6). P. 1085–1095. DOI: 10.1590/s0100-69162011000600006.
20. Gardner B.R., Blad B.L., Watts D.G. Plant and air temperatures in differentially irrigated corn // *Agricultural Meteorology*. 1981. Vol. 25. P. 207–217.
21. Jackson R.D. Canopy temperature and crop water stress // *Advances in Irrigation*. 1982. P. 43–85. DOI: 10.1016/b978-0-12-024301-3.50009-5.
22. Testi L., Goldhamer D.A., Iniesta F., Salinas M. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees // *Irrigation Science*. 2008. Vol. 26. 395–405. DOI: 10.1007/s00271-008-0104-5.
23. Grant O.M., Tronina L., Jones H.G., Chaves M.M. Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes // *Journal of Experimental Botany*. 2007. Vol. 58. P. 815–825. DOI: 10.1093/jxb/erl153.
24. Reynolds M.P., Dreccer F., Trethowan R. Drought-adaptive traits derived from wheat wild relatives and landraces // *Journal of Experimental Botany*. 2007. Vol. 58. P. 177–186. DOI: 10.1093/jxb/erl250.
25. Leinonen N., Jones H.G. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress // *Journal of Experimental Botany*. 2004. Vol. 55, No. 401. P. 1423–1431. DOI: 10.1093/JXB/ERH146.
26. Araus J.L., Slafer G.A., Reynolds M.P., Royo C. Plant Breeding and Drought in C3 Cereals: What Should We Breed For? // *Annals of Botany*. 2002. Vol. 89. P. 925–940. DOI: 10.1093/AOB/MCF049.

27. Chesnokov Y.V., Kanash E.V., Mirskaya G.V., Kocherina N.V., Rusakov D.V., Lohwasser U., Börner A. QTL mapping of diffuse reflectance indices of leaves in hexaploid bread wheat (*Triticum aestivum* L.)// Russian Journal of Plant Physiology. 2019. Vol. 66. P. 77–86. DOI: 10.1134/S1021443719010047.

REFERENCES

1. Dobrowski S.Z., Pushnik J.C., Zarco-Tejada P.J., Ustin S.L. Simple reflectance indices track heat and water-stress induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy level. *Remote Sensing of Environment*. 2005;97(3):403–414. DOI: 10.1016/j.rse.2005.05.006.
2. Rosso P.H., Pushnik J.C., Lay M., Ustin S.L. Reflectance properties and physiological responses of *Salicornia virginica* to heavy metal and petroleum contamination. *Environmental Pollution*. 2005;137(2):241–252. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.02.025.
3. Kanash E.V., Panova G.G., Blokhina S.Yu. Optical criteria for assessment of efficiency and adaptive characteristics of biologically active preparations. *Acta Horticulturae*. 2013;1009(ISHS):37–44. DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.1009.2.
4. Graeff S., Claupein W. Quantifying nitrogen status of corn (*Zea mays* L.) in the field by reflectance measurements. *European Journal of Agronomy*. 2003;19(4):611–618. DOI: 10.1016/S1161-0301(03)00007-8.
5. Kanash E.V., Osipov Y.A. Optical signals of oxidative stress in crops physiological state diagnostics. Precision Agriculture Wageningen. Netherlands; 2009. P. 81–89. DOI: 10.3920/978-90-8686-664-9.
6. Yakushev V., Kanash E., Rusakov D., Blokhina S. Specific and non-specific changes in optical characteristics of spring wheat leaves under nitrogen and water deficiency. *Advances in Animal Biosciences: Precision Agriculture*. 2017;8(02):229–232. DOI: 10.1017/S204047001700053X.
7. Yakushev V.P., Kanash E.V. Evaluation of wheat nitrogen status by colorimetric characteristics of crop canopy presented in digital images. *Journal of Agricultural Informatics*. 2016;7(1):65–74. DOI: 10.17700/JAI.2016.7.1.268.
8. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*. 2002;81(2/3):337–354. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.
9. Merzlyak M.N., Solovchenko A.E., Smagin A.I., Gitelson A.A. Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and techniques for non-destructive assessment. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2005;162(2):151–160. DOI: 10.1016/j.jplph.2004.07.002.
10. Penuelas J., Baret F., Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*. 1995;31:221–230.
11. Gamon J., Penuelas J., Field C. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*. 1992;41(1):35–44.
12. Rusakov D.V., Kanash E.V. Spectral characteristics of leaves diffuse reflection in conditions of soil drought: a study of soft spring wheat cultivars of different drought resistance. *Plant Soil and Environment*. 2022;68(3):137–145. DOI: 10.17221/483/2021-PSE.
13. Xu H., Ying Y. Application of infrared thermal imaging in the identification of citrus on trees. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 2004;23:353–356.
14. Möller M., Alchanatis V., Cohen Y., Meron M., Tsipris J., Ostrovsky V. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*. 2007;58:827–838. DOI: 10.1093/jxb/erl115.
15. Xu J., Lv Y., Liu X., Dalson T., Yang S., Wu J. Diagnosing Crop Water Stress of Rice using Infrared Thermal Imager under Water Deficit Condition. *International Journal of Agriculture and Biology*. 2015;18:565–572. DOI: 10.17957/IJAB/15.0125.
16. Ghazouani H., Capodici F., Ciraolo G., Maltese A., Rallo G., Provenzano G. Potential of Thermal Images and Simulation Models to Assess Water and Salt Stress: Application to Potato Crop in Central Tunisia. *Chemical Engineering Transactions*. 2017;58:709–714. DOI: 10.3303/CET1758119.
17. García-Tejero I.F., Rubio A.E., Viñuela I., Hernández A., Gutiérrez-Gordillo S., Rodríguez-Pleguezuelo C.R., Durán-Zuazo V.H. Thermal imaging at plant level to assess the crop-water status in almond trees (cv. Guara) under deficit irrigation strategies. *Agricultural Water Management*. 2018;208:176–186. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.06.002.

18. Vieira G.H.S., Ferrarezi R.S. Use of Thermal Imaging to Assess Water Status in Citrus Plants in Greenhouses. *Horticulturae*. 2021;7(8):249. DOI: 10.3390/horticulturae7080249.
19. Trentin R., Zolnier S., Ribeiro A., Steidle Neto A.J. Transpiration and leaf temperature of sugarcane under different matric potential values. *Engenharia Agricola*. 2011;31(6):1085–1095. DOI: 10.1590/s0100-69162011000600006.
20. Gardner B.R., Blad B.L., Watts D.G. Plant and air temperatures in differentially irrigated corn. *Agricultural Meteorology*. 1981;25:207–217.
21. Jackson R.D. Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation*. 1982:43–85. DOI: 10.1016/b978-0-12-024301-3.50009-5.
22. Testi L., Goldhamer D.A., Iniesta F., Salinas M. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. *Irrigation Science*. 2008;26:395–405. DOI: 10.1007/s00271-008-0104-5.
23. Grant O.M., Tronina L., Jones H.G., Chaves M.M. Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. *Journal of Experimental Botany*. 2007;58:815–825. DOI: 10.1093/jxb/erl153.
24. Reynolds M.P., Dreccer F., Trethowan R. Drought-adaptive traits derived from wheat wild relatives and landraces. *Journal of Experimental Botany*. 2007;58:177–186. DOI: 10.1093/jxb/erl250.
25. Leinonen N., Jones H.G. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of Experimental Botany*. 2004;55(401):1423–1431. DOI: 10.1093/JXB/ERH146.
26. Araus J.L., Slafer G.A., Reynolds M.P., Royo C. Plant Breeding and Drought in C3 Cereals: What Should We Breed For? *Annals of Botany*. 2002;89:925–940. DOI: 10.1093/AOB/MCF049.
27. Chesnokov Y.V., Kanash E.V., Mirskaya G.V., Kocherina N.V., Rusakov D.V., Lohwasser U., Börner A. QTL mapping of diffuse reflectance indices of leaves in hexaploid bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Russian Journal of Plant Physiology*. 2019;66:77–86. DOI: 10.1134/S1021443719010047.

Научная статья
УДК 631.544.4
DOI: 10.31857/S0869769825020101
EDN: GEGBFE

Влияние спектрального состава искусственного освещения на биохимический состав плодов томатов *Solanum lycopersicum* L.

И.В. Князева, А.А. Смирнов✉

Инна Валерьевна Князева
кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия
knyazewa.inna@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1065-1814>

Александр Анатольевич Смирнов
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия
alexander8484@inbox.ru
<http://orcid.org/0000-0002-9236-2281>

Аннотация. Свет является важным фактором окружающей среды, который регулирует накопление микро- и макроэлементов и органических кислот в плодах томата. Применение светодиодов для освещения в процессе роста и развития томатов является эффективным методом улучшения качества плодов томатов. В этом исследовании использовались светодиодные источники света с комбинированным спектральным составом и газоразрядные лампы высокого давления при выращивании томатов в климатической камере. Методом капиллярного электрофореза определены массовые доли катионов (ионов аммония, калия, натрия, магния и кальция), анионов (хлорид-, нитрат-, сульфат- и фосфат-ионов) и органических кислот. Установлено, что тип источников света и спектральный состав оптического излучения освещения являются одними из ключевых факторов повышения качества томатов. При выращивании под светодиодами в плодах томата увеличивалась концентрация яблочной кислоты на 60%, янтарной кислоты – в 2 раза, магния – на 14% и кальция – на 57% по сравнению с плодами растений томата, выращенных под газоразрядными лампами. Таким образом, подбирая спектральный состав оптического излучения, потенциально можно увеличить содержание целевых компонентов и улучшить вкусовые качества томатов.

Ключевые слова: томат, светодиод, биохимический состав, светокультура

Для цитирования: Князева И.В., Смирнов А.А. Влияние спектрального состава искусственного освещения на биохимический состав плодов томатов *Solanum lycopersicum* L. // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 138–144. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020101>

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (рег. № НИОКТР 122022100140-3, шифр научной темы FGUN-2025-0008).

The influence of the spectral composition of artificial lighting on the biochemical composition of tomato fruits *Solanum lycopersicum* L.

I.V. Knyazeva, A.A. Smirnov

Inna V. Knyazeva

Candidate of Sciences in Biology, Senior Researcher
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
knyazewa.inna@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1065-1814>

Alexander A. Smirnov

Candidate of Sciences in Technique, Senior Researcher
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia
alexander8484@inbox.ru
<http://orcid.org/0000-0002-9236-2281>

Abstract. Light is an important environmental factor that regulates the accumulation of micro- and macroelements and organic acids in tomato fruits. The use of LEDs for lighting during the growth and development of tomatoes is an effective method for improving the quality of tomato fruits. In this study, LED light sources with a combined spectral composition and high-pressure discharge lamps were used to grow tomatoes in a climate chamber. Using capillary electrophoresis, the mass fractions of cations (ammonium, potassium, sodium, magnesium and calcium ions), anions (chloride, nitrate, sulfate and phosphate ions) and organic acids were determined. It has been established that the type of light sources and the spectral composition of optical radiation are one of the key factors in improving the quality of tomatoes. When grown under LEDs, the concentration of malic acid in tomato fruits increased by 60%, succinic acid by 2 times, and magnesium by 14% and calcium by 57% compared to the fruits of tomato plants grown under gas-discharge lamps. Thus, by selecting the spectral composition of optical radiation, it is potentially possible to increase the content of target components and improve the taste of tomatoes.

Keywords: tomato, LED, biochemical composition, light culture

For citation: Knyazeva I.V., Smirnov A.A. The influence of the spectral composition of artificial lighting on the biochemical composition of tomato fruits *Solanum lycopersicum* L. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2): 138–144. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020101>

Funding. The work was carried out within the framework of the state task of the FSBSI FSAC VIM (Reg. No NIOKTR 122022100140-3, Scientific theme code FGUN-2025-0008).

Введение

Томат (*Solanum lycopersicum* L.) относится к семейству пасленовых и является одной из наиболее широко потребляемых фруктовых культур в мире. В 2022 г. в России производство помидоров защищенного грунта составило 1069,0 тыс. т [1].

К качествам томатов относятся, их внешний вид, вкус, пищевая ценность [2]. Сладкий вкус помидоров в основном обусловлен фруктозой и глюкозой, а кислый вкус – лимонной и яблочной кислотами [3]. Было установлено, что наиболее важными факторами, определяющими высокие вкусовые качества томатов, являются более высокое содержание лимонной

кислоты и более низкое содержание воды [4]. Поэтому содержание сахаров и кислот часто используется в качестве важных показателей для оценки вкуса томата. Высокое содержание щавелевой кислоты является неблагоприятным фактором для томатов с точки зрения здоровья человека, так как снижается скорость использования кальция, и может увеличиться риск образования камней в почках [5].

Для усовершенствования технологии культивирования овощной продукции в защищенном грунте важны исследования накопления микро- и макроэлементов в зависимости от вида растений и условий их выращивания. Внешняя среда (например, свет, вода и удобрения) также играет важную роль в регуляции синтеза витаминов и органических кислот [6]. В последнее время в защищенном грунте постепенно внедряются светодиодные источники света для облучения растений [7]. Благодаря возможности подбора спектрального состава излучения светодиодные источники света позволяют оптимизировать условия выращивания под конкретную овощную культуру. Ранее нами были проведены исследования влияния спектра излучения натриевых ламп и светодиодов с преобладанием красного и синего излучения на экстракцию микро- и макроэлементов в листьях огурца, томата и салата [8]. Было установлено, что с увеличением доли зеленого света в варианте с натриевыми лампами в листьях огурца и томата коэффициент накопления магния (а в листьях томата еще и железа и марганца) был выше, чем при облучении светодиодами. Другое исследование по выращиванию томатов в теплице с дополнительной светодиодной досветкой показало, что облучение монохроматическим светом красных светодиодов привело к большему накоплению солей фосфора ($P-PO_4$) и калия (K^+) и меньшему накоплению азота ($N-NO_3$) по сравнению с контрольной группой, которая не подвергалась дополнительному светодиодному освещению [9]. Красные светодиоды также увеличивают содержание магния и кальция в плодах томатов – на 74 и 40% по сравнению с натриевыми лампами, а добавление дальнего красного диапазона излучения еще больше увеличивает содержание и концентрацию натрия [10]. К тому же спектр света влияет на сенсорные характеристики томатов и морфологию листьев [11]. Снижение качества плодов происходит при использовании верхних натриевых ламп в качестве дополнительного источника света при выращивании томатов в теплицах.

Таким образом, различные участки спектра по-разному влияют на накопление микро- и макроэлементов и органических кислот в плодах томатов. Комбинируя светодиоды с разными диапазонами излучения, можно улучшить питательную ценность и вкусовые качества томатов. Целью этого исследования было оценить влияние светодиодных источников света с комбинированным спектральным составом на биохимический состав плодов томатов *Solanum lycopersicum* L., выращенных в климатической камере.

Материалы и методы

Объектом исследований был выбран сорт Благодатный селекции ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства». Сорт отличается среднеранним развитием от массовых всходов до созревания 98–107 суток, детерминантным типом. Растения томатов выращивались в двух климатических камерах (по 30 в каждой камере) под разным освещением на минераловатном субстрате с капельным поливом. Для полива использовался стандартный раствор Кнопа. Микроклиматические параметры в камере поддерживались с помощью климатического компьютера. Относительная влажность воздуха выдерживалась на уровне $60 \pm 10\%$, температура воздуха день/ночь – $25/18 \pm 5$ °C.

Для проведения экспериментальных исследований использовали светодиодное освещение (СИД) с суммарной облученностью ФАР 278 ± 10 ммоль/м²с. Распределение облученности по спектральным диапазонам: синий (47,9 ммоль/м²с), зеленый (62,7 ммоль/м²с), красный (119,6 ммоль/м²с) и дальний красный (48,3 ммоль/м²с). Спектральный состав излучения опытного варианта представлен на рис. 1.

В качестве контрольного источника освещения использовали комбинацию из двух натриевых трубчатых ламп высокого давления ДНАТ-600 и одной металлогалогенной лампы ДРИ-600 с цветовой температурой 4000 К. Облученность ФАР составляла 270 ± 10 ммоль/м²с. Спектральный состав излучения контрольного варианта представлен на рис. 2.

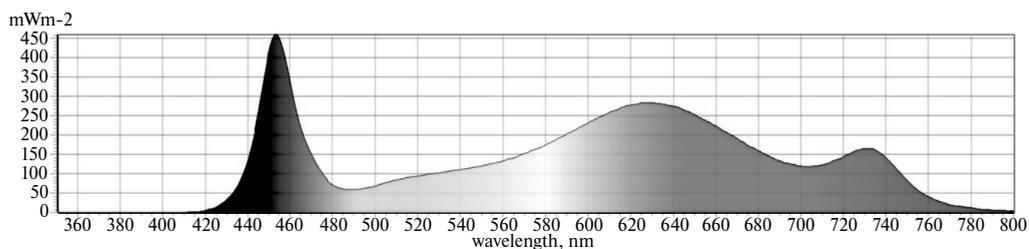


Рис. 1. Спектральный состав опытного светодиодного освещения (СИД) в климатической камере при выращивании растений томатов

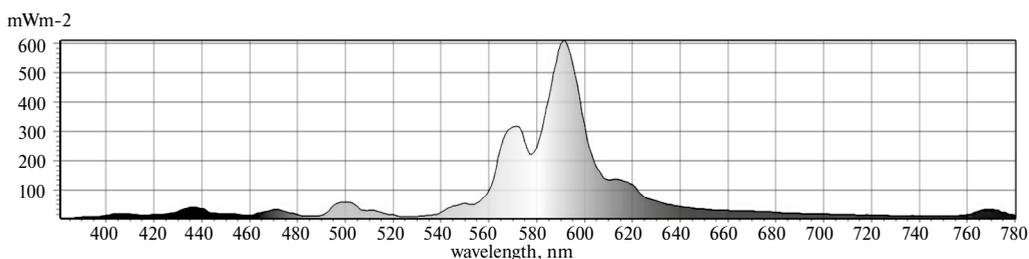


Рис. 2. Спектральный состав контрольного варианта освещения в климатической камере при выращивании растений томатов

Измерения плотности потока фотонов и спектрального состава излучения проводили с помощью прибора МК350D Compact Spectrometer (UPRtek Corp. Miaoli County, Taiwan).

Определение массовой доли катионов (ионов аммония, калия, натрия, магния и кальция), анионов (хлорид-, нитрат-, сульфат- и фосфат-ионов) и органических кислот проводилось методом капиллярного электрофореза с использованием аналитического комплекса на основе системы капиллярного электрофореза «Капель-205» (Россия).

Для исследования отбирались плоды томата с 5 растений, выбранных случайным образом. Анализ данных оценивали методами дисперсионного анализа с использованием программного обеспечения STADIA 8.0 (Россия). Для проверки достоверности полученных данных использовали тест Дункана при уровне вероятности $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

В результате проведенного биохимического анализа методом капиллярного электрофореза был определен состав органических кислот в плодах томата (рис. 3). по соотношению концентраций всех проанализированных органических кислот в плодах преобладает лимонная кислота, далее по содержанию – яблочная кислота. Тип освещения не повлиял на накопление щавелевой кислоты, ее значение варьировало в пределах 1,84–2,08 мг/100 г. Плоды томатов с незначительным содержанием щавелевой кислоты рекомендуются для употребления при диетическом питании [12].

Светодиодное освещение оказывало лучшее воздействие на синтез указанных выше органических кислот. Содержание яблочной кислоты в плодах томатов при светодиодном освещении составило 34,43 мг/100 г сырой массы по сравнению с натриевым освещением (контроль) – 21,28 мг/100 г сырой массы плодов томатов. Яблочная кислота отвечает за метаболизм обмена веществ в живых организмах, поэтому увеличение концентрации кислоты положительно влияет на обменные процессы.

Минеральные вещества являются незаменимыми микронутриентами питания человека, которые должны ежедневно потребляться с пищей. К важным макроэлементам относят

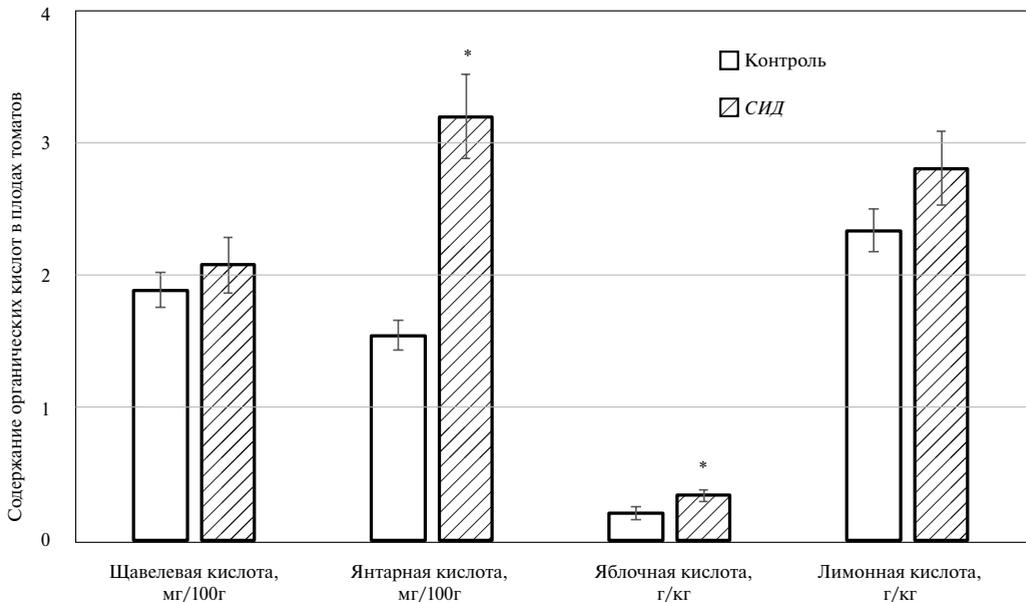


Рис. 3. Содержание органических кислот в плодах томата сорта Благодатный. Наличие символа астериска указывает на значительные различия между экспериментальными и контрольными образцами ($p < 0,05$)

калий, кальций, магний, фосфор и серу. Нами был изучен катионно-анионный состав плодов томатов, выращенных под разным освещением (рис. 4).

Освещение в большей степени повлияло на содержание магния, кальция и серы в плодах томатов. Повышенное содержание макроэлементов наблюдалось в плодах при светодиодном освещении. Выявлено, что при светодиодном освещении концентрация магния составила 11,2 мг/100 г, что по отношению к контролю 9,8 мг/100 г больше на 14,3%. Светодиоды могли привести к временному повышению содержания магния в листьях в качестве защитного механизма растений от чрезмерного поглощения излучения ФАР, так как спектр излучения светодиодов хорошо согласуется со спектром поглощения основных фотосинтетических пигментов растений. Это впоследствии привело к увеличению концентрации магния в плодах.

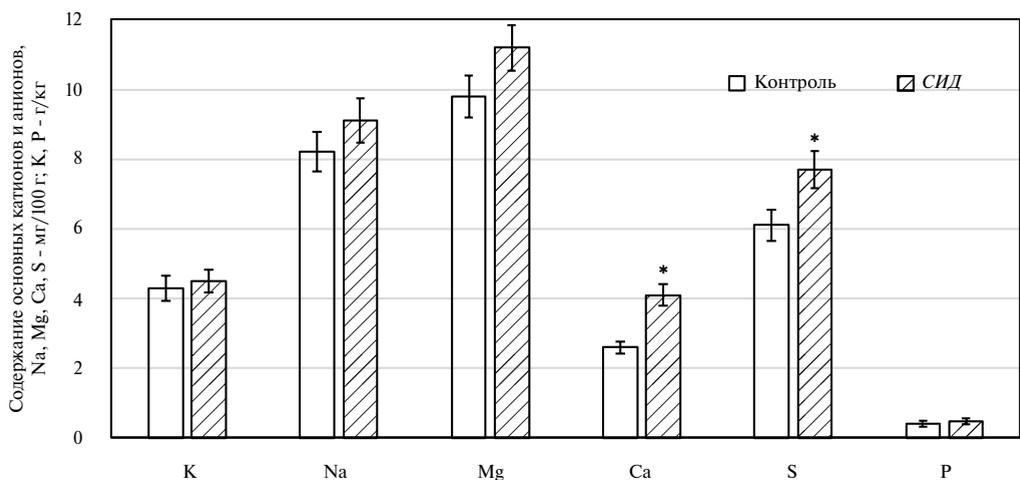


Рис. 4. Содержание основных катионов и анионов в сырой массе плодов томатов сорта Благодатный. Наличие символа астериска указывает на значительные различия между экспериментальными и контрольными образцами ($p < 0,05$)

Как видно из рис. 4, светодиодное освещение также значительно повлияло на накопление кальция в плодах томатов с прибавкой в 57,7% и серы, что также наблюдалось и в другом исследовании [10]. по содержанию калия, натрия и фосфора различий между изучаемыми вариантами освещения не наблюдалось.

Следует отметить, что наблюдаемые различия в биохимическом составе могут быть вызваны множеством факторов, таких как равномерность распределения света, спектр излучения, а также изменения микроклимата, создаваемого этими источниками света. Например, газоразрядные лампы содержат в спектре излучения много инфракрасной составляющей, что повышает температуру листьев, особенно верхней части растений [7]. Увеличение температуры листьев влияет на транспирацию и, следовательно, может повлиять на потребление и накопление микро- и макроэлементов, это требует дальнейшего изучения.

Выводы

Наши исследования показали, что тип источников света и спектральный состав оптического излучения освещения являются одними из ключевых факторов повышения качества томатов. Светодиоды позволяют снизить потребление энергии и улучшить качественные характеристики томатов. Установлено, что под светодиодами в плодах томата больше накапливались яблочная и янтарные кислоты, магний, кальций и сера. Подбирая спектральный состав оптического излучения светодиодов, потенциально можно увеличить содержание целевых компонентов и улучшить вкусовые качества томатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бутов И.С. Объем рынка и потребление томатов в России // Картофель и овощи. 2024. № 1. С. 12–16.
2. Pahy R., Tlili I., Siddiqui M.W., Hdider C., Lenucci M.S. Inside and beyond color: Comparative overview of functional quality of tomato and watermelon fruits // *Frontiers in Plant Science*. 2019. Vol. 10. 769.
3. Zhang J., Liu S., Zhu X., Chang Y., Wang C., Ma N., Wang J., Zhang X., Lyu J., Xie J. A Comprehensive Evaluation of Tomato Fruit Quality and Identification of Volatile Compounds // *Plants*. 2023. Vol. 12. 2947.
4. Knyazeva I.V., Dorokhov A.S., Verzhinina O.V., Myachikova N.I., Grishin A.A., Gudimo V.B., Georgescu C. The effect of amber acid on the productivity and chemical composition of tomatoes grown in a climatic chamber // *Scientific Study, Research Chemistry, Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*. 2021. Vol. 22 (3). P. 311–319.
5. Palmieri F., Estoppey A., House G.L., Lohberger A., Bindschedler S., Chain P.S., Junier P. Oxalic acid, a molecule at the crossroads of bacterial-fungal interactions // *Advances in Applied Microbiology*. 2019. Vol. 106. P. 49–77.
6. Agbede T., Adekiya A., Ale M., Eifediyi E.K., Olatuni C.A. Soil properties, growth, fruit yield, mineral, lycopene and vitamin C contents of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) grown with green manures and NPK fertilizer // *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 2018. Vol. 83. P. 291–297.
7. Бурьнин Д.А., Смирнов А.А. Обзор источников освещения для тепличных хозяйств и фабрик растений // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68, № 1 (42). С. 105–113.
8. Холманский А.С., Смирнов А.А., Зайцева Н.В. Зависимость экстракции микро- и макроэлементов культурными растениями от спектра излучения фитооблучателя // *Агрофизика*. 2019. № 1. С. 52–59.
9. Neață D.S., Popescu G., Popa P., Drăghici E.E., Dobrinou M., Nicolae R., Vișan I. Biochemical changes, induced by led light, in tomato plants, grown in the integrated management system (SMI) of agroecosystem resistance // *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. Vol. 64, No. 1. 2021.
10. Kim H., Yang T., Choi S., Wang Y., Lin M., Liceaga A.M. Supplemental intracanopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes // *Scientia Horticulturae*. 2019. Vol. 261. 108985.

11. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Медведев Г.В. Разработка экспериментального фитотрона и его применение в исследованиях по энергоэкологии светокультуры // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 2. С. 40–48. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48>.
12. Ших Е.В., Елизарова Е.В., Махова А.А., Брагина Т.В. Роль томатов и продуктов из них в здоровом питании человека // Вопросы питания. 2021. Т. 90, № 4. С. 129–137.

REFERENCES

1. Butov I.S. Ob'ъем rynka i potrebleniye tomatov v Rossii = [Market volume and consumption of tomatoes in Russia]. *Potatoes and Vegetables (Russia)*. 2024;(1):12–16. (In Russ.).
2. Ilahy R., Tlili I., Siddiqui M.W., Hdidier C., Lenucci M.S. Inside and beyond color: Comparative overview of functional quality of tomato and watermelon fruits. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10. 769.
3. Zhang J., Liu S., Zhu X., Chang Y., Wang C., Ma N., Wang J., Zhang X., Lyu J., Xie J. A Comprehensive Evaluation of Tomato Fruit Quality and Identification of Volatile Compounds. *Plants*. 2023;12. 2947.
4. Knyazeva I.V., Dorokhov A.S., Vershinina O.V., Myachikova N.I., Grishin A.A., Gudimo V.B., Georgescu C. The effect of amber acid on the productivity and chemical composition of tomatoes grown in a climatic chamber. *Scientific Study & Research Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*. 2021;22(3):311–319.
5. Palmieri F., Estoppey A., House G.L., Lohberger A., Bindschedler S., Chain P.S., Junier P. Oxalic acid, a molecule at the crossroads of bacterial-fungal interactions. *Advances in Applied Microbiology*. 2019;106:49–77.
6. Agbede T., Adekiya A., Ale M., Eifediyi E.K., Olatuni C.A. Soil properties, growth, fruit yield, mineral, lycopene and vitamin C contents of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) grown with green manures and NPK fertilizer. *Agriculturae Conspectus Scientificus*. 2018;83:291–297.
7. Burynin D.A., Smirnov A.A. Obzor istochnikov osveshcheniya dlya teplichnykh khozyaystv i fabric rasteniy = [Overview of the grow lights used in greenhouses and plant factories]. *Elektrotehnologii i Elektrooborudovanie v APK (Russia)*. 2021;68(1):105–113. (In Russ.).
8. Kholmansky A.S., Smirnov A.A., Zaitseva N.V. Zavisimost' ekstraktsii mikro- i makroelementov kul'turnymi rasteniyami ot spectra izlucheniya fitoobluchatelya = [Dependence of the extraction of micro- and macroelements by cultivated plants on the radiation spectrum of the phyto-irradiator]. *Agrophysics (Russia)*. 2019;1:52–59. (In Russ.).
9. Neață D.S., Popescu G., Popa P., Drăghici E.E., Dobrinou M., Nicolae R., Vișan I. Biochemical changes, induced by led light, in tomato plants, grown in the integrated management system (SMI) of agroecosystem resistance. *Scientific Papers. Series A. Agronomy*. 2021;64(1).
10. Kim H., Yang T., Choi S., Wang Y., Lin M., Liceaga A.M. Supplemental intracanopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Scientia Horticulturae*. 2019;261. 108985.
11. Rakutko S.A., Rakutko E.N., Medvedev G.V. Development of an Experimental Phytotron and its Application in the Research on the Energy-ecological Efficiency of Indoor Plant Lighting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(2):40–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-2-40-48>.
12. Shikh E.V., Elizarova E.V., Makhova A.A., Bragina T.V. Rol' tomatov i produktov iz nikh v zdorovom pitanii cheloveka = [The role of tomatoes and products made from them in healthy human nutrition]. *Voprosy Pitaniya (Russia)*. 2021;90(4):129–137. (In Russ.).

Научная статья
УДК 581.4 (58.082.115)
DOI: 10.31857/S0869769825020115
EDN: GEFPMU

Гербарий Амурского филиала Ботанического сада-института ДВО РАН: история и современность

Т.Н. Веклич✉, Н.А. Кочунова

Татьяна Николаевна Веклич

кандидат биологических наук, научный сотрудник
Амурский филиал Ботанического сада-института ДВО РАН, Благовещенск, Россия
tbliznjuk@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1880-0108>

Наталья Анатольевна Кочунова

кандидат биологических наук, научный сотрудник
Амурский филиал Ботанического сада-института ДВО РАН, Благовещенск, Россия
taraninan@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8621-8593>

Аннотация. Описана история формирования Гербария Амурского филиала БСИ ДВО РАН (ABGI) и перспективы его развития. Приведены сведения о структуре и объеме коллекционных фондов Гербария, основу которого составляют сборы сосудистых растений, мохообразных и макромитозов с территории Приамурья. Гербарий насчитывает 30 970 образцов, из них 26 670 – сосудистые растения, 2600 – грибы и 1700 – мохообразные. Уникальность коллекционного фонда заключается в наличии образцов редких и эндемичных видов растений и грибов. Работа группы «Гербарий» направлена не только на хранение и пополнение коллекционных фондов, но и их цифровизацию в базу Электронного гербария БСИ ДВО РАН, а также использование в эколого-образовательной и научно-просветительской деятельности учреждения.

Ключевые слова: Гербарий ABGI, коллекционный фонд, электронная база, сосудистые растения, мохообразные, грибы, Амурская область, Дальний Восток России

Для цитирования: Веклич Т.Н., Кочунова Н.А. Гербарий Амурского филиала Ботанического сада-института ДВО РАН: история и современность // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 145–155. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020115>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 122040800085-4.

Herbarium of the Amur Branch of the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences: history and contemporaneity

T.N. Veklich, N.A. Kochunova

Tatiana N. Veklich

Candidate of Sciences in Biology, Researcher

Amur Branch of Botanical Garden-Institute, FEB RAS, Blagoveshchensk, Russia

tbliznjuk@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1880-0108>

Natalia A. Kochunova

Candidate of Sciences in Biology, Researcher

Amur Branch of Botanical Garden-Institute, FEB RAS, Blagoveshchensk, Russia

taraninan@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8621-8593>

Abstract. The article deals with Herbarium of the Amur Branch of the BGI FEB RAS (ABGI), its formation and development prospects. Information about structure and volume of the Herbarium's collection funds is provided, which are formed the basis of collections of vascular plants, bryophytes and macromycetes from the Amur region. The Herbarium contains 30 970 specimens, of which 26 670 are vascular plants, 2600 are fungi and 1700 are bryophytes. The uniqueness of the collection fund consists in existence of samples of rare and endemic species of plants and fungi. The work of the Herbarium group is aimed not only at storing and replenishing collection funds, but also their digitalization in the database of the Electronic Herbarium of the BGI FEB RAS, as well as their applying in environmental, educational and scientific educational activities of the institution.

Keywords: Herbarium, ABGI, collection fund, electronic database, vascular plants, bryophytes, fungi, Amur region, Russian Far East

For citation: Veklich T.N., Kochunova N.A. Herbarium of the Amur Branch of the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences: history and contemporaneity. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2): 145–155. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020115>

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: project 122040800085-4.

На протяжении веков гербарные коллекции служат универсальным банком данных растительного мира. Гербарий является основой любого биологического исследования в области систематики, экологии, анатомии, ботанического ресурсоведения. Ценность гербарных коллекций заключается не только в использовании их в настоящее время, но и в будущем – при проведении мониторинга за состоянием биоты.

На современном этапе развития общества в связи с возникновением глобальной проблемы охраны биоразнообразия растительного мира гербарные коллекции играют важную роль в просветительской работе, популяризации природоохранных знаний [1].

Важнейшей научной коллекцией Амурского филиала Ботанического сада-института ДВО РАН (АФ БСИ ДВО РАН) является «Гербарий высших сосудистых растений, мохообразных

и грибов», который в феврале 2018 г. был включен в Глобальный каталог гербариев – Index Herbariorum и получил международный акроним (ABGI). Главной задачей Гербария является отражение систематического и биологического разнообразия растительного мира Дальневосточного региона, в первую очередь Амурской области; обеспечение надежного хранения образцов коллекций и их доступности для исследователей. Основными принципами составления коллекций являются флористический и регионально-географический.

История создания Гербария ABGI

Начало формирования коллекционных фондов Гербария АФ БСИ ДВО РАН положено в 1988 г. ботаниками В.М. Старченко и Г.Ф. Дарман, проводившими исследования флоры на территории Амурской области в Селемджинском и Зейском районах. Ими же впоследствии собрана значительная часть гербария сосудистых растений из разных районов области и других регионов российского Дальнего Востока (РДВ) (рис. 1).

С открытием в 1999 г. аспирантуры на базе Ботанического сада существенный вклад в пополнение гербарных фондов внесли молодые сотрудники: А.В. Шагохина (Денисенко), Т.Н. Веклич (Близнюк), Е.В. Лесик (Аистова), Т.А. Полякова, А.Н. Воробьева, И.А. Крещенко, И.В. Козырь, Я.В. Болотова, О.В. Котенко (Гладилина), В.А. Костикова (Серебрякова), Е.В. Андышева, которыми в рамках своих диссертационных исследований были собраны сосудистые растения из разных районов Дальнего Востока и Сибири.

Гербарий сосудистых растений систематически пополнялся как гербарными сборами сотрудников Ботанического сада, так и поступал по обмену из других учреждений. С 2000 г. коллекция сосудистых растений пополнилась экзикатами С.С. Харкевича из Биолого-почвенного института ДВО РАН (VLA); образцами из Благовещенского государственного педагогического университета, Муравьевского парка, Хинганского заповедника и Лесоопытной станции г. Свободного. Всего по обмену поступило около 3500 гербарных листов.

В гербарную коллекцию сосудистых растений поступали образцы, собранные не только научными сотрудниками, но и любителями-ботаниками. Так, фонды Гербария АФ БСИ ДВО РАН пополнились 1500 гербарными образцами растений от частных коллекторов: С.В. Брянина, Е.Ю. Пикунова, В.Ю. Котельникова, Е.И. Маликовой, В.В. Шалыгина.



Рис. 1. В.М. Старченко за работой в полевых условиях

Долгое время, из-за отсутствия специализированного хранилища, работ по инвентаризации гербарных фондов не проводилось. И лишь в 2007 г., когда территория и строения на станции Широной были переданы Ботаническому саду, у Гербария появилось собственное помещение. С этого времени началась работа с Гербарием как с научной коллекцией – систематизация накопившихся материалов, учет количества гербарных образцов.

После ревизии накопленного гербарного материала сосудистых растений, собранного сотрудниками и аспирантами Ботанического сада и поступившего по обмену в разные годы, в коллекционный фонд было инсерировано 17 000 гербарных листов.

Большие усилия в систематизацию материала вложила Т.В. Ступникова, которая курировала гербарную деятельность с 2017 по 2019 г. Ею была организована работа по инвентаризации гербарного фонда, внесению гербарных образцов в электронную базу данных и их цифровизации.

С конца 2019 г. по настоящее время куратором отдела сосудистых растений Гербария является Т.Н. Веклич, под ее руководством был завершен этап инвентаризации всего накопленного гербарного материала, выполнено размещение коллекции сосудистых растений по системе Энглера [2].

Коллекция мохообразных Гербария АФ БСИ ДВО РАН была заложена научным сотрудником лаборатории ботаники М.С. Чикуновой в 2013 г. Основу коллекции составляют ее собственные сборы с территории Амурской области, а также имеются образцы листовых мхов, собранные В.Я. Черданцевой и переданные по обмену из БПИ ДВО РАН.

Коллекция грибов-макромицетов основана в 2013 г. научным сотрудником лаборатории защиты растений Н.А. Кочуновой, которая в настоящее время является куратором отдела грибов. В 2018 г. гербарий макромицетов размещен в отдельном от гербария растений специализированном помещении. Основной объем коллекции собран Н.А. Кочуновой на особо охраняемых территориях Дальнего Востока, а также имеются образцы, предоставленные коллекторами из других научных учреждений (ИКАРП ДВО РАН, ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН). Гербарий грибов инсерирован в соответствии с системой, принятой в 10-м издании “Ainsworth and Bisby’s Dictionary of fungi” [3].

Гербарий АФ БСИ ДВО РАН является частью объединенной биоресурсной коллекции Гербария БСИ ДВО РАН (VBGI) – единственного на Дальнем Востоке электронного гербария, доступного для любого пользователя: <https://botsad-amur.ru/kolleksii/gerbariy>.

Электронный гербарий представляет собой многопользовательское Web-приложение, которое позволяет хранить, добавлять и изменять данные о гербарных образцах [4]. Работа по наполнению базы данных сетевого электронного гербария e-Herbarium в Амурском филиале БСИ ДВО РАН началась с 2017 г.

С начала 2018 г. выполняется оцифровка гербария растений с использованием сканера Microtek Object Scan 1600. Предобработка и публикация полученных изображений осуществляется через разработанный в БСИ ДВО РАН web-интерфейс загрузки изображений (<http://botsad.ru/hitem/imload>). Пользовательский доступ работы с гербарием осуществляется через поисковую страницу электронного каталога: <http://botsad.ru/herbarium>.

В 2021 г. в связи с увеличением объема и репрезентативности гербарных коллекций при лаборатории ботаники АФ БСИ ДВО РАН была создана рабочая группа «Гербарий» под руководством Т.Н. Веклич. В состав рабочей группы вошли 4 человека: 2 лаборанта – В.В. Ильина (Семенко) и И.В. Любавина (Андышева) и два куратора отделов – Т.Н. Веклич и Н.А. Кочунова.

Современное состояние и уникальность коллекционных фондов

Гербарий АФ БСИ ДВО РАН включает 3 коллекции: сосудистые растения – более 30 000 образцов, в том числе 26 670 листов, оформленных согласно международным правилам гербарного дела и доступных для пользователей в электронной базе; мохообразные – 1700 образцов; макромицеты – около 3000 образцов, из которых 2600 инсерировано и около 400 находятся в камеральной обработке.

В коллекции сосудистых растений представлены виды, собранные практически со всей территории Дальнего Востока: Приморского, Хабаровского, Камчатского краев, Чукотского автономного округа, Амурской, Сахалинской, Магаданской и Еврейской автономной областей. Имеются сборы из других регионов России – Сибири (Алтай, Якутия, Бурятия, Забайкальский край), Центральной России (Ивановская, Ярославская области). Также в гербарном фонде представлены образцы из других стран – Монголии и США (штат Аляска). В сборах сосудистых растений представлено около 90% видового разнообразия флоры Амурской области и около 50% флоры Дальнего Востока.

Объем коллекционных фондов Гербария АФ БСИ ДВО РАН по состоянию на 01.05.2024 г. показан в таблице.

В последнее время в Амурской области ощутимо возросло антропогенное воздействие на природные экосистемы: введены в эксплуатацию Бурейская и Нижне-Бурейская ГЭС, нефте- и газопроводные системы, построены космодром «Восточный» и Амурский газоперерабатывающий завод, строится Амурский газохимический комплекс. Сведение почвенно-растительного покрова в зонах освоения и затопление территорий в результате заполнения водохранилищ привели к исчезновению некоторых местообитаний редких и эндемичных видов растений, таких как адонис амурский (*Adonis amurensis* Regel et Radde), аризема амурская (*Arisaema amurense* Maxim.), камнеломка Коржинского (*Saxifraga korshinskii* Kom.), многорядник укореняющийся (*Polystichum craspedosorum* (Maxim.) Diels), одуванчик линейнолистный (*Taraxacum lineare* Worosch. et Schaga), траутфеттерия японская (*Trautvetteria japonica* Siebold et Zucc.) и др. Благодаря представленности в коллекционных фондах АФ БСИ ДВО РАН гербарных образцов вышеперечисленных таксонов из утраченных местообитаний сохраняются генетические ресурсы и возможности их использования в научных исследованиях.

Среди хранящихся гербарных материалов сосудистых растений особый интерес представляют сборы узколокальных эндемиков – видов, произрастающих только на территории Амурской области, таких как камнеломка селемджинская (*Saxifraga selemdzhensis* Gorovoj et Worosch.), водосбор Камелина (*Aquilegia kamelinii* A. Erst, Schaulo et Schmakov) и болотница Старченко (*Eleocharis starczenkoae* A.E. Kozhevnik.) (рис. 2).

Также в коллекции представлены гербарные образцы охраняемых и находящихся под угрозой исчезновения видов, в том числе видов, занесенных в Красную книгу Амурской области [5], таких как лук одноцветковый (*Allium monanthum* Maxim), однопокровница амурская (*Arisaema amurense* Maxim.), спаржа даурская (*Asparagus davuricus* Fisch. ex-Link), мордовник рассеченный (*Echinops dissectus* Kitag.), параиксерис поздний (*Paraixeris serotina* (Maxim.) Tzvelev) и др. Из числа видов, занесенных в Красную книгу Российской Федерации¹: одуванчик линейнолистный (*Taraxacum lineare* Worosch. et Schaga), адлумия

Объем и структура коллекционных фондов Гербария АВГИ

Регион	Гербарные образцы, ед.		
	Сосудистые растения	Мохообразные	Грибы
Амурская область	20 696	1600	2000
Другие регионы РДВ	4183	100	595
Сибирь	1681	0	0
Другие регионы России	10	0	0
Регионы мира	100	0	5
Итого	26 670	1700	2600

¹ Перечень объектов растительного мира, занесенных в Красную книгу Российской Федерации. Приложение к Приказу Минприроды России № 320 от 23.05.2023.



Рис. 2. Гербарий: а – *Saxifraga selemdzhensis*, б – *Aquilegia kamelinii*, в – *Eleocharis starczenkoae*

азиатская (*Adlumia asiatica* Ohwi), родиола розовая (*Rhodiola rosea* L.), калипсо луковичная (*Calypso bulbosa* (L.) Oakes) и др. В Гербарии имеется образец венерина башмачка шансийского (*Cypripedium shanxiense* S.C. Chen) – редкого вида на территории России, впервые задокументированного в Амурской области [6] (рис. 3).

Микологическая коллекция представлена 738 видами макромицетов, относящихся к 302 родам, 67 семействам из 21 порядка, что составляет приблизительно 60–65% от общего биоразнообразия микобиоты Амурской области.

Наибольшее количество образцов представлены в порядках Polyporales (835), Agaricales (652), Hymenochaetales (273) и Russulales (223). Большая часть экземпляров собрана на древесине (около 1200), напочвенные и подстилочные грибы насчитывают около 1000 экземпляров, остальные образцы собраны на прочих субстратах (опаде, углях, мхах и т.д.).

Из числа редких и охраняемых видов грибов, представленных в коллекции, можно назвать: бондарцевомицес тиссовый *Bondarcevomyces taxi* (Bondartsev) Parmasto; шишкогриб хлопьеножковый *Strobilomyces strobilaceus* (Scop.) Berk.; трутовик лакированный *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst.; пикнопореллюс бело-желтый *Pycnoporellus alboluteus* (Ellis et Everh.) Kotl. et Pouzar; чешуйница древесинная *Leucopholiota lignicola* (P. Karst.) Harmaja (внесены в Красную книгу РФ¹); трутовик зонтичный *Polyporus umbellatus* (Pers.) Fr., лиственничная губка *Fomitopsis officinalis* (Vill.) Bondartsev et Singer; спарассис широкопластинковый *Sparassis latifolia* Y.C. Dai et Zheng Wang; тремелла листоватая *Phaeotremella foliacea* (Pers.) Wedin, J.C. Zamora et Millanes; ежовик гребенчатый *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers. [5].



Рис. 3. Гербарий *Cypripedium shanxiense*

¹ Перечень объектов растительного мира, занесенных в Красную книгу Российской Федерации. Приложение к Приказу Минприроды России № 320 от 23.05.2023.

К уникальным находкам относятся несколько образцов базидиальных грибов, собранных впервые на территории Дальнего Востока и не представленных ни в одной другой коллекции гербариев РДВ, такие виды, как паутинник красивейший *Cortinarius rubellus* Cooke, пилолистничек пупковидный *Lentinellus flabelliformis* (Bolton) S. Ito, микроациелла двуспоровая *Mycocaciella bispora* (Stalpers) J. Erikss. et Ryvarden и пр. Большинство образцов афиллофоровых грибов из национального парка «Шантарские острова» были собраны в 2019 г. в ходе первой микологической экспедиции на этой территории, и имеются они только в гербарном фонде АВГИ.

В коллекции грибов в большинстве содержатся образцы из Амурской области, собранные преимущественно на особо охраняемых природных территориях (Благовещенского и Муравьевского заказников, Зейского, Норского и Хинганского заповедников), также имеются экземпляры из Хабаровского края (Комсомольского заповедника, Хехцирского заказника, национального парка «Шантарские острова»), Еврейской автономной области (окр. г. Биробиджана, заповедника «Бастак»), Приморского края (Уссурийского заповедника) и Сахалинской области (юго-востока о-ва Сахалин). Сборы осуществлены в основном Н.А. Кочуновой, а также микологами Е.А. Ерофеевой (ИКАРП ДВО РАН, г. Биробиджан) и Н.В. Бухаровой (ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии, г. Владивосток). Посильный вклад в пополнение коллекции грибов внесли сотрудники АФ БСИ ДВО РАН Г.Ф. Дарман, Е.В. Лесик, И.М. Котельникова и В.Г. Безбородов, которым было привезено несколько образцов дереворазрушающих грибов из стран юго-Восточной Азии.

Коллекционные фонды Гербария ежегодно пополняются новыми образцами. В соответствии с правилами хранения и содержания гербарных коллекций проводится профилактика порчи насекомыми-вредителями. Все гербарные образцы, как вновь поступающие, так и находящиеся на хранении, обрабатываются инсектицидами и промораживаются при температуре от -70 до -80 °С в двукратной повторности и сроком не менее двух недель в морозильной камере Haier DW-86L388.

Трудоёмкую работу по монтировке гербарных образцов сосудистых растений выполняют в основном лаборанты группы «Гербарий» АФ БСИ ДВО РАН – В.В. Ильина и И.В. Любавина, помощь им оказывают сотрудники Ботанического сада (Н.В. Умец, А.Ю. Иванова, Е.А. Андышева) и студенты биологических специальностей вузов г. Благовещенска (С.В. Борисова, Т.С. Филитова). Внесение сведений в компьютерную базу данных, сканирование и инсерацию образцов сосудистых растений выполняют Т.В. Веклич и В.В. Ильина. Содержанием коллекции макромицетов, в том числе монтированием образцов, инсерацией и внесением сведений в компьютерные базы данных, занимается куратор отдела грибов Н.А. Кочунова.

Сотрудники гербарной группы периодически повышают уровень своей квалификации, участвуя в различных научно-образовательных курсах, конференциях и школах, посвящённых гербарному делу и работе с электронными базами данных, современной ботанической номенклатуре и генетическим технологиям.

Использование Гербария АВГИ в научной, эколого-образовательной и научно-просветительской деятельности

Одно из главных направлений работы Гербария – обеспечение научно-исследовательской деятельности, ориентированное на всестороннее изучение, организацию охраны и рационального использования флоры и микобиоты региона.

С 2015 г. АФ БСИ ДВО РАН предоставляет возможность пользоваться гербарными коллекциями, что обеспечивает проведение различного рода научных исследований в области анатомии, морфологии, систематики и географии сосудистых растений, мохообразных и грибов. Главными заинтересованными пользователями Гербария являются сотрудники из российских научных учреждений, таких как Ботанический сад МГУ имени М.В. Ломоносова, Ботанический сад-институт ДВО РАН, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, ФНЦ Биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, ИКАРП ДВО РАН и др.

Также пользователями коллекционных фондов являются и иностранные ученые, для которых наибольший интерес представляет материал для молекулярно-генетических исследований. Например, по запросу Dr. Tezbeta Kuta (Отделение цитологии и эмбриологии растений Института ботаники, Ягеллонский университет, Краков, Польша) были предоставлены образцы *Viola epipsiloides* Á. Löve & D. Löve; для Xian-Chun Zhang (Институт ботаники, Китайская академия наук) отобраны образцы *Selaginella sanguinolenta* (L.) Spring и *S. tamariscina* (P. Beauv.) Spring; для Ramona Julia Heim (Институт ландшафтной экологии, Мюнстерский университет, Германия) – образцы из семейства *Orchidaceae*.

На базе Гербария систематически проходят практические занятия по ботанике, фитоценологии, ландшафтному проектированию, лесной фитопатологии для студентов вузов г. Благовещенска (ДальГАУ, АмГУ и БГПУ), выполняются курсовые, дипломные, а также научно-исследовательские работы.

По вопросам систематики растений, а также их распространения обращаются за консультацией сотрудники природоохранных организаций (Муравьевского парка, Хинганского и Зейского заповедников), педагоги и учащиеся естественно-научного профиля вузов, колледжей, СПОШ и эколого-образовательных учреждений Амурской области.

Гербарная коллекция является базой для проведения мониторинговых исследований, данные которой широко используются в публикациях по флорам различных территорий, для составления атласов, определителей и других научных пособий. Так, сведения по редким видам растений и грибов использовались при подготовке Красной книги Амурской области [5], а данные о чужеродных видах растений – Черной книги Дальнего Востока [7].

С 2018 г. Ботаническим садом в рамках эколого-образовательной и просветительской деятельности активно ведется работа с населением. Примерами интеграции гербарной коллекции в процесс экологического просвещения является участие Ботанического сада в выставках с демонстрацией гербарных образцов («Амурские первоцветы», «Исчезающая красота России», «Амуриботаникус плоский» и «Amurbotanicus. Чёрная книга. Керамика, дерево, гербарий», «Растения блокадного Ленинграда» и др.). В 2020 г. при содействии Н.А. Кочуновой в Амурском областном краеведческом музее им. Г.С. Новикова-Даурского была открыта экспозиция «Грибы амурских лесов», а в Музее природы Дальневосточного ГАУ экспонирована коллекция патогенных дереворазрушающих грибов, среди экспонатов обеих выставок представлены плодовые тела трутовиков из фондов АВГИ.

Также сотрудниками АФ БСИ ДВО РАН проводятся открытые научно-популярные лекции с привлечением образцов гербарного фонда («Гербарное дело», «Гербарное дело или как сделать растения неподвластными времени», «Черная книга флоры Дальнего Востока или чем опасны инвазии?», «Тайны амурских папоротников», «Их называют амурскими...», «Грибы Амурской области» и др.).

В летнее время Ботанический сад становится образовательной площадкой для школьников. В рамках проекта «Умные каникулы в Ботаническом саду» проводятся обучающие занятия по сбору, гербаризации и определению растений и грибов.

Перспективы развития и научно-прикладное значение Гербария АВГИ

Перспективы развития Гербария АФ БСИ ДВО РАН связаны с пополнением фондов гербарными образцами с малоизученных во флористическом и микологическом отношении территорий Дальнего Востока, формированием коллекции плодов и семян, публикацией эксикат – перечня гербарных образцов видов сосудистых растений, собранных на территории Амурской области.

С 2017 г. ведется работа по формированию дублетного (обменного фонда), который насчитывает в настоящее время 1600 гербарных листов, представленных в основном видами семейств Asteraceae, Cyperaceae, Rosaceae, Ranunculaceae и Fabaceae флоры Амурской области [8]. В 2025 г. планируется опубликовать эксикат для осуществления обмена с Гербариями других научных учреждений.



Рис. 4. Полевая практика в Норском заповеднике под руководством Т.Н. Веклич (справа): сбор растений для гербаризации

Фонды Гербария продолжают интенсивно пополняться, ежегодное поступление составляет от 500 до 2000 единиц и направлено на достижение наиболее полного отражения флористического разнообразия Дальневосточного региона. Наибольшая часть образцов в Гербарий поступает в ходе полевых и экспедиционных работ сотрудников АФ БСИ ДВО РАН по темам научно-исследовательских работ и в ходе выполнения изыскательных проектов для организаций сектора экономики, ориентированных на использование природных ресурсов.

В последнее время для пополнения коллекционного фонда задействованы студенты биологических факультетов вузов г. Благовещенска (ДальГАУ и БГПУ), которые собирают гербарный материал в течение учебных полевых практик под руководством Т.Н. Веклич и Н.А. Кочуновой (рис. 4).

Электронный гербарий имеет неограниченное значение, поэтому одной из приоритетных задач Гербария является полная оцифровка коллекционного фонда, что способствует доступу к гербарной коллекции из любой точки мира и преумножит его научную и образовательную ценность.

Гербарий играет немаловажную роль в сфере профессиональной подготовки высококвалифицированных кадров по биологическим специальностям. Профессиональная деятельность учителя биологии предполагает расширение знаний по биоразнообразию региональной флоры и микобиоты. Для повышения уровня квалификации на базе Гербария планируются различные мероприятия и мастер-классы с педагогами, учителями и школьниками.

Для популяризации знаний о природе своего края Гербарий готов оказывать содействие образовательным организациям, заповедникам, музеям, экологическим центрам в проведении выставок и лекций по разным ботаническим тематикам.

Все вышесказанное подчеркивает важный статус Гербария АВГИ как уникальной научной коллекции, заслуживающей особого внимания, бережного отношения и надежного сохранения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гербарий Московского университета (MW): история, современное состояние и перспективы развития / под ред. С.А. Баландина. М.: Кафедра геоботаники и Гербарий МГУ, 2006. 490 с.
2. Флора СССР / под ред. В.Л. Комарова. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1934–1964. Т. 1–30.
3. Kirk P.M., Cannon P.F., Minter D.W. et al. *Ainsworth and Bisby's Dictionary of fungi*. 10th ed. CABI, 2008. 771 p.
4. Kislov D.E., Bakalin V.A., Pimenova E.A., Verkholat V.P., Krestov P.V. An electronic management system for a digital herbarium: development and future prospects // *Botanica Pacifica*. 2017. № 2. P. 21–33.
5. Красная книга Амурской области: редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных, растений и грибов / под ред. А.В. Сенчика, Е.И. Маликовой. Благовещенск: Изд-во Дальневост. гос. аграр. ун-та, 2020. 499 с.
6. Веклич Т.Н., Кочунова Н.А. Первая достоверная находка *Cypripedium shanxiense* (Orchidaceae) в Амурской области // *Ботанический журнал*. 2022. Т. 107, № 9. С. 931–935.
7. Виноградова Ю.К., Антонова Л.А., Дарман Г.Ф., Девятова Е.А., Котенко О.В., Кудрявцева Е.П., Лесик (Аистова) Е.В., Марчук Е.А., Николин Е.Г., Прокопенко С.В., Рубцова Т.А., Хорева М.Г., Чернягина О.А., Чубарь Е.А., Шейко В.В., Крестов П.В. Черная книга флоры Дальнего Востока: инвазионные виды растений в экосистемах Дальневосточного федерального округа. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2021. 510 с.
8. Веклич Т.Н., Кочунова Н.А., Семенко В.В. Современное состояние Гербария Амурского филиала Ботанического сада-института ДВО РАН (ABGI) // *Бюллетень Ботанического сада-института ДВО РАН*. 2020. Вып. 24. С. 14–18.

REFERENCES

1. Balandin S.A. (Ed.). *Gerbarii Moskovskogo universiteta (MW): istoriya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* = [Herbarium of Moscow University (MW): history, current state and development prospects]. Moscow: Kafedra Geobotaniki i Gerbarii MGU; 2006. 490 s. (In Russ.).
2. Komarov V.L. (Ed.). *Flora SSSR* = [Flora of the USSR]. Moscow; Leningrad: Izd-vo AN SSSR; 1934–1964. T. 1–30. (In Russ.).
3. Kirk P.M., Cannon P.F., Minter D.W. et al. *Ainsworth and Bisby's Dictionary of fungi*. 10th ed. CABI; 2008. 771 p.
4. Kislov D.E., Bakalin V.A., Pimenova E.A., Verkholat V.P., Krestov P.V. An electronic management system for a digital herbarium: development and future prospects. *Botanica Pacifica*. 2017;(2):21–33.
5. Senchik A.V., Malikova E.I. (Eds.). *Krasnaya kniga Amurskoi oblasti: Redkie i nakhodyashchiesya pod ugrozoi ischeznoventiya vidy zhivotnykh, rastenii i gribov: ofitsial'noe izdanie* = [Red Book of the Amur Region: Rare and endangered species of animals, plants and fungi: official edition]. Blagoveshchensk: Izd-vo Dal'nevost. gos. agrar. un-ta; 2020. 499 s. (In Russ.).
6. Veklich T.N., Kochunova N.A. *Pervaya dostovernaya nakhodka Cypripedium shanxiense* (Orchidaceae) v Amurskoi oblasti = [First reliable record of *Cypripedium shanxiense* (Orchidaceae) in Amur region]. *Botanical Journal*. 2022;107(9):931–935. (In Russ.).
7. Vinogradova Yu.K., Antonova L.A., Darman G.F., Devyatova E.A., Kotenko O.V., Kudryavtseva E.P., Lesik (Aistova) E.V., Marchuk E.A., Nikolin E.G., Prokopenko S.V., Rubtsova T.A., Khoreva M.G., Chernyagina O.A., Chubar' E.A., Sheiko V.V., Krestov P.V. *Chernaya kniga flory Dal'nego Vostoka: invazionnye vidy rastenii v ehkosistemakh Dal'nevostochnogo Federal'nogo Okruga* = [Black Book of the Flora of the Far East: Invasive plant species in ecosystems of the Far Eastern Federal District]. Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK; 2021. 510 s. (In Russ.).
8. Veklich T.N., Kochunova N.A., Semenko V.V. *Sovremennoe sostoyanie Gerbariya Amurskogo filiala Botanicheskogo sada-institutu DVO RAN (ABGI)* = [Current state of the Herbarium of the Amur branch of the Botanical Garden-Institute FEB RAS]. *Byulleten' Botanicheskogo Sada-Institutu DVO RAN*. 2020;(24):14–18. (In Russ.).

Обзорная статья
УДК 548.735:541.49:546.791.6-381'131
DOI: 10.31857/S0869769825020127
EDN: GEEQQW

Структурная химия тетрахлоридных комплексных соединений уранила (обзор)*

Р.Л. Давидович

Рувен Лейзерович Давидович
доктор химических наук, главный научный сотрудник, профессор
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия
davidovich@ich.dvo.ru, ruven.davidovich@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-8473-3580>

Аннотация. Систематизированы и обсуждены кристаллические структуры тетрахлоридных комплексных соединений уранила с катионами щелочных металлов, аммония, протонированными катионами органических оснований, производными катиона аммония и ряда протонированных органических соединений, изученных монокристалльным методом рентгеноструктурного анализа. Определены кристаллохимические особенности строения данного класса соединений. В исследованных кристаллических структурах тетрахлоридных комплексных соединений UO_2^{2+} координационный полиэдр шестивалентного атома урана имеет тетрагонально-бипирамидальное (искаженное сплюснутое октаэдрическое) строение с атомами кислорода уранильной группы, расположенными в апикальных вершинах тетрагонального-бипирамидального полиэдра. Группы UO_2^{2+} в полиэдрах направлены перпендикулярно экваториальной плоскости, в вершинах которой расположены четыре атома Cl координированных лигандов. При наличии в структурах тетрахлоридных комплексных соединений уранила наряду с комплексными анионами $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ и протонированными катионами свободных ионов Cl^- и/или свободных, не связанных с атомом U, нейтральных или координированных молекул, содержащих акцепторные атомы, катионы не взаимодействуют с донорными атомами Cl аниона, а образуют водородные связи со свободными ионами хлора и акцепторными атомами свободных молекул. Из-за высокой симметрии (практически D_{4h}) комплексного аниона в структурах тетрахлоридных комплексах уранила соединения широко были использованы для проведения многочисленных физических исследований, в частности спектроскопических, люминесцентных, компьютерных, теории функциональной плотности и др.

Ключевые слова: тетрахлорид, комплекс, уранил, кристаллическая структура, катион, рентгеноструктурный анализ

Для цитирования: Давидович Р.Л. Структурная химия тетрахлоридных комплексных соединений уранила (обзор) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 156–174. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020127>

*В авторской редакции.
© Давидович Р.Л., 2025

Structural chemistry of tetrachloride complexes of uranyl (review)

R.L. Davidovich

Ruven L. Davidovich

Doctor of Sciences in Chemistry, Professor, Chief Researcher

Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia

davidovich@ich.dvo.ru, ruven.davidovich@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-8473-3580>

Abstract. The crystal structures of tetrachloride complexes of uranyl with cations of alkali metals, and ammonium, protonated cations of organic bases, ammonium derivatives and a number of protonated organic compounds studied by single-crystal X-ray diffraction analysis are systematized and discussed. The crystal chemical features of the structure of this class of compounds have been determined. In the investigated crystal structures of UO_2^{2+} tetrachloride complexes, the coordination polyhedron of the hexavalent uranium atom has a tetragonal-bipyramidal (distorted octahedral) structure with oxygen atoms of the uranyl group located at the apical vertices of the tetragonal-bipyramidal polyhedron. The UO_2^{2+} groups in the coordination polyhedra are directed perpendicular to the equatorial plane, at the vertices of which four Cl atoms of coordinated ligands are located. In the presence in the structures of uranyl tetrachloride complexes, along with complex anions $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ and protonated cations, free Cl^- ions and free, not associated with the U atom, neutral or coordinated molecules, containing acceptor atoms, the cations do not interact with the donor atoms of the Cl^- anion, and form hydrogen bonds with the free chlorine ions and acceptor atoms of the free molecules. Due to the high symmetry (almost D_{4h}) of the complex anion in the structures of tetrachloride complexes of uranyl, the compounds have been widely used for numerous physical studies, in particular spectroscopic, luminescence, functional density theory and others.

Keywords: tetrachloride, complex, uranyl, crystal structure, cation, X-ray diffraction analysis

For citation: Davidovich R.L. Structural chemistry of tetrachloride complexes of uranyl (review). *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2): 156–174. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020127>

Введение

Группа UO_2^{2+} образует с ионами Cl^- два типа комплексных соединений: тетрахлоридные комплексные соединения $\text{M}_2[\text{UO}_2\text{Cl}_4]$, содержащие тетрагонально-бипирамидальные (искаженные октаэдрические) изолированные комплексные анионы $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ и разнолигандные хлоридосодержащие комплексные соединения уранила, в состав которых помимо хлоридолигандов входят как нейтральные, так и ацидолиганды, содержащие донорные атомы O, N, S и C.

Кристаллические структуры тетрахлоридных комплексных соединений уранила в зависимости от природы внешнесферного катиона можно условно разделить на две группы: структуры с катионами щелочных металлов, аммония, с протонированными катионами органических оснований, производными катиона аммония и структуры с протонированными органическими соединениями в качестве катионов.

1. Тетрахлоридные комплексные соединения уранила

1.1. Тетрахлоридные комплексные соединения уранила с катионами щелочных металлов и аммония

Из структурно исследованных тетрахлоридных комплексных соединений уранила с неорганическими катионами наиболее подробно как экспериментально, так и теоретически изучена кристаллическая структура $Cs_2[UO_2Cl_4]$.

1.1.1. $Cs_2UO_2Cl_4$

Кристаллическая структура $Cs_2UO_2Cl_4$ [1] принадлежит к числу первых структурно исследованных соединений тетрахлорида уранила с неорганическим катионом щелочных металлов. Соединение синтезировано добавлением стехиометрического количества $CsCl$ в раствор ацетата уранила в разбавленной HCl .

Кристаллы $Cs_2UO_2Cl_4$ моноклинные: $a = 11,92(2)$, $b = 7,71(2)$, $c = 5,83(2)$ Å, $\beta = 99,75(5)^\circ$, $Z = 2$, пр. гр. $C2/m$. Шестикоординированные атомы $U(VI)$ в структуре образуют изолированные квадратно-пирамидальные (сплюснутые октаэдрические) комплексные анионы $[UO_2Cl_4]^{2-}$. Группа $O=U=O$ в комплексе линейна и симметрична с длинами связей $1,81 \times 2$ Å и расположена перпендикулярна экваториальной плоскости с четырьмя атомами Cl . Длины связей $U-Cl$ равны $2,62 \times 4$ Å.

Восемь атомов Cl и три атома O , расположенные на расстоянии между $3,49$ и $3,94$ Å от атома цезия, образуют одиннадцатикоординационный полиэдр. Атомы хлора расположены примерно непосредственно в углах куба с атомом цезия в центре причем этот куб несколько искажен тремя атомами кислорода.

1.1.2. $Cs_2UO_2Cl_4$ (повторное структурное исследование)

Кристаллическая структура $Cs_2UO_2Cl_4$ [1] повторно исследована в [2] с целью исправить содержащиеся в ней неясности и ошибки. Хотя повторно исследованная структура существенна аналогична структуре, сообщенной в [1], выявлены небольшие различия в параметрах элементарной ячейки, атомных параметрах и, следовательно в межатомных расстояниях.

Найденные в структуре $Cs_2UO_2Cl_4$ [2] параметры элементарной ячейки равны: $a = 11,929(2)$, $b = 7,704(2)$, $c = 5,816(2)$ Å, $\beta = 100,02(4)^\circ$. Структура определена в пр. гр. $C2m$.

1.1.3. $Cs_2UO_2Cl_4$ (нейтроннографическое исследование)

В [3] кристаллическая структура нелинейного оптического кристалла $Cs_2UO_2Cl_4$ уточнена нейтроннографическим методом. Найденные нейтроннографические параметры элементарной ячейки равны: $a = 12,005(8)$, $b = 7,697(3)$, $c = 5,850(1)$ Å, $\beta = 100,00(4)^\circ$ и структурные характеристики группы UO_2^{2+} ($U=O$ $1,780(4) \times 2$ Å, $\angle O=U=O$ $178,44(16)^\circ$), расстояния $U-Cl$ $2,664(2) \times 2$, $2,688(2) \times 2$ Å незначительно отличаются от соответствующих рентгенографических данных.

1.1.4. $Cs_2UO_2Cl_4$

Кристаллическая структура $Cs_2UO_2Cl_4$ исследована также в работе [4]. Структура $Cs_2UO_2Cl_4$ образует моноклинную элементарную ячейку, пр. гр. $C2/m$, содержащую две формульные единицы. Длины связей $U=O_{yl}$ равны $1,776(6) \times 2$ Å, а расстояния $U-Cl$ составляют $2,670(1) \times 4$ Å. В элементарной ячейке атомы Cs расположены транс относительно друг друга с одним атомом немного выше и другим атомом немного ниже хлоридной экваториальной плоскости. Эти атомы образуют бифуркатное взаимодействие $Cs \cdots Cl$ с длиной связи $3,526$ Å.

Из-за высокой симметрии (D_{4h} , $4/mmm$) тетрахлоридного аниона уранила $[UO_2Cl_4]^{2-}$ соединение $Cs_2UO_2Cl_4$ было предметом многочисленных колебательных спектроскопиче-

ских [5, 6], люминесцентных [7] и других физических методов исследования, что побудило исследователей синтезировать и структурно исследовать тетрахлоридные комплексные соединения уранила с другими катионами щелочных металлов и аммония.

1.1.5. $\text{Rb}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Соединение $\text{Rb}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ синтезировано взаимодействием RbNO_3 и $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в концентрированной HNO_3 . Кристаллы $\text{Rb}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ триклинны: $a = 6,795(5)$, $b = 6,929(5)$, $c = 7,457(4)$ Å, $\alpha = 91,96(5)$, $\beta = 102,13(5)$, $\gamma = 102,13(5)^\circ$, $Z = 1$, пр. гр. $P-1$ [8].

Кристаллическая структура $\text{Rb}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ образована катионами Rb^+ , тетрагонально-бипирамидальными комплексными анионами $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ и кристаллизационными молекулами H_2O . В комплексном анионе $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ структуры $\text{Rb}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ длины связей $\text{U}=\text{O}$ равны $1,751(9)$ Å, а расстояния $\text{U}-\text{Cl}$ составляют $2,650(4) \times 2$ и $2,644(3) \times 2$ Å, что несколько меньше соответствующих длин связей $\text{U}=\text{O}$ $1,774(4) \times 2$ Å, $\text{U}-\text{Cl}$ $2,671(1) \times 4$ Å в структуре $\text{Cs}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Единственное существенное отличие аниона $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ от симметрии D_{4h} в структуре $\text{Rb}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ связано с наличием угла $\text{Cl}(1)-\text{U}-\text{Cl}(2)$ в $90,8(1)^\circ$. D_{2h} искажение аниона в цезиевой соли с углом $\text{Cl}-\text{U}-\text{Cl}$ $92,91(5)^\circ$ больше.

Атомы Rb связаны с пятью атомами Cl ($\text{Rb}-\text{Cl}$ $3,361(3)-3,601(3)$ Å) и четырьмя атомами O ($\text{Rb}-\text{O}$ $2,901(9)-3,095(9)$ Å), образуя девятикоординационные полиэдры. Катионы Rb^+ и молекулы H_2O образуют группы $\text{Rb}_2(\mu-\text{OH}_2)_2$ в кристалле с формированием каждой молекулой H_2O водородных связей с атомами Cl ($\text{O} \cdots \text{Cl}$ с длинами $3,335(10)$ и $3,392(10)$ Å), указывающими на образование в структуре слабых водородных связей.

1.1.6. $\text{Rb}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Соединение $\text{Rb}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ повторно структурно исследована в [9].

1.1.7. $\text{K}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

В работе [9] впервые синтезировано тетрахлоридное комплексное соединение $\text{K}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и исследована его кристаллическая структура. Соединение $\text{K}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ получено взаимодействием $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в конц. HCl с KCl . Кристаллы $\text{K}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ изоструктурны $\text{Rb}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и кристаллизуются в элементарной триклинной ячейке, пр. гр. $P-1$ с параметрами: $a = 6,7144(3)$, $b = 6,7764(3)$, $c = 7,2755(4)$ Å, $\alpha = 92,402(2)$, $\beta = 101,994(2)$, $\gamma = 118,821(2)^\circ$, $Z = 1$.

Соединения $\text{K}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ содержит в элементарной ячейке одну формульную единицу. Уранильная группа в структуре $\text{K}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ имеет C_i сайт симметрию с длинами связей $1,772(5) \times 2$ Å, в то время как хлоридные лиганды присутствуют в экваториальной плоскости в виде двух четких расстояний $2,6601(18) \times 2$, $2,6628(19) \times 2$ Å.

Балансирующие заряд аниона катионы калия расположены транс относительно друг друга вдоль той же самой плоскости, что и экваториальные хлоридные лиганды с раздвоенным бифуркатным взаимодействием $3,236$ и $3,279$ Å. Элементарная ячейка $\text{K}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ содержит также две молекулы кристаллизационной H_2O .

1.1.8. $(\text{NH}_4)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Синтез и кристаллическая структура впервые полученного тетрахлоридного комплексного соединения уранила $(\text{NH}_4)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ описаны в работе [10]. Соединение получено медленным испарением из 2М раствора HCl , содержавшего дигидрат ацетат уранила и 1,3,5-триазин. Оно изоструктурно кристаллам $\text{Rb}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и $\text{K}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и образует триклинную элементарную ячейку пр. гр. $P-1$ с параметрами: $a = 6,6574(4)$, $b = 6,6954(4)$, $c = 7,4018(4)$ Å, $\alpha = 99,827(2)$, $\beta = 93,879(2)$, $\gamma = 117,354(1)^\circ$, $Z = 1$.

Комплексный анион $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ в структуре $(\text{NH}_4)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, имеющий квадратно-бипирамидальную координационную геометрию с D_{4h} точечной группой симметрии, образован

атомом U(VI), координированным двумя терминальными аксиальными атомами кислорода и четырьмя экваториальными атомами Cl (рис. 1). Атом U в структуре расположен в центре инверсионной симметрии, в результате чего образуется линейный катион UO_2^{2+} с длинами связей $\text{U}=\text{O}(1)$ $1,7745(14) \times 2 \text{ \AA}$ и углом связи $\text{O}(1)=\text{U}=\text{O}(1)$ $180,0^\circ$. Атом U также координирован двумя кристаллографическими уникальными атомами хлора с расстояниями $\text{U1}-\text{Cl}(1)$ и $\text{U1}-\text{Cl}(2)$ $2,6752(5)$ и $2,6623(4) \text{ \AA}$ соответственно. Валентные углы $\text{Cl}(1)-\text{U}-\text{Cl}(2)$ и $\text{O}(1)-\text{U}-\text{Cl}(1)$ в анионе немного отклоняются от 90° .

В независимой части структуры $(\text{NH}_4)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ содержится кристаллографически уникальная молекула воды (O1w) и один кристаллографически уникальный катион аммония, обеспечивающий баланс заряда аниона. Катионы аммония и молекулы H_2O образуют с тетрахлоридным анионом разветвленную сеть водородных связей (рис. 2). Каждая молекула H_2O донирует две водородные связи двум отдельным тетрахлоридным комплексам уранила.

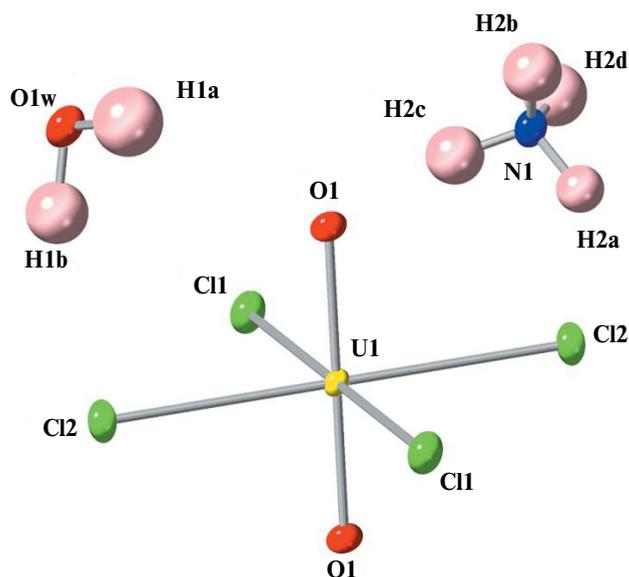


Рис. 1. Строение тетрахлоридного аниона уранила совместно со строением катиона аммония и молекулы кристаллизационной H_2O [10]

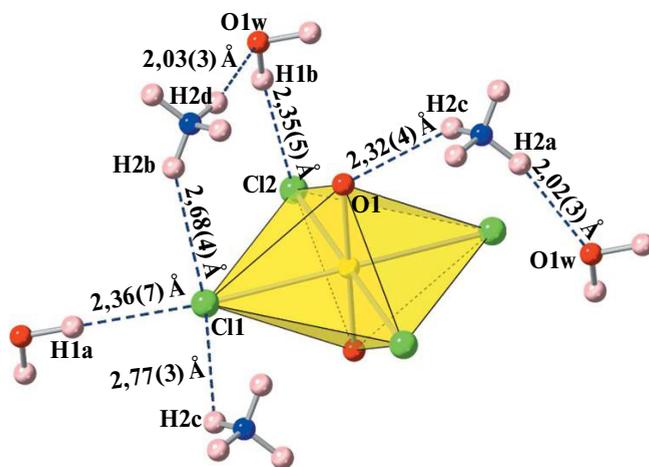


Рис. 2. Уникальная водородная связь с длинами водородных связей в структуре $(\text{NH}_4)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [10]

с другой стороны, каждый катион аммония образует водородные связи в трехмерной сети с тремя отдельными тетрахлоридными анионами уранила и двумя отдельными молекулами воды, стабилизирующими кристаллическую структуру. Водородные связи, образующие молекулы H_2O и катионы NH_4^+ с атомами Cl, слабые (3,283(2)–3,441(2) Å).

1.2. Тетрахлоридные комплексные соединения уранила с протонированными катионами, производными катиона аммония

1.2.1. $[(CH_3)_4N]_2UO_2Cl_4$

Исследование кристаллических структур комплексных соединений уранила показало, что группа UO_2^{2+} практически линейная, характеризуется исключительной прочностью и что длины связей $U=O$ в этой группе имеют практически близкие значения независимо от природы лиганда в координационном соединении. В работе [11] исследована природа этой исключительно стабильной группы методом молекулярных орбиталей для получения устойчивой картины электронного строения иона уранила. Для определения влияния эффекта решетки и экваториальных лигандов на электронный спектр иона уранила абсорбционные спектры регистрировали в поляризованном свете на монокристаллах при температуре жидкого гелия. Одновременно исследованы и кристаллические структуры использованных соединений $[(CH_3)_4N]_2UO_2Cl_4$ и $[(CH_3)_4N]_2UO_2Br_4$. (Структура $[(CH_3)_4N]_2UO_2Br_4$ будет рассмотрена в следующей главе).

Из данных вращения кристалла, Вайсенберга фотографий и дифрактометрии установлено, что кристаллы $[(CH_3)_4N]_2UO_2Cl_4$ принадлежат к тетрагональной сингонии, пр. гр. $P4_2/mnm$ с параметрами: $a = 9,175(2)$ и $c = 11,745(6)$ Å, $Z = 2$.

Кристаллическая структура $[(CH_3)_4N]_2UO_2Cl_4$ образована тетраэдрическими катионами $[(CH_3)_4N]^+$ с центром U, лежащим на оси -4 , и плоскими анионами $[UO_2Cl_4]^{2-}$ симметрии D_{4h} . Все атомы структуры, за исключением атомов метильных групп, расположены в специальных позициях. Атомы водорода в структуре $[(CH_3)_4N]_2UO_2Cl_4$ не были локализованы.

1.2.2. $[Me_4N]_2UO_2Cl_4$

Кристаллическая структура $[Me_4N]_2UO_2Cl_4$ повторно исследована в [4]. Найденные в структуре $[Me_4N]_2UO_2Cl_4$ параметры элементарной ячейки $a = 9,1341(10)$ и $c = 113712(12)$ Å, $Z = 2$ незначительно отличаются от соответствующих данных, приведенных в [11]. В сравниваемых структурах несколько различаются лишь длины связей $U=O$ в линейных уранильных группах $O=U=O$, которые в структуре [4] равны $1,766(4) \times 2$ Å, а в структуре [11] они равны $1,724(7) \times 2$ Å. В обеих структурах расстояния $U-Cl$ практически одинаковые ($2,648(1) \times 2$, $2,677(1) \times 2$ Å в структуре, приведенной в [4], и $2,646(4) \times 2$, $2,660(3) \times 2$ Å в структуре, исследованной в [11]).

В соединении $[Me_4N]_2UO_2Cl_4$ метильные группы катиона Me_4N^+ слабо взаимодействуют с хлоридными и оксидными лигандами тетрахлоридного аниона. Кратчайшее расстояние $C-H \cdots Cl$ для соединения $[Me_4N]_2UO_2Cl_4$ составляет $2,94(4)$ Å, а кратчайшее $C-H \cdots O_y$ расстояние равно $2,65(4)$ Å.

1.2.3. $\{(C_2H_5)_3NH\}_2UO_2Cl_4$

Кристаллическая структура $\{(C_2H_5)_3NH\}_2UO_2Cl_4$ первоначально была определена из данных Вайсенберга фотографий. с целью получения более точных данных структура $\{(C_2H_5)_3NH\}_2UO_2Cl_4$ повторно исследована на четырехкружном автоматическом дифрактометре.

Соединение $\{(C_2H_5)_3NH\}_2UO_2Cl_4$ кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами: $a = 13,465(5)$, $c = 24,18(1)$ Å, пр. гр. $I4_1/a$, $Z = 8$ [12]. Кристаллическая структура $\{(C_2H_5)_3NH\}_2UO_2Cl_4$ образована катионами $(C_2H_5)_3NH^+$ и тетрагонально-бипирамидальными комплексными анионами $[UO_2Cl_4]^{2-}$ симметрии D_{4h} . В комплексном анионе уранильная группа практически линейная, угол $O=U=O$ равен $179(1)^\circ$ с длинами связей $U=O$ $1,75(1) \times 2$ Å.

Расстояния U–Cl в структуре $\{(C_2H_5)_3NH\}_2UO_2Cl_4$ являются характерными для таковых связей в тетрахлоридных комплексных соединениях уранила и составляют $2,663(5) \times 2, 2,672(5) \times 2 \text{ \AA}$. Такие же длины связи U–Cl присутствуют в кристаллической структуре $(NH_4)_2UO_2Cl_4 \cdot 2H_2O$ [10].

1.2.4. $\{(C_2H_5)_4N\}_2UO_2Cl_4$

Соединение $\{(C_2H_5)_4N\}_2UO_2Cl_4$ синтезировано и структурно исследовано в связи с опубликованием структуры $\{(C_2H_5)_3NH\}_2UO_2Cl_4$ [12]. Соединение $\{(C_2H_5)_4N\}_2UO_2Cl_4$ получено смешением больше чем на 30% по сравнению со стехиометрическими пропорциями UO_2Cl_2 с $(C_2H_5)_4NCl \cdot 5H_2O$ в 10М соляной кислоте. Кристаллы $\{(C_2H_5)_4N\}_2UO_2Cl_4$ относятся в триклинной системе, пр. гр. *P-1* с параметрами: $a = 9,997(5)$, $b = 10,064(5)$, $c = 12,914(5) \text{ \AA}$, $\alpha = 90,00(5)$, $\beta = 90,69(5)$, $\gamma = 90,00(5)^\circ$, $Z = 2$ [13].

В кристаллической структуре $[(C_2H_5)_4N]_2UO_2Cl_4$ содержатся два кристаллографически независимых комплекса $[(C_2H_5)_4N(1)]_2U(1)O_2Cl_4$ и $[(C_2H_5)_4N(2)]_2U(2)O_2Cl_4$, каждый из которых образован из катионов $[(C_2H_5)_4N]^+$ и комплексных анионов $[UO_2Cl_4]^{2-}$, относящихся соответственно к симметрии T_4 и D_{4h} .

Комплексный анион $[UO_2Cl_4]^{2-}$ образован атомом урана, окруженным октаэдрически четырьмя атомами хлора и двумя атомами кислорода. Группа UO_2^{2+} направлена перпендикулярно плоскости атомов хлора. В комплексных анионах $[U(1)O_2Cl_4]^{2-}$ и $[U(2)O_2Cl_4]^{2-}$ длины связей $U(1)=O$ и $U(2)=O$ равны соответственно $1,76(2) \times 2$ и $1,77(3) \times 2 \text{ \AA}$ при угле связи $O=U=O$ $180(1)^\circ$. В обоих анионах расстояния U–Cl составляют $2,65(1) \times 2$ – $2,68(1) \times 2 \text{ \AA}$ и $2,67(1) \times 2$ – $2,68(1) \times 2 \text{ \AA}$.

Каждый анион $[UO_2Cl_4]^{2-}$ окружен восемью катионами $[(C_2H_5)_4N]^+$, расположенными в вершинах прямоугольного параллелепипеда. При этом каждый катион имеет тетраэдрическое окружение. Расстояния между центрами аниона и катиона варьируют от 5,84 до 6,16 \AA.

1.2.5. $[(CH_3(CH_2)_2)_4N]_2UO_2Cl_4$

Кристаллическая структура $[(CH_3(CH_2)_2)_4N]_2UO_2Cl_4$ исследована с целью установления корреляций структурных данных с электронными спектрами, полученными при низкой температуре в поляризованном свете. Параметры триклинной элементарной ячейки соединения $[(CH_3(CH_2)_2)_4N]_2UO_2Cl_4$ были получены методом вращения, Вайсенберга фотографий и из монокристалльных дифрактометрических данных: $a = 0,890(5)$, $b = 7,257(7)$, $c = 11,076(5) \text{ \AA}$, $\alpha = 95,4(1)$, $\beta = 106,1(1)$, $\gamma = 114,9(1)^\circ$, $Z = 2$ [14].

Структура $[(CH_3(CH_2)_2)_4N]_2UO_2Cl_4$ образована тетраэдрическими катионами $[(CH_3(CH_2)_2)_4N]^+$ и бипирамидальными комплексными анионами $[UO_2Cl_4]^{2-}$, объединенными ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями. Геометрия атома U в комплексном анионе характерная для тетрахлоридных комплексных соединений уранила, рассмотренных выше. Длины связей U=O в группе UO_2^{2+} , несколько отличающейся от линейности ($\angle O=U=O$ $177,3(8)^\circ$), значительно различаются $1,65(1)$ и $1,58(2) \text{ \AA}$. Некоторое различие имеет место и в расстояниях U–Cl $2,623(9)$ – $2,694(6) \text{ \AA}$. Вероятно, указанные различия обусловлены наличием в структуре термического движения, что следует из полученных значений температурных факторов для ряда атомов.

1.2.6. $[(CH_3(CH_2)_3)_4N]_2UO_2Cl_4$

Кристаллическая структура $[(CH_3(CH_2)_3)_4N]_2UO_2Cl_4$ определена авторами [15] в связи с исследованиями интерпретации электронных спектров иона уранила в соединениях общей формулы $(R_4N)UO_2X_4$ (R-алкильная группа, X – Cl, Br). Параметры моноклинной элементарной ячейки кристалла были получены методом вращения, из фотографий Вайсенберга и из монокристалльных дифрактометрических данных: $a = 15,533(6)$, $b = 15,533(6)$, $c = 20,438(8) \text{ \AA}$, $\beta = 118,20(20)^\circ$, $Z = 4$, пр. гр. $P2_1/c$.

Структура $[(CH_3(CH_2)_3)_4N]_2UO_2Cl_4$ образована из сплюснутых комплексных анионов $[UO_2Cl_4]^{2-}$ и тетраэдрических катионов $[(CH_3(CH_2)_3)_4N]^+$, связанных ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями $Cl(3) \cdots C(21)$ $3,58 \text{ \AA}$, $Cl(3) \cdots C(25)$ $3,57 \text{ \AA}$. Каждый анион $[UO_2Cl_4]^{2-}$ в структуре окружен пятью катионами, атомы N которых отстоят от атома

U на расстоянии 5,5–6,1 Å. В комплексном анионе $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ уранильная группа почти линейна ($\angle \text{O}=\text{U}=\text{O}$ 178,1(5)°) с длинами связей U=O 1,68(1), 1,69(1) Å. Расстояния U–Cl характеризуются значениями, лежащими в интервале 2,646(6)–2,671(5) Å. Концевые группы CH_3 бутильных цепей обладают выраженным термическим движением, на что указывают высокие термические коэффициенты их атомов углерода.

1.3. Комплексные хлориды уранила с протонированными органическими катионами

1.3.1. Тетрахлоридные комплексные соединения уранила с протонированными органическими катионами

В структурах тетрахлоридных комплексных соединений уранила с органическими катионами комплексные анионы $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ имеют такое же тетрагонально-бипирамидальное (октаэдрическое) строение, как и анионы в структурах тетрахлоридных комплексов уранила с неорганическими катионами.

1.3.2. $(\text{C}_{12}\text{H}_9\text{N}_2)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$

Кристаллическая структура ди (1,10 *H*-фенантролина) тетрахлорида уранила $(\text{C}_{12}\text{H}_9\text{N}_2)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$ исследована для определения влияния кристаллического поля группы UO_2^{2+} в различных лигандных окружениях по отношению к его электронным переходам. Соединение $(\text{C}_{12}\text{H}_9\text{N}_2)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$ синтезировано смешением раствора фенантролина с гидроксидным раствором иона уранила.

Параметры триклинной элементарной ячейки $(\text{C}_{12}\text{H}_9\text{N}_2)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$ получены из монокристаллических дифрактометрических данных: $a = 8,414(4)$, $b = 10,960(5)$, $c = 7,593(4)$ Å, $\alpha = 94,69(5)$, $\beta = 108,76(6)$, $\gamma = 100,23(6)^\circ$, пр. гр. *P*-1, $Z = 1$ [16].

Кристаллическая структура $(\text{C}_{12}\text{H}_9\text{N}_2)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$ образована катионами фенантролина $(\text{C}_{12}\text{H}_9\text{N}_2)^+$ и сплюснутыми бипирамидальными комплексными анионами $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$, объединенными водородными связями $\text{N}-\text{H}\cdots\text{Cl}$ 3,17(1) Å. Длины связей U=O в линейной уранильной группе ($\angle \text{O}=\text{U}=\text{O}$ 180°) аниона равны 1,752(8) × 2 Å, а расстояния U–Cl равные 2,653(5) × 2 и 2,673(4) × 2 Å характерны для таковых связей в структурах тетрахлоридных комплексных соединений уранила. Катионы в структуре $(\text{C}_{12}\text{H}_9\text{N}_2)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$ почти плоские. Наибольшее отклонение от плоскости согласно методу наименьших квадратов равно 0,05(2) Å.

1.3.3. $(\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_2)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$

Имидазол в кислой среде взаимодействует с многими соединениями металлов, образуя комплексные соединения с протонированными катионами. В работе [17] исследована кристаллическая структура тетрахлоридного комплексного соединения уранила с протонированным катионом имидазола $(\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_2)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$. Соединение получено по реакции имидазола с $\text{UO}_2\text{Cl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ в хлористоводородной кислоте при pH раствора 2,5–3,0 с последующей кристаллизацией из раствора. Кристаллы $(\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_2)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$ моноклинные, пр. гр. *P*2₁/*n* с параметрами элементарной ячейки: $a = 9,385(5)$, $b = 10,891(5)$, $c = 6,966(4)$ Å, $\beta = 104,56(5)^\circ$, $Z = 2$.

Кристаллическая структура $(\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_2)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$ состоит из дискретных пятичленных планарных катионов имидазолия $(\text{C}_3\text{H}_5\text{N}_2)^+$ и тетрагонально искаженных октаэдрических комплексных анионов $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ с четырьмя атомами хлора в экваториальной позиции и двумя уранильными атомами кислорода в вершинах. В линейной уранильной группе комплексного аниона ($\angle \text{O}=\text{U}=\text{O}$ 180,0°) длины связей U=O равны 1,779 × 2 Å. Расстояния U–Cl 2,665 × 2, 2,697 × 2 Å в анионе соответствуют значениям для этого иона, изменяющимся от 2,62 до 2,70 Å. Катион имидазолий представляет собой плоское пятичленное кольцо с длинами связей N–C, изменяющимися от 1,296(8) до 1,350(7) Å и C–C равным 1,348(8) Å.

1.3.4. $(C_4H_7N_2)_2UO_2Cl_4$

Кристаллическая структура тетрахлоридного комплексного соединения уранила с катионом 2-метилимидазолия $(C_4H_7N_2)_2UO_2Cl_4$ исследована в связи с отличием его спектра люминесценции от спектра люминесценции незамещенного имидазольного тетрахлоридного комплексного соединения уранила [17], обсужденного выше. Соединение $(C_4H_7N_2)_2UO_2Cl_4$ синтезировано взаимодействием 2-метилазолия и тригидрат уранилхлорида в водном растворе, подкисленном соляной кислотой до pH 2 с упариванием досуха. Кристаллы были перекристаллизованы из H_2O .

Соединение $(C_4H_7N_2)_2UO_2Cl_4$ кристаллизуется в моноклинной сингонии, пр. гр. $P2_1/c$ с параметрами элементарной ячейки: $a = 7,177(2)$, $b = 18,526(4)$, $c = 12,600(3)$ Å, $\beta = 94,08(2)^\circ$, $Z = 4$ [18]. Кристаллическая структура $(C_4H_7N_2)_2UO_2Cl_4$ образована из столбиков анионов $UO_2Cl_4^{2-}$ и столбиков катионов $(C_4H_7N_2)^+$, расположенных параллельно оси a кристалла. Комплексный анион $[UO_2Cl_4]^{2-}$ представляет собой сплюснутый октаэдр с атомами кислорода уранильной группы в аксиальных вершинах и атомами хлора в экваториальных позициях.

В практически линейной группе UO_2^{2+} ($\angle O=U=O$ $179.1(3)^\circ$) аниона длины связей $U=O$ равны $1,773(6)$, $1,756(7)$ Å. Расстояния $U-Cl$ в экваториальной плоскости изменяются в интервале $2,671(3)-2,678(3)$ Å с транс валентными углами $Cl(1)-U-Cl(3)$ и $Cl(2)-U-Cl(4)$, равными $178,3(1)$ и $176,9(1)^\circ$.

Катион 2-метилимидазолий имеет плоское строение и, за исключением метильной группы, характеризуется такими же размерами, что и незамещенный ион имидазолия в структуре $(C_3H_5N_2)_2UO_2Cl_4$, рассмотренной выше. Присутствие в структуре $(C_4H_7N_2)_2UO_2Cl_4$ кратчайших межзатомных расстояний $N(1)\cdots Cl(2)$ $3,16(1)$, $N(2)\cdots O(1)$ $3,21(1)$, $N(3)\cdots O(1)$ $3,12(1)$ и $N(4)\cdots O(2)$ $3,34(1)$ Å позволяет предположить наличия слабых водородных связей.

1.3.5. $(C_{10}H_{10}N_2)UO_2Cl_4$ (1), $(C_{12}H_{14}N_2)UO_2Cl_4$ (2), $(C_{12}H_{12}N_2)UO_2Cl_4$ (3), $(C_8H_8NO_2)_2UO_2Cl_4$ (4), $(C_{13}H_{16}N_2)UO_2Cl_4$ (5)

В работе [19] описан синтез и структурное исследование семи тетрахлоридных комплексных соединений уранила с катионами 4,4'-дипиридиламина и его производными с целью определения влияния строения катиона на характер образуемых водородных связей. Лишь в пяти из них (1–5) содержатся изолированные анионы $[UO_2Cl_4]^{2-}$. Указанные соединения синтезированы реакцией при комнатной температуре оксиацетата урана(VI) с различными солями 4,4'-дипиридиламина в сильноокислых растворах HCl. Соединения (1–4) кристаллизуются в триклинной сингонии, пр. гр. $P-1$ с атомами урана в комплексном анионе $[UO_2Cl_4]^{2-}$ и протонированными катионами, расположенными в центрах инверсии. Соединение 5 $(C_{13}H_{16}N_2)UO_2Cl_4$ кристаллизуется в моноклинной пр. гр. $C2/c$.

Кристаллографически уникальные атомы U присутствуют в структурах (1)–(5) в виде центральной группы UO_2^{2+} с четырьмя атомами Cl в экваториальной плоскости, образуя квадратные бипирамидальные анионы $[UO_2Cl_4]^{2-}$. В линейных уранильных группах ($\angle O=U=O$ $180,0^\circ$) структур (1)–(5) длины связей $U=O$ равны $1,734(4) \times 2$ (1), $1,7624(2) \times 2$ (2, 3), $1,760(2) \times 2$ (4) и $1,7606(18) \times 2$ (5). Расстояния $U-Cl$ практически одинаковые во всех пяти соединениях $2,6554(7) \times 2-2,6934(8) \times 2$ Å. Средняя длина связи $U-Cl$ составляет $2,663$ Å.

Протонированные кольца катионов пиридиния в (1)–(4) участвуют в образовании бифуркатных водородных связей $N-H\cdots Cl-U$, что приводит к образованию одномерной сети чередующихся альтернативных катионов и анионов. Ленты слегка скручены, с углами скручивания $49,2$, $35,4$ и $35,2$, $7,8^\circ$ между плоскостью катионного кольца и экваториальной плоскостью анионов. Эти ленты дополнительно упаковываются в параллельной моде. Бифуркатные водородные связи в 1–4 несимметричны, так как в каждом соединении есть короткое и длинное расстояния $D\cdots A$. Угол $N-H\cdots Cl-U$ для более коротких взаимодействий $Cl\cdots N$ колеблется в пределах $133-148^\circ$.

В 5 есть только одна водородная связь между атомом N1 катиона 4,4'-триметилена дипиридина и атомом Cl2 ($D\cdots A$ $3,209(3)$ Å, $D-H\cdots A$ $165,4^\circ$). Эта связь не похожа на бифуркатные 1–D водородные связи, наблюдаемые в 1–4, поскольку нет двух отдельных коротких и боль-

ших расстояний N–H···Cl. По-видимому, в 5 нет никаких существенных взаимодействий между атомами N1 и C11. В [9] соединения (1)–(3) исследованы компьютерным методом теории функциональной плотности (density functional theory (DFT)).

1.3.6. (N₂C₁₀H₉)[UO₂Cl₄]

В [20] описан синтез, кристаллическая структура и спектроскопическая характеристика тетрахлоридного комплексного соединения уранила с катионом 2,2'-бипиридином (2,2'-bipy) (N₂C₁₀H₉)[UO₂Cl₄]. Соединение (N₂C₁₀H₉)[UO₂Cl₄] синтезировано из дигидрата ацетата уранила, растворенного в метаноле, к которому добавляли концентрированную кислоту HCl и лиганд 2,2'-bipy. Полученный раствор нагревали при 110°C до небольшого объема и оставляли для медленного испарения.

Кристаллы (N₂C₁₀H₉)[UO₂Cl₄] моноклинные, пр. гр. *P*2₁/*n*: *a* = 8,9096(3), *b* = 12,0572(4), *c* = 14,5287(5) Å, β = 94,5930(10)°, *Z* = 4. Кристаллическая структура (N₂C₁₀H₉)[UO₂Cl₄] образована из двухзарядных катионов 2,2'-бипиридиния и комплексных анионов [UO₂Cl₄]²⁻ (рис. 3). Независимая часть элементарной ячейки содержит два координационных комплекса.

Длины связей U=O в линейных уранильных группах (∠ O=U=O 180.0°) обоих комплексных анионов [UO₂Cl₄]²⁻ равны 1,768(2) × 2 и 1,752(2) × 2 Å. В обоих анионах координацию вокруг металлического центра образуют четыре атома хлора в экваториальной плоскости, с расстояниями U–Cl между 2,6302(9) и 2,7054(9) Å. Катион H₂bipy находится во второй координационной сфере в транс конформации и образует в качестве донора с атомами Cl три водородные связи N1–H5···Cl1 3,212 Å, C4–H6···Cl1 3,492 Å и C9–H3···Cl2 3,684 Å. Три дополнительных взаимодействия имеют место в структуре между катионом H₂bipy и оксигруппой катиона уранила (C2–H8···O2 3,244 Å, C7–H1···O1 3,470 Å и C10–H4···O1 3,343 Å).

1.3.7. (C₅H₆N)₂[UO₂Cl₄] (I), (C₆H₈N)₂[UO₂Cl₄] (II), (C₅H₆NO)₂[UO₂Cl₄] (III), (C₁₀H₁₀N₂S₂)[UO₂Cl₄] (IV), (C₅H₇N₂)₂[UO₂Cl₄] (V), (C₇H₁₁N₂)₂[UO₂Cl₄] (VI)

В работе [21] сообщено о синтезе 12 тетрагалогенидных [UO₂X₄]²⁻ (X = Cl, Br) комплексных соединений уранила с γ-замещенными катионами пиридиния, исследовании их методами монокристаллической рентгеновской дифракции и флуоресцентной спектроскопии. Шесть полученных соединений содержат тетрахлоридные комплексные анионы [UO₂Cl₄]²⁻, остальные шесть являются тетрабромидными комплексными соединениями. Они будут рассмотрены в следующем разделе.

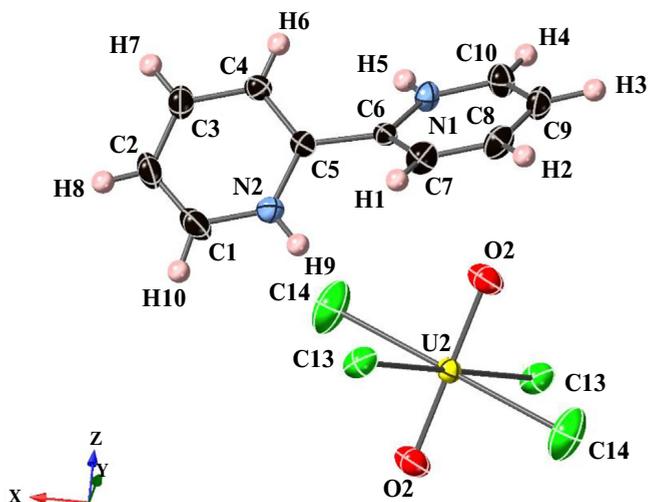


Рис. 3. Строение комплексного соединения тетрахлоридуранила 2,2'-бипиридиния [20]

Установлено, что систематическое изменение электронодонорных групп ($X = H, CH_3, OH, SH, NH_2, N(CH_3)_2$) в катионе пиридиния влияет на присутствие и/или силу различных супрамолекулярных синтонов, включая водородную связь и π -взаимодействия.

Соединения (**I–VI**) синтезированы при комнатной температуре из ацетата уранила и 4-замещенных пиридина, растворенных в 2М хлористоводородной кислоте. Образовавшийся бледно-желтый раствор (рН 0–0,5) испаряли при комнатной температуре в открытой атмосфере. Кристаллографические и некоторые структурные характеристики для соединений (**I–VI**) приведены в таблице.

Соединение $(C_5H_6N)_2UO_2Cl_4$ (**I**) кристаллизуется в триклинной сингонии, пр. гр. *P*-1. Независимая часть элементарной ячейки (**I**) состоит из двух уникальных дианионов $[UO_2Cl_4]^{2-}$ и четырех уникальных катионов пиридиния, которые образуют бесконечную цепочку вдоль направления $[011]$. Катион пиридиния образует бифуркатную мостиковую водородную связь с атомами $Cl2'$ и $Cl1$ обоих анионов атомов $U1'$ и $U1$. Это взаимодействие повторяется благодаря элементов симметрии, так что оно присутствует по обе стороны уранильной цепи. Катионы пиридиния, содержащие атомы $N2$ и $N3$ связывающие уранильные тектоны $U1$ и $U2$ вместе через бифуркатные водородные связи $N-H \cdots Cl$ с хлоридными атомами $Cl4$ и $Cl5$ и $Cl1$ и $Cl5$ соответственно.

Соединение $(C_6H_8N)_2[UO_2Cl_4]$ (**II**) кристаллизуется в моноклинной пространственной группе $P2_1/n$ и состоит из дианионов тетрахлорида уранила $[UO_2Cl_4]^{2-}$, заряд которых сбалансирован катионами 4-метилпиридиния (4-МП). Катионы 4-МП образуют водородные связи $N1-H7 \cdots Cl2$ с атомами хлора $Cl2$ и $Cl2'$ ураниловых тектонов, формируя катион-дианион-катион группы ($N1 \cdots Cl2$ 3,182(2) Å и $\angle N1-H7 \cdots Cl$ 167(2)°). Соседние группы располагаются так, что образуются смещенные π -взаимодействия между катионами 4-МП. Эти нековалентно связанные группы порождают цепочку, распространяющуюся вдоль направления $[101]$. Метильные группы в γ -положении катионов параллельно образуют

Кристаллографические и структурные данные для хлоридных комплексных соединений уранила с замещенными катионами пиридиния

Номер соединения	Соединение	Симметрия, пространственная группа	Кристаллографические данные			Длина связи R, Å, угол связи, °		Источник
			$a, \text{Å}$ $b, \text{Å}$ $c, \text{Å}$	$\alpha, ^\circ$ $\beta, ^\circ$ $\gamma, ^\circ$	Z	R U=O угол O=U=O	R U–Cl	
I	$(C_5H_6N)_2UO_2Cl_4$	Три- клинная <i>P</i> -1	11,132(2) 11,278(2) 13,943(2)	107,512(2) 107,962(2) 90,171(2)	$Z = 4$	U1 1,768(2) 1,778(2) U2 1,764(2) 1,776(2)	U1 2,6610(8)– 2,6960(8) U2 2,6559(8)– 2,6976(8)	[21]
II	$(C_6H_8N)_2[UO_2Cl_4]$	Моно- клинная $P2_1/n$	7,772(1) 11,549(2) 9,882(2)	$\beta = 90,536(2)$	$Z = 2$	$1,7707(14) \times 2$	$2,6549(5) \times 2$ $2,6927(5) \times 2$	[21]
III	$(C_5H_6NO)_2[UO_2Cl_4]$	Три- клинная <i>P</i> -1	7,028(2) 7,537(3) 8,501(3)	87,714(5) 66,262(4) 84,952(5)	$Z = 1$	$1,766(2) \times 2$ 180,00(3)	$2,6753(11) \times 2$ $2,6755(10) \times 2$	[21]
IV	$(C_{10}H_{10}N_2S_2)[UO_2Cl_4]$	Три- клинная <i>P</i> -1	7,4032(9) 8,939(1) 13,348(2)	94,56(2) 103,840(1) 91,590(2)	$Z = 2$	1,791(2) 1,774(2) 178,81(8)°	2,6349(8)– 2,6942(7)	[21]
V	$(C_5H_7N_2)_2[UO_2Cl_4]$	Три- клинная <i>P</i> -1	6,8528(9) 7,0665(9) 9,348(1)	89,304(2) 72,424(2) 8,136(2)	$Z = 1$	$1,7734(18) \times 2$ 180,0	$2,6503(7) \times 2$ $2,7044(6) \times 2$	[21]
VI	$(C_7H_{11}N_2)_2[UO_2Cl_4]$	Три- клинная <i>P</i> -1	7,527(2) 8,314(2) 9,084(2)	82,489(4) 69,55(2) 84,197(3)	$Z = 1$	$1,7712(13) \times 2$ 180,00(7)	$2,6727(7) \times 2$ $2,6773(7) \times 2$	[21]

слабые водородные связи C–H...Cl с уранильными тектонами цепочки (C6...Cl1 3,829 Å и \angle C6–H6a...Cl1 173°).

Соединение (C₅H₆NO)₂[UO₂Cl₄] (**III**) кристаллизуется в триклинной сингонии пр. гр. *P*-1 и состоит из дианионов тетрахлорида уранила, заряд которых сбалансирован катионами 4-гидроксилипиридиния (4-ГП). Катион 4-ГП образует бифуркатные мостиковые N–H...Cl и N–H...O водородные связи с лигандом Cl1 и аксиальными атомами кислорода O1 двух соседних ураниловых тектонов с длинами и углами связи: N1...Cl1 3,266(3) Å; \angle N1–H6...Cl1 142(4)° и N1...O1 3,187(4) Å; \angle N1–H6...O1 113(3)°. Гидроксильная группа 4-НР, в свою очередь, образует водородную связь с атомом хлора уранилового тектона третьего ряда (O2–H7...Cl2 3,062(3) Å и \angle O2–H7...Cl2 172(4)°). Донорная способность катиона 4-НР образовать двойные водородной связи способствует созданию бесконечных цепочек, распространенных параллельно вдоль направления [111].

Соединение (C₁₀H₁₀N₂S₂)[UO₂Cl₄] (**IV**) кристаллизуется в триклинной сингонии пр. гр. –1 и состоит из дианионов тетрахлорида уранила и катионов бис(4-пиридиния)дисульфида (4-ПДС). Тектоны 4-ПДС (двойные доноры) и уранилтетрахлоридные тектоны (акцепторы) чередуются и сшиваются водородными связями, образуя цепочку, распространяющуюся зигзагообразно вдоль [001] направлении. Ион пиридиния N1–H1a образует бифуркатную водородную связь с двумя атомами хлора, Cl1 и Cl2 дианионов [UO₂Cl₄]²⁻, а второй ион пиридиния N2–H2a образует взаимодействие с уранильным кислородом O1 второго [UO₂Cl₄]²⁻ аниона. Гофрированные супрамолекулярные цепи чередующихся тектонов 4-ПДС/[UO₂Cl₄]²⁻ укладываются, образуя слои в плоскости (110). Межцепочечные взаимодействия сера–хлор образуются между атомами серы S1 и S2 катионов 4-ПДС и хлорлигандами Cl2 и Cl3 с длинами и углами связей C3–S1...Cl2 3,451(1) Å, 161,6(1)° и C8–S2...Cl3 3,520(1) Å и 97,4(1)°. Длины связей C3–S1 1,767(3) Å и C8–S2 1,770(3) Å.

Соединение (C₅H₇N₂)₂[UO₂Cl₄] (**V**) кристаллизуется в пр. гр. *P*-1 и образовано из дианионов тетрахлорида уранила и катионов 4-аминопиридиния (4-АП). Два сепаратных взаимодействия водородных связей, происходящих из иона пиридиния (N1–H...Cl2) и второй из аминогруппы (N2–H8...I2), связывают катионы 4-АП и уранилтетрахлоридные тектоны в параллельные цепочки. Катионы 4-АП выстраиваются антипараллельно и слегка смещаются, так что они складываются вдоль направления [100], образуя бесконечные столбики посредством водород-π-взаимодействия. Столбики сшивают параллельные цепи вместе, способствуя образованию слоев. Аминогруппы (двойные доноры) образуют второе взаимодействие, бифуркатные N–H...Cl и N–H...O водородные связи, которые сшивают слои вместе, образуя единое целое 3D супрамолекулярную сеть.

Соединение (C₇H₁₁N₂)₂[UO₂Cl₄] (**VI**) кристаллизуется в пр. гр. *P*-1 и построено из дианионов тетрахлорида уранила и катионов 4-диметил(амино)пиридиния (ДМАП). Катионы ДМАП образуют бифуркатные плоские N–H...Cl водородные связи с атомами хлора Cl1 и Cl2 ураниловых тектонов с образованием трехчленных групп (два катиона и один дианион). Трехчленные строительные блоки сшиты друг с другом за счет смещения π-взаимодействий, образующихся между катионами соседних групп. Катионы ДМАП образуют бесконечные столбцы посредством компенсирующих π-взаимодействий и в конечном итоге облегчают образованию слоев в плоскости (01-1). Супрамолекулярный мотив отмечается, хотя и не столь значительный, поскольку метиловые водороды (на атомах C6 и C7) образуют два C–H...O взаимодействия с уранильными атомами кислорода O1 и O1'.

1.3.8. (C₁₀H₉N₂S)₂UO₂Cl₄

Соединение ди-2-пиридил сульфид является хелатным лигандом, образуя комплексные соединения со многими *d* переходными металлами. В связи с отсутствием комплексных соединений этого лиганда с лантаноидами и ионами уранила и с целью выяснения возможности координации этого потенциально бидентатного лиганда с ионом уранила авторами [22] выполнен монокристалльный рентгеноструктурный анализ комплекса, полученного взаимодействием раствора лиганда в ацетонитриле с хлоридом уранила в безводном этиловом спирте.

Полученное соединение (C₁₀H₉N₂S)₂UO₂Cl₄ кристаллизуется в триклинной сингонии, пр. гр. *F*-1 с параметрами: *a* = 13,96(2), *b* = 16,59(2), *c* = 10,92(2) Å, α = 103,92(2),

$\beta = 90,15(3)$, $\gamma = 91,38(3)^\circ$, $Z = 1$. Соединение $(C_{10}H_9N_2S)_2UO_2Cl_4$ имеет солеподобную структуру, образованную из протонированных катионов $(C_{10}H_9N_2S)^+$ и комплексных анионов $[UO_2Cl_4]^{2-}$.

В комплексном анионе $[UO_2Cl_4]^{2-}$ примерной симметрии D_{4h} четыре атома Cl занимают вершины экваториального квадрата вокруг линейной группы UO_2^{2+} ($\angle O=U=O$ $180,00^\circ$). Расстояния U=O нормальные и равны $1,768(3) \times 2$ Å, а значения двух кристаллографически независимых расстояний U–Cl одинаковые и составляют $2,662(5) \times 2$ и $2,665(5) \times 2$ Å.

Протонированный катион $(C_{10}H_9N_2S)^+$ имеет *N,N*-внутреннюю конформацию. Выполненные расчеты методом наименьших квадратов показали, что плоскости пиридина образуют углы 5 и 2° с плоскостью группы C(1)–S–C(6) так, что всю молекулу можно считать приблизительно плоской. Длины связей C(1)–S и C(6)–S равны 1,76(2) и 1,75(2) Å соответственно. Такие же по величине длины связей C–S присутствуют в структуре $(C_{10}H_{10}N_2S_2)[UO_2Cl_4]$ (IV), рассмотренной выше.

1.3.9. $[PPh_4]_2UO_2Cl_4$ (1-триклинная симметрия), $[PPh_4]_2UO_2Cl_4$ (2-моноклинная симметрия)

Наличие изолированных комплексных анионов $[UO_2Cl_4]^{2-}$ установлено также в структурах $[PPh_4]_2UO_2Cl_4$ (1-триклинная симметрия), $[PPh_4]_2UO_2Cl_4$ (2-моноклинная симметрия). В работе [23] синтезированы, исследованы структурно и спектроскопически шесть тетрахлоридных комплексных соединений уранила с катионами $[PPh_4]^+$ и $[AsPh_4]^+$ для количественной оценки влияния кристаллографической фазы и решеточного растворителя на колебательные свойства уранильной группы. Исследованные соединения получены растворением UO_3 в 2,0 М HCl с последующим добавлением раствора $[PPh_4]Cl$ (соединения 1–5) или $AsPh_4$ (соединение 6).

Несольватированные соединения 1 и 2, имеющие одинаковые химические формулы $[PPh_4]_2UO_2Cl_4$, кристаллизуются в различных пространственных группах симметрии: (1) в триклинной и (2) в моноклинной.

Исходя из их идентичности, соединения 1 и 2 были исследованы для определения влияния кристаллографической фазы и межмолекулярного расположения на колебательные свойства уранильного фрагмента.

Спектр комбинационного рассеяния соединения 1 показывает симметричную частоту растяжения при $838(1) \text{ см}^{-1}$, а инфракрасный спектр – асимметричное растяжение при $919(1) \text{ см}^{-1}$. В соединении 2 оба растяжения смещены в красную сторону и появляются при $823(1)$ и $904(1) \text{ см}^{-1}$ для симметричного и асимметричного растяжений соответственно.

Поскольку соединения 1 и 2 являются полиморфами, различия в колебаниях уранила между двумя видами объяснено различиями в кристаллографической фазе и межмолекулярном расположении. Одно из различий в межмолекулярном расположении представляет собой взаимодействие водородных связей между анионом и катионом. Второе отличие наблюдается при сравнении длин связей U–Cl в экваториальной плоскости, средняя длина связи U–Cl уменьшается на $0,016$ Å при переходе от соединения 1 к соединению 2.

1.4. Тетрахлоридные комплексные соединения уранила с кристаллизационными и сольватными нейтральными молекулами и ионами хлора

Синтезирован и структурно исследован ряд тетрахлоридных комплексных соединений уранила, в кристаллических структурах которых наряду с катионами и анионами содержатся ионы Cl^- , нейтральные кристаллизационные или сольватные молекулы. Характерная особенность кристаллической структуры этой группы соединений – образование катионом водородных связей не с лигандами комплексного аниона $[UO_2Cl_4]^{2-}$, а с дополнительными ионами Cl^- , атомами и O молекул H_2O или атомами сольватных молекул.

1.4.1. $(C_{15}H_{13}N_3)UO_2Cl_4 \cdot H_2O$

Синтез и кристаллическая структура трех хлоридных комплексных соединений уранила с протонированным катионом 2,2':6',2''-терперидина (обозначенный *terpy*) описаны в работе [24]. Два из них $(C_{15}H_{13}N_3)UO_2Cl_4 \cdot H_2O$ ($(H_2terpy)UO_2Cl_4 \cdot H_2O$) и $(C_{15}H_{13}N_3)UO_2Cl_4 \cdot 2Cl$ ($(H_2terpy)UO_2Cl_4 \cdot 2Cl$) являются тетрахлоридными комплексами уранила, содержащими дополнительно молекулы H_2O и ионы Cl^- . Синтез проводили гидротермальным методом в автоклаве из смеси раствора UCl_4 в конц. HCl , 2,2':6',2''-терперидина, ацетонитрила, пиридина и воды. Раствор нагревали статически при 120 °С в течение 48 ч. Полученные желтые кристаллы фильтровали, промывали водой и высушивали при комнатной температуре.

Соединение $(C_{15}H_{13}N_3)UO_2Cl_4 \cdot H_2O$ кристаллизуется в триклинной сингонии, пр. гр. *P*-1: $a = 7,5618(3)$, $b = 9,6288(3)$, $c = 14,8361(5)$ Å, $\alpha = 94,328(2)$, $\beta = 98,221(1)$, $\gamma = 109,943(1)^\circ$, $Z = 2$. Кристаллическая структура $(C_{15}H_{13}N_3)UO_2Cl_4 \cdot H_2O$ образована из квадратно-бипирамидальных комплексных анионов $[UO_2Cl_4]^{2-}$, изолированных друг от друга двухзарядными протонированными катионами H_2terpy и кристаллизационными молекулами H_2O .

В структуре $(C_{15}H_{13}N_3)UO_2Cl_4 \cdot H_2O$ содержатся два кристаллографически независимых аниона $[UO_2Cl_4]^{2-}$, имеющих характерное для таких ионов строение. Квадратно-плоская бипирамида $[UO_2Cl_4]^{2-}$ содержится в виде изолированного мотива во многих молекулярных органо-неорганических ансамблях с различными протонированными аминами в качестве противоионов.

В линейных уранильных группах UO_2^{2+} ($\angle O=U=O$ 179,99(1)°) анионов $[UO_2Cl_4]^{2-}$ длины связей $U=O$ равны $1,761(2) \times 2$ и $1,756(3) \times 2$ Å. Расстояния $U-Cl$ в экваториальной плоскости полиэдров изменяются в интервале $2,6512(10) \times 2$ – $2,6943(8) \times 2$ Å.

Свободная молекула H_2O образует водородные связи с двумя атомами Cl каждого аниона ($OW-HW1 \cdots Cl2$ 3,308(3) Å и $OW-HW2 \cdots Cl4$ 3,239(3) Å). В результате образуются бесконечные гофрированные ленты, простирающиеся вдоль направления $[101]$.

Протонированные катионы H_2terpy^+ образованы из трех пиридинных колец соединенных $C-C$ связями. Атомы азота периферических пиридинных групп $N1$ и $N3$ протонированы и образуют «хелатным» способом водородные связи с атомом O свободной молекулы H_2O ($N1-H1N \cdots O1W$ 2,825(4) Å (158°), $N3-H3N \cdots O1W$ 2,865(4) Å (153°)) (В скобках приведены значения угла связи $O = U = O$).

1.4.2. $(C_{15}H_{13}N_3)_2UO_2Cl_4 \cdot 2Cl$

Соединение $(C_{15}H_{13}N_3)_2UO_2Cl_4 \cdot 2Cl$ кристаллизуется в моноклинной сингонии пр. гр. *P*₂/c: $a = 8,2282(2)$, $b = 13,5330(4)$, $c = 15,4614(5)$ Å, $\beta = 104,340(1)^\circ$, $Z = 2$ [25]. Кристаллическая структура $(C_{15}H_{13}N_3)_2UO_2Cl_4 \cdot 2Cl$ сходна со структурой $(C_{15}H_{13}N_3)UO_2Cl_4 \cdot H_2O$ и отличается от последней тем, что вместо кристаллизационной молекулы H_2O содержит два свободных иона Cl^- и один кристаллографический центр U вместо двух. Геометрические параметры обеих структур практически одинаковые.

Как и в структуре $(C_{15}H_{13}N_3)UO_2Cl_4 \cdot H_2O$, протонированные атомы азота периферических пиридинных групп $N1$ и $N3$ образуют «хелатные» водородные связи с ионами $Cl3$ ($N1-H1A \cdots Cl3$ 3.0238(19) Å (137°), $N3-H3A \cdots Cl3$ 3.0089(18) Å (149°)).

1.4.3. $(C_{10}H_{11}N_3)_2UO_2Cl_4 \cdot 2H_2O \cdot 2Cl$, $(C_{10}H_{10}N_2)_2UO_2Cl_4 \cdot 2H_2O \cdot 2Cl$

В работе [19] наряду с синтезом и структурным исследованием пяти тетрахлоридных комплексных соединений уранила с различными катионами дипиридиния, содержащими изолированные анионы $[UO_2Cl_4]^{2-}$, получены и изучены методом рентгеноструктурного анализа два тетрахлоридных комплексных соединения уранила $(C_{10}H_{11}N_3)_2UO_2Cl_4 \cdot 2H_2O \cdot 2Cl$ и $(C_{10}H_{10}N_2)_2UO_2Cl_4 \cdot 2H_2O \cdot 2Cl$, в кристаллических структурах которых помимо катионов и комплексных тетрахлоридных анионов содержатся свободные молекулы H_2O и ионы хлора Cl^- . Соединения получены при комнатной температуре из смеси оксиацетата уранила, органического амина, HCl и H_2O .

Соединение $(C_{10}H_{11}N_3)_2UO_2Cl_4 \cdot 2H_2O \cdot 2Cl$ образует триклинную структуру, пр. гр. $P-1$: $a = 7,1290(4)$, $b = 9,9708(5)$, $c = 11,4392(6)$ Å, $\alpha = 71,3093(5)$, $\beta = 72,5943(8)$, $\gamma = 77,2493(7)^\circ$, $Z = 1$, отличающуюся от структур тетрахлоридных комплексах, описанных в разделе 1.1.4, присутствием свободных ионов Cl^- и кристаллизационных молекул H_2O . Тетрахлоридные комплексные анионы $[UO_2Cl_4]^{2-}$ в структуре имеют характерное для такого аниона строение. Они представляют собой сплюснутые октаэдры, в которых линейная уранильная группа связана с четырьмя атомами Cl , занимающими вершины экваториального квадрата полиэдра. Длины связей $U=O$ в группе UO_2^{2+} равны $1,7731(14) \times 2$ Å, а расстояния $U-Cl$ одинаковые $2,6701(5) \times 2$ и $2,6785(5) \times 2$ Å и являются характерными длинами связей $U-Cl$ в структурах тетрахлоридных комплексных соединений уранила.

Протонированный катион 4,4'-дипиридиламина образован из двух пиридилных колец, соединенных аминогруппой и содержит три протонированных атома N ($N1$, $N2$ и $N3$). В структуре $(C_{10}H_{11}N_3)_2UO_2Cl_4 \cdot 2H_2O \cdot 2Cl$ отсутствует межмолекулярное взаимодействие протонированного катиона 4,4'-дипиридиламина с анионом $[UO_2Cl_4]^{2-}$, катион взаимодействует исключительно со свободными хлорид-ионами ($Cl3$) и несвязанными молекулами воды. При этом периферийные атомы $N1$ и $N3$ взаимодействуют с хлорид-ионами $Cl3$ ($N1-N1 \cdots Cl3$ $3,036(2)$ Å (167°), $N3-N3 \cdots Cl3$ $3,061(2)$ Å (167°)), а аминный атом азота $N2$ образует водородную связь с атомом O молекулы H_2O ($N2-H2 \cdots O_w$ $1,2,802(3)$ Å (162°)).

Кристаллическая структура $(C_{10}H_{10}N_2)_2UO_2Cl_4 \cdot 2H_2O \cdot 2Cl$ моноклинная, пр. гр. $P2_1/n$: $a = 7,0230(2)$, $b = 15,4120(4)$, $c = 13,4514(3)$ Å, $\beta = 102,7602(4)^\circ$, $Z = 2$. Она отличается от структуры $(C_{10}H_{11}N_3)_2UO_2Cl_4 \cdot 2H_2O \cdot 2Cl$ строением катиона, образованного из двух пиридилных колец. Как и в структуре $(C_{10}H_{11}N_3)_2UO_2Cl_4 \cdot 2H_2O \cdot 2Cl$, протонированные атомы N не образуют связей с атомами аниона, а взаимодействуют с свободными хлорид-ионами и молекулами H_2O . Протонированный атом $N1$ образует водородную связь с атомом O молекулы H_2O ($N1-N1 \cdots O_w$ $1,2,718(3)$ Å (158°)), а протонированный атом $N2$ реагирует со свободным ионом $Cl2$ ($N2-H2 \cdots Cl2$ $2,988(2)$ Å (152°)).

1.4.4. $(C_5H_6N)_2UO_2Cl_4 \cdot 2(C_5H_5N)$

Необычная короткая водородная связь $N-H \cdots N$ $2,665$ Å установлена в кристаллической структуре $(C_5H_6N)_2UO_2Cl_4 \cdot 2(C_5H_5N)$, относящейся к триклинной сингонии, пр. гр. $P-1$: $a = 8,4466(17)$, $b = 9,1058(18)$, $c = 9,865(2)$ Å, $\alpha = 111,85(3)$, $\beta = 91,90(3)$, $\gamma = 115,10(3)^\circ$, пр. гр. $P-1$, $Z = 1$ [26]. Структура $(C_5H_6N)_2UO_2Cl_4 \cdot 2(C_5H_5N)$ образована из изолированных комплексных тетрахлоридных анионов $[UO_2Cl_4]^{2-}$, протонированных молекул пиридина в качестве катионов и сольватных нейтральных молекул пиридина. Комплексные анионы $[UO_2Cl_4]^{2-}$ имеют характерную сплюснутую октаэдрическую конфигурацию с линейной уранильной группой ($\angle O=U=O$ $180,000(1)^\circ$) и длинами связей $U=O$ равными $1,774(4) \times 2$ Å. Образующие экваториальную плоскость полиэдра хлоридные лиганды имеют практически одинаковые длины связей $2,6523(15) \times 2$ и $2,6662(16) \times 2$ Å и расположены в вершинах слегка искаженного квадрата.

Протонированные катионы пиридиния и нейтральные молекулы пиридина представляют собой шестичленные циклы, строение которых хорошо известно. Они отличаются лишь тем, что в катионе пиридинный атом $N2$ в отличие от атома N в молекуле пиридина протонирован. В молекуле пиридина длины связей $N1-C$ равны $1,327(8)$ и $1,336(9)$ Å, а расстояния $C-C$ лежат в интервале $1,369(10)$ – $1,389(9)$ Å. В катионе пиридиния длины связей $N2-C$ и $C-C$ практически одинаковые и равны $1,339(8)$ и $1,379(8)$ Å соответственно.

Протонированный атом азота $N2$ не взаимодействует с хлоридными и кислородными лигандами комплексного аниона $[UO_2Cl_4]^{2-}$, а образует весьма короткую водородную связь с пиридиновым атомом азота $N1$ нейтральной молекулы пиридина ($N2-H2N \cdots N1$ $2,665(8)$ Å ($165(7)^\circ$)). Установленная в структуре $(C_5H_6N)_2UO_2Cl_4 \cdot 2(C_5H_5N)$ значение водородной связи $N2-H2N \cdots N1$ $2,665(8)$ Å является единственно известной короткой межмолекулярной водородной связью типа $N-H \cdots N$.

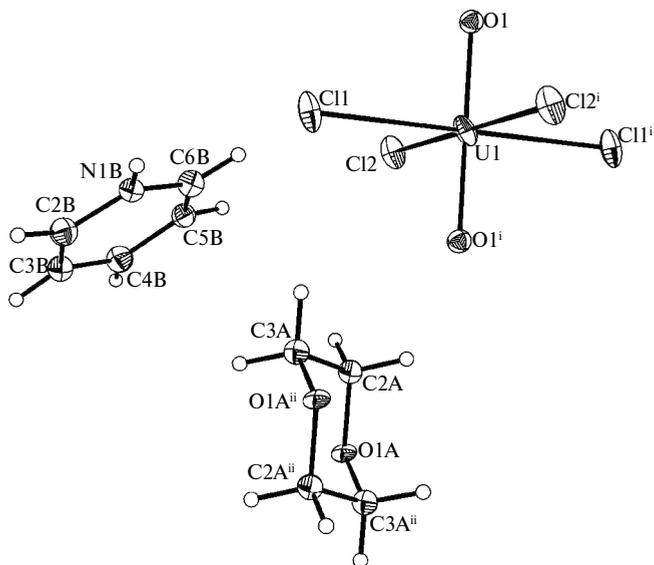


Рис. 4. Структура комплексного соединения бис(пиридиния) *транс*-тетрахлоридодиоксиураната(VI) диоксана сольвата [27]

1.4.5. $(C_5H_6N)_2UO_2Cl_4 \cdot C_4H_8O_2$

Кристаллическая структура бис(пиридиния) тетрахлоридодиоксиураната(VI) диоксана сольвата $(C_5H_6N)_2UO_2Cl_4 \cdot C_4H_8O_2$ относится к триклинной сингонии, пр. гр. *P*-1: $a = 7,766(2)$, $b = 8,666(2)$, $c = 9,202(2)$ Å, $\alpha = 63,57(3)$, $\beta = 67,08(2)$, $\gamma = 81,96(2)^\circ$, $Z = 1$ и образована из изолированных тетрахлоридных комплексных анионов $[UO_2Cl_4]^{2-}$, протонированных молекул пиридина в качестве катионов и сольватных нейтральных молекул диоксана [27] (рис. 4).

Тетрахлоридный анион уранила и молекула диоксана расположены в центре инверсии, а катион пиридиния занимает общую позицию. В структуре $(C_5H_6N)_2UO_2Cl_4 \cdot C_4H_8O_2$ атомы U координированы двумя атомами кислорода и четырьмя атомами Cl, образуя слегка искаженные октаэдры. В линейной уранильной группе ($\angle O=U=O$ $180,000(1)^\circ$) длины связей U=O равны $1,789(7) \times 2$ Å. Расстояния U–Cl в экваториальной плоскости полиэдра практически равные $2,679(3) \times 2$ и $2,684(3) \times 2$ Å.

В катионе пиридиния длины связей N–C равны $1,350(12)$ и $1,337(11)$ Å, а расстояния C–C изменяются в интервале $1,331(14)$ – $1,411(12)$ Å. Каждый из двух симметрично связанных катионов пиридиния образует весьма прочные водородные связи N1B–H1B \cdots O1A с атомом O молекулы диоксана с расстояниями $2,725(11)$ Å и углом связи 151° , формирующие в свою очередь водородносвязанные катионы (пиридин \cdots диоксан \cdots пиридин) $^{2+}$. Эти строительные единицы соединены слабыми взаимодействиями C–H \cdots Cl в трехмерную сеть.

Заключение

На основании проведенного анализа кристаллических структур тетрахлоридных комплексных соединений уранила с катионами щелочных металлов, аммония, протонированными катионами органических оснований, производными катиона аммония и катионами ряда протонированных органических соединений, изученных монокристаллическим методом рентгеноструктурного анализа, определены кристаллохимические особенности строения данного класса соединений. В исследованных кристаллических структурах тетрахлоридных комплексных соединений UO_2^{2+} координационный полиэдр шестивалентного атома урана имеет тетрагонально-бипирамидальное (сплюснутое октаэдрическое) строение с атома-

ми кислорода уранильной группы в апикальных вершинах тетрагональной-бипирамиды и координированными атомами Cl-лигандов в экваториальной плоскости. При наличии в структурах тетрахлоридных комплексных соединений уранила наряду с комплексными анионами $[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ и протонированными катионами свободных ионов Cl^- и не связанных с атомом U нейтральных или координированных молекул, содержащих акцепторные атомы, катионы соединения не взаимодействуют с донорными атомами Cl аниона, а образуют водородные связи со свободными ионами хлора и/или акцепторными атомами свободных молекул. Из-за высокой симметрии (практически D_{4h}) комплексного аниона в структурах тетрахлоридных комплексах уранила соединения широко использованы для проведения многочисленных физических исследований, в частности спектроскопических, люминесцентных, компьютерных, теории функциональной плотности и других.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hall D., Rae A.D., Waters T.N. The crystal structure of dicaesium tetrachlorodioxouranium(VI) // *Acta Crystallogr.* 1966. Vol. 20, No. 2. P. 160–162. DOI: 10.1107/s0365110x66000355.
2. Watkin D.J., Denning R.G., Prout K. Structure of dicaesium tetrachlorodioxouranium(VI) // *Acta Crystallogr. Sect. C Cryst. Struct. Commun.* 1991. Vol. 47, No. 12. P. 2517–2519. DOI: 10.1107/s0108270191006777.
3. Тутов А.Г., Плахтий В.П., Усов О.А., Бубляев Р.А., Черненко Ю.П. Нейтроннографическое уточнение структуры нелинейного оптического кристалла дицезийуранилтетрахлорида $\text{Cs}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$ // *Кристаллография.* 1991. Т. 36, № 5. С. 1135–1138.
4. Schnaars D.D., Wilson R.E. Structural and Vibrational Properties of $\text{U(VI)O}_2\text{Cl}_4^{2-}$ and $\text{Pu(VI)O}_2\text{Cl}_4^{2-}$ Complexes // *Inorg. Chem.* 2013. Vol. 52. P. 14138–14147.
5. Ohwada K. Normal coordinate analysis of dicaesium uranyl tetrachloride ($\text{Cs}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$) // *Spectrochim. Acta.* 2013. Vol. 31A. P. 973–977.
6. Ohwada K. Laser Raman Spectra and Normal Coordinate Analysis of Some Uranyl Tetrachloride Complexes // *Appl. Spectrosc.* 2013. Vol. 34, No. 3. P. 327–331. DOI: 10.1366/000370280473027.
7. Flint C.D., Tanner P.A. Luminescence and absorption spectra of $\text{M}_2\text{UO}_2\text{Cl}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ // *Molecul. Phys.* 1981. Vol. 44, No. 2. P. 411–425. DOI: 10.1080/00268978100102541.
8. Anson C.E., Al-Jowder O., Jayasooriya U.A., Powell A.K. Dirubidium Tetrachlorodioxouranium(VI)–Water (1:2) // *Acta Crystallogr. Sect. C Cryst. Struct. Commun.* 1996. Vol. 52, No. 2. P. 279–281. DOI: 10.1107/s0108270195011723.
9. Augustine L.J., Rajapaksha H., Pynch M.M.F., Kasperski M., Forbes T.Z., Mason S.E. Periodic Density Functional Theory Calculations of Uranyl Tetrachloride Compounds Engaged in Uranyl–Cation and Uranyl–Hydrogen Interactions: Electronic Structure, Vibrational, and Thermodynamic Analyses // *Inorg. Chem.* 2023. Vol. 62. P. 372–380.
10. Kohlgruber T.A., Surbella III R.G. $(\text{NH}_4)_2[\text{UO}_2\text{Cl}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, a new uranyl tetrachloride with ammonium charge-balancing cations // *Acta Crystallogr.* 2023. Vol. E79, No. 8. P. 702–706. <https://doi.org/10.1107/S2056989023005753>.
11. Di Sipio L., Tondello E., Pelizzi G., Ingletto G., Montenero A. Di-(Tetramethyl)ammonium Uranyl Tetrahalides $[(\text{CH}_3)_4\text{N}]_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$, $[(\text{CH}_3)_4\text{N}]_2\text{UO}_2\text{Br}_4$ // *Cryst. Struct. Commun.* 1974. Vol. 3. P. 297–300.
12. Bois C., Dao N.Q., Rodier N. Refinement of the crystal structure of the bis(triethylammonium) tetrachlorodioxouranium(VI) // *J. Inorg. Nucl. Chem.* 1976. Vol. 38. P. 755–757.
13. Bois C., Dao N.Q., Rodier N. Structure Cristalline de Bis(tétraéthylammonium) Tétrachlorodioxouranium(VI) // *Acta Crystallogr.* 1976. Vol. B32. P. 1541–1544.
14. Di Sipio L., Tondello E., Pelizzi G., Ingletto G., Montenero A. Di-(Tetrapropylammonium) Uranyl Tetrachloride $[(\text{CH}_3)(\text{CH}_2)(\text{CH}_2)_4\text{N}]_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$ // *Cryst. Struct. Commun.* 1974. Vol. 3. P. 731–734.
15. Di Sipio L., Tondello E., Pelizzi G., Ingletto G., Montenero A. Di-(Tetrapropylammonium) Uranyl Tetrachloride $[(\text{CH}_3)(\text{CH}_2)_3\text{CH}_2\text{N}]_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$ // *Cryst. Struct. Commun.* 1974. Vol. 3. P. 527–530.
16. Di Sipio L., Paschetto A., Pelizzi G., Ingletto G., Montenero A. DI (1,10 *H*-Phenanthroline) Tetrachlorodioxouranate, $(\text{C}_{12}\text{H}_9\text{N}_2)_2\text{UO}_2\text{Cl}_4$ // *Cryst. Struct. Commun.* 1980. Vol. 10. P. 1153–1157.
17. Perry D.L., Freyberg D.P., Zalkin A. Imidazolium tetrachlorodioxouranate(VI), $[\text{C}_3\text{N}_2\text{H}_5]_2[\text{UO}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ // *J. Inorg. Nucl. Chem.* 1980. Vol. 42, No. 2. P. 243–245. DOI: 10.1016/0022-1902(80)80248-x.

18. Zalkin A., Perry D., Tsao L., Zhang D. Bis(2-methylimidazolium) Tetrachlorodioxouranate(VI), $2C_4H_7N_2^+UCl_4O_2^{2-}$ // *Acta Crystallogr.* 1983. Vol. C39. P. 1186–1189.
19. Deifel N.P., Cahill C.L. The uranyl tetrachloride anion as a tecton in the assembly of U(VI) hybrid materials // *CrystEngComm.* 2009. Vol. 11. P. 2739–2744.
20. Pyrch M.M., Williams J.M., Kasperski M.W., Applegate L.C., Forbes T.Z. Synthesis and spectroscopic characterization of actinyl(VI) tetrahalidecoordination compounds containing 2,2'-bipyridine // *Inorg. Chim. Acta.* 2020. Vol. 508. 119628.
21. Surbella III R.G., Andrews M.B., Cahill C.L. Self-assembly of $[UO_2X_4]^{2-}$ ($X=Cl, Br$) dianions with γ substituted pyridinium cations: Structural systematics and fluorescence properties // *J. Solid State Chem.* 2016. Vol. 236. P. 257–271.
22. Bombieri G., Forsellini G., Graziani R. Structure of Bis(2-pyridylthio-2-pyridinium) Tetrachlorodioxouranate(VI) // *Acta Crystallogr.* 1978. Vol. B34. P. 2622–2624.
23. Schnaars D.D., Wilson R.E. Lattice Solvent and Crystal Phase Effects on the Vibrational Spectra of $UO_2Cl_4^{2-}$ // *Inorg. Chem.* 2014. Vol. 53. 11036.
24. Lhoste J., Henry N., Loiseau T., Guyot T., Abraham F. Crystal structures of 2,2':6',2"-terpyridine uranyl chlorides molecular assemblies and their luminescence signatures // *Polyhedron.* 2013. Vol. 50. P. 321–327.
25. Hashem E., Swinburne A.N., Schulzke C., Evans R.C., Platts J.A., Kerridge A., Natrajan L.S., Baker R.J. Emission spectroscopy of uranium(IV) compounds: a combined synthetic, spectroscopic and computational study // *RSC Advances.* 2013. Vol. 3. P. 4350–4361.
26. Prasad N., Govil G. Study of geometrical parameters in N–H...N type of hydrogen Bonds // *Proc. Indian Acad. Sci. (Chem. Sci.).* 1980. Vol. 89. P. 253–262.
27. Pospieszna I., Radecka-Paryzek W., Kubicki M. Bis(pyridinium)trans-tetrachlorodioxidouranate(VI) dioxane solvate // *Acta Crystallogr.* 2008. Vol. E64. m239. DOI: 10.1107/S1600536807066949.

REFERENCES

1. Hall D., Rae A.D., Waters T.N. The Crystal Structure of Dicaesium Tetrachlorodioxouranium(VI). *Acta Crystallogr.* 1966;20:160–162.
2. Watkin D.J., Denning R.G., Prout K. Structure of dicaesium tetrachlorodioxouranium(VI). *Acta Crystallogr. Sect. C Cryst. Struct. Commun.* 1966;47:2517–2519.
3. Tutov A.G., Plakhtii V.P., Usov O.A., Bublyaev P.A., Chernenkov Yu.P. Neutronograficheskoe utochnenie struktury nelineinogo opticheskogo kristalla ditseziuraniltetrakhlorida $Cs_2UO_2Cl_4 = [Neutron$ diffraction refinement of the structure of a nonlinear optical crystal dicaesiumuranyl tetrachloride $Cs_2UO_2Cl_4$. *Crystallographiya.* 1991;36:1135–1138. (In Russ.).
4. Schnaars D.D., Wilson R.E. Structural and Vibrational Properties of $U(VI)O_2Cl_4^{2-}$ and $Pu(VI)O_2Cl_4^{2-}$ Complexes. *Inorg. Chem.* 1991;52:14138–14147.
5. Ohwada K. Normal coordinate analysis of dicaesium uranyl tetrachloride ($Cs_2UO_2Cl_4$). *Spectrochim. Acta.* 1991;31A:973–977.
6. Ohwada K. Laser Raman Spectra and Normal Coordinate Analysis of Some Uranyl Tetrachloride Complexes. *Appl. Spectr.* 1980;34:327–331.
7. Flint C.D., Tanner P.A. Luminescence and absorption spectra of $M_2UO_2Cl_4 \cdot xH_2O$. *Molec. Phys.* 1981;44:411–425.
8. Anson C.E., Al-Jowder O., Jayasooriya U.A., Powell A.K. Dirubidium Tetrachlorodioxouranium(VI)–Water (1:2). *Acta Crystallogr. Sect. C Cryst. Struct. Commun.* 1996;52:279–281.
9. Augustine L.J., Rajapaksha H., Pyrch M.M.F., Kasperski M., Forbes T.Z., Mason S.E. Periodic Density Functional Theory Calculations of Uranyl Tetrachloride Compounds Engaged in Uranyl–Cation and Uranyl–Hydrogen Interactions: Electronic Structure, Vibrational, and Thermodynamic Analyses. *Inorg. Chem.* 2023;62:372–380.
10. Kohlgruber T.A., Surbella III R.G. $(NH_4)_2[UO_2Cl_4] \cdot 2H_2O$, a new uranyl tetrachloride with ammonium charge-balancing cations. *Acta Crystallogr.* 2023;E79:702–706.
11. Di Sipio L., Tondello E., Pelizzi G., Ingletto G., Montenero A. Di-(Tetramethyl)ammonium Uranyl Tetrahalides $[(CH_3)_4N]_2UO_2Cl_4$, $[(CH_3)_4N]_2UO_2Br_4$. *Cryst. Struct. Comm.* 1974;3:297–300.
12. Bois C., Dao N.Q., Rodier N. Refinement of the crystal structure of the bis(triethylammonium) tetrachlorodioxouranium(VI). *J. Inorg. Nucl. Chem.* 1976;38:755–757.

13. Bois C., Dao N.Q., Rodier N. Structure Cristalline de Bis(tétraéthylammonium) Tétrachlorodioxouranium(VI). *Acta Crystallogr.* 1976;B32:1541–1544.
14. Di Sipio L., Tondello E., Pelizzi G., Ingletto G., Montenero A. Di-(Tetrapropylammonium) Uranyl Tetrachloride $[(CH_3)(CH_2)(CH_2)_4N]_2UO_2Cl_4$. *Cryst. Struct. Comm.* 1974;3:731–734
15. Di Sipio L., Tondello E., Pelizzi G., Ingletto G., Montenero A. Di-(Tetrabutylammonium) Uranyl Tetrachloride $[(CH_3)(CH_2)_3_4N]_2UO_2Cl_4$. *Cryst. Struct. Comm.* 1974;3:527–530.
16. Di Sipio L., Pasquetto A., Pelizzi G., Ingletto G., Montenero A. DI (1,10 *H*-Phenanthroline) Tetrachlorodioxouranate, $(C_{12}H_9N_2)_2UO_2Cl_4$. *Cryst. Struct. Comm.* 1981;10:1153–1157.
17. Perry D.L., Freyberg D.P., Zalkin A. Imidazolium tetrachlorodioxouranate(VI), $[C_3N_2H_5]_2[UO_2Cl_4]^{2-}$. *J. Inorg. Nucl. Chem.* 1980;42:243–245.
18. Zalkin A., Perry D., Tsao L., Zhang D. Bis(2-methylimidazolium) Tetrachlorodioxouranate(VI), $2C_4H_7N_2^+UCl_4O_2^{2-}$. *Acta Crystallogr.* 1983;C39:1186–1189.
19. Deifel N.P., Cahill C.L. The uranyl tetrachloride anion as a tecton in the assembly of U(VI) hybrid materials. *CrystEngComm.* 2009;11:2739–2744.
20. Pyrch M.M., Williams J.M., Kasperski M.W., Applegate L.C., Forbes T.Z. Synthesis and spectroscopic characterization of actinyl(VI) tetrahalidecoordination compounds containing 2,2'-bipyridine. *Inorg. Chim. Acta.* 2020;508. 119628.
21. Surbella III R.G., Andrews M.B., Cahill C.L. Self-assembly of $[UO_2X_4]^{2-}$ ($X=Cl, Br$) dianions with γ substituted pyridinium cations: Structural systematics and fluorescence properties. *J. Solid. State. Chem.* 2016;236:257–271.
22. Bombieri G., Forsellini G., Graziani R. Structure of Bis(2-pyridylthio-2-pyridinium) Tetrachlorodioxouranate(VI). *Acta Crystallogr.* 1978;B34:2622–2624.
23. Schnaars D.D., Wilson R.E. Lattice Solvent and Crystal Phase Effects on the Vibrational Spectra of $UO_2Cl_4^{2-}$. *Inorg. Chem.* 2014;53:11036–11045.
24. Lhoste J., Henry N., Loiseau T., Guyot T., Abraham F. Crystal structures of 2,2':6',2''-terpyridine uranyl chlorides molecular assemblies and their luminescence signatures. *Polyhedron.* 2013;50:321–327.
25. Hashem E., Swinburne A.N., Schulzke C., Evans R.C., Platts J.A., Kerridge A., Natrajan L.S., Baker R.J. Emission spectroscopy of uranium(IV) compounds: a combined synthetic, spectroscopic and computational study. *RSC Advances.* 2013;3:4350–4361.
26. Prasad N., Govil G. Study of geometrical parameters in N-H...N type of hydrogen Bonds. *Proc. Indian Acad. Sci (Chem. Sci.)* 1980;89:253–262.
27. Pospieszna I., Radecka-Paryzek W., Kubicki M. Bis(pyridinium) trans- tetrachloridodioxidouranate(VI) dioxane solvate. *Acta Crystallogr.* 2008;E64. m239.

Научная статья

УДК 327

DOI: 10.31857/S0869769825020136

EDN: GEEZZR

История сотрудничества Дальневосточного отделения РАН и Вьетнамской академии наук и технологий

М.Б. Штец

Марина Борисовна Штец

начальник управления

Управление международных отношений ДВО РАН, Владивосток, Россия

uvs@hq.febras.ru

<http://orcid.org/0009-0005-7020-1283>

Аннотация. В статье рассматриваются основные исторические этапы и хронология сотрудничества Дальневосточного отделения Российской академии наук и Вьетнамской академии наук и технологий (ВАНТ). Анализируются основные направления сотрудничества, приводятся примеры совместных научных исследований, экспедиций, программ и проектов.

Ключевые слова: СРВ, Вьетнам, ДВО РАН, ВАНТ, российско-вьетнамское сотрудничество, научно-техническое сотрудничество

Для цитирования: Штец М.Б. История сотрудничества Дальневосточного отделения РАН и Вьетнамской академии наук и технологий // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 175–185.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020136>

Original article

The history of cooperation between the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and the Vietnam Academy of Science and Technology

M.B. Shtets

Marina B. Shtets

Head of the Department

Department of International Relations of FEB RAS, Vladivostok, Russia

uvs@hq.febras.ru

<http://orcid.org/0009-0005-7020-1283>

Abstract. The article examines the main historical stages and chronology of cooperation between the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and the Vietnam Academy of Science and Technology (VAST). The main areas of cooperation are analyzed, examples of joint scientific research, expeditions, programs and projects are given.

Keywords: SRV, Vietnam, FEB RAS, VAST, Russian-Vietnamese cooperation, scientific and technical cooperation

For citation: Shtets M.B. The history of cooperation between the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and the Vietnam Academy of Science and Technology. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(2): 175–185. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020136>

Научные контакты советских ученых и ученых ДРВ (Демократическая Республика Вьетнам) начали устанавливаться еще в середине 1950-х годов. После создания в 1958 г. в ДРВ Государственного комитета наук в 1959 г. Вьетнам посетила делегация советских ученых во главе с академиком В.А. Котельниковым.

Дальневосточные ученые из Тихоокеанского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ТИНРО) первые совместные исследования рыбных ресурсов в морских водах Вьетнама начали проводить осенью 1959 г. в Тонкинском заливе Южно-Китайского моря согласно контракту № 8226, заключенному СССР и ДРВ 2 ноября 1960 г., уже после выполнения первой половины работ по Соглашению. с 1959 по 1965 г. в Восточно- и Южно-Китайском морях работало несколько экспедиций ТИНРО.

26 мая 1961 г. было подписано соглашение о научном сотрудничестве между Государственным комитетом наук ДРВ и Академией наук СССР. В конце 1974 г. стартовала первая экспедиция Тихоокеанского океанологического института Дальневосточного научного центра АН СССР в Южно-Китайское море для проведения морских геологических работ.

Признавая важную роль науки и технологий в развитии страны, в очень трудное военное время правительство Вьетнама издало Постановление № 118/СР от 20 мая 1975 г. о создании Национального центра научных исследований Вьетнама (НЦНИ). Первым директором НЦНИ был назначен профессор Чан Дай Нгиа, который с 1965 г. занимал должность председателя Государственного комитета по науке и технике ДРВ. 08.02.1966 он стал иностранным членом АН СССР по Отделению механики и процессов управления АН СССР.

18 января 1980 г. в Ханое был подписан План научного сотрудничества АН СССР и Вьетнамской академии наук (ВАН) на 1980–1985 гг. В план вошел проект «Южно-Китайское море» в рамках программы «Мировой океан». Проект был продлен на 1985–1990 гг. и на следующие пятилетние периоды. В рамках данного проекта в 1981–1990 гг. состоялся ряд экспедиций Тихоокеанского океанологического института (ТОИ), Института биологии моря (ИБМ), Тихоокеанского института биоорганической химии (ТИБОХ) и Тихоокеанского института географии (ТИГ) Дальневосточного научного центра (ДВНЦ) АН СССР во вьетнамские воды на научно-исследовательских судах «Каллисто», «Профессор Богоров», «Академик А. Несмеянов», «Академик А. Виноградов», «Академик М.А. Лаврентьев», «Академик Опарин» и «Берилл». После окончания экспедиций ученые обсуждали результаты на совместных симпозиумах. Так, 10–11 мая 1984 г. в Нячанге состоялся II Советско-Вьетнамский симпозиум по морской биологии, организованный ИБМ ДВНЦ АН СССР и Институтом морских исследований (ИМИ) НЦНИ СРВ. В работе симпозиума приняло участие около 60 специалистов из 12 научных учреждений СРВ и СССР: ИМИ, Филиала НЦНИ в Хошимине, Управления НЦНИ СРВ, ИБМ, ТИГ, ДВГИ ДВНЦ АН СССР, ИО АН СССР, Дальневосточного университета, ЛГУ, ИнБЮМ АН УССР, Ботанического института и Института географии АН СССР. Было представлено 19 докладов, посвященных физиологии и экологии моллюсков, составу и продуктивности планктонных сообществ, структуре и морфологии коралловых рифов, составу донных сообществ литорали прибрежных вод Вьетнама и другим вопросам морской биологии.

В июне 1987 г. делегация Национального центра научных исследований СРВ во главе с президентом центра проф. Нгуеном Ван Хиеу посетила Дальневосточный научный центр АН СССР (рис. 1). В состав делегации также вошли вице-президент проф. Хо Ши Тхоанг, атташе по науке и технике посольства СРВ в СССР Нгуен Ван Тханг и начальник управ-



Рис. 1. Члены делегации НЦНИ СРВ: вице-президент НЦНИ СРВ проф. Хо Ши Тхоанг, президент НЦНИ СРВ акад. Нгуен Ван Хиеу, начальник управления внешних сношений НЦНИ СРВ проф. Чинь Куанг Хуинь и атташе по науке и технике посольства СРВ в СССР Нгуен Ван Тханг. Сотрудники ИБМ ДВНЦ АН СССР: заведующий лабораторией экологии бентоса Ю.Я. Латыпов, директор института А.В. Жирмунский, с.н.с. А.Л. Дроздов, заместитель директора С.Л. Кондрашев, заместитель директора В.Л. Касьянов и ученый секретарь Т.А. Терехова. 11.06.1987, Владивосток, СССР. *Фото А. Голубева* (арх. ДВО РАН, ф. 28)

ления внешних сношений НЦНИ СРВ Чинь Куанг Хуинь. Вьетнамские ученые побывали в Институте биологии моря ДВНЦ АН СССР, Институте химии ДВНЦ АН СССР, Тихоокеанском институте биоорганической химии ДВНЦ АН СССР, Тихоокеанском институте географии ДВНЦ АН СССР, на биологических станциях «Старк» и «Восток» Института биологии моря ДВНЦ АН СССР.

Советско-вьетнамский Тропический научно-исследовательский и испытательный центр был учрежден в 1987 г., когда Советский Союз и Социалистическая Республика Вьетнам (СРВ) подписали межправительственное соглашение о строительстве этого центра на территории Вьетнама. Ровно через год после подписания этого документа – 7 марта 1988 г. – Тропический центр официально начал свою работу в соответствии с постановлением Совета министров СРВ.

1 декабря 1995 г. в Ханое были подписаны Соглашения о научном сотрудничестве между РАН и Национальным центром естественных наук и технологий Социалистической Республики Вьетнам (ННТ СРВ) и План научного сотрудничества между РАН и НЦНТ СРВ на 1996–2000 гг. В план вошла тема «Проблемы геологии, магматизма, металлогении, геодинамики, геологической среды, технологии переработки полезных ископаемых СРВ. Изучение и диагноз позднекайнозойской вулканической деятельности территории СРВ», где исполнителем помимо других институтов РАН стал Институт вулканологии ДВО РАН. с вьетнамской стороны исполнителем были заявлены Геологический и Геофизический институты НЦНТ СРВ.

В 2001 г. председателем Дальневосточного отделения РАН избран академик РАН Валентин Иванович Сергиенко. При поддержке академика Сергиенко научно-техническое сотрудничество ДВО РАН и ВАНТ получило новый импульс.

В соответствии с Планом научного сотрудничества между РАН и НЦНТ на 2002–2005 гг. предусмотрено сотрудничество Института биологии моря ДВО РАН по теме «Биологическое

разнообразии прибрежных вод Вьетнама и его рациональное использование», Биолого-почвенного института ДВО РАН по теме «Биоразнообразии почвенных и фитопаразитических нематод Вьетнама», Тихоокеанского института биоорганической химии ДВО РАН по теме «Биологически активные вещества морского происхождения», Института вулканической геологии и геохимии ДВО РАН по теме «Кайнозойский вулканизм Вьетнама», Института горного дела ДВО РАН по теме «Состояние запасов и технологии освоения россыпных месторождений Вьетнама».

В эти годы продолжалось сотрудничество в рамках двусторонних соглашений институтов ДВО РАН и научных учреждений Вьетнама (7 соглашений): Институт биологии моря ДВО РАН (исследования в области биологии моря, 2002 г.), Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН (акустическое зондирование морской среды, геологические и геофизические исследования, 2003, 2005 гг.), Биолого-почвенный институт ДВО РАН (2002 г.), Тихоокеанский институт биоорганической химии ДВО РАН и Институт биологии моря ДВО РАН (исследование биоразнообразия открытых вод шельфа Вьетнама, 2005 г.). После длительного перерыва возобновлена экспедиционная деятельность во Вьетнаме (2005 г.), состоялась совместная экспедиция на НИС «Академик Опарин» в территориальных водах Вьетнама, почетным гостем на борту судна стал президент ВАНТ проф. Данг Ву Минь.

В 2006 г. было продолжено сотрудничество в рамках межакадемического соглашения, подписан Протокол научного сотрудничества между РАН и ВАНТ на 2006–2010 гг. и Проблемно-тематический план на 2006–2010 гг., в который включены проекты: «Проблемы обрушения речных берегов и разработка способов защиты в Тхань Да районе г. Хо Ши Мин» (Институт горного дела ДВО РАН), «Изучение геологических структур и минерального потенциала шельфовых и глубоководных зон Вьетнама» (Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН), «Химические и биологические исследования коралловых рифов Вьетнама и морских природных соединений» (Институт биологии моря ДВО РАН, Тихоокеанский институт биоорганической химии ДВО РАН), «Исследование комплексной технологии выделения веществ, имеющих экономическое значение, из морских водорослей Вьетнама» (Институт биологии моря ДВО РАН), «Морские данные» (Тихоокеанский институт биоорганической химии ДВО РАН, Институт биологии моря ДВО РАН), «Пользование почвенных и фитонематод для определения качества окружающей среды» (Биолого-почвенный институт ДВО РАН).

Продолжено сотрудничество по 13 двусторонним соглашениям институтов ДВО РАН и ВАНТ (по состоянию на 1 мая 2007 г.): Институт биологии моря ДВО РАН (7 соглашений), Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН (3 соглашения), Тихоокеанский институт биоорганической химии ДВО РАН (2 соглашения), Биолого-почвенный институт ДВО РАН (1 соглашение). Темами сотрудничества стали: совместные исследования биологии моря, открытых вод шельфа Вьетнама, акустическое зондирование морской среды, геологические и геофизические исследования, биоразнообразии нематод в лесных системах и на затопляемых землях, изучение видового состава и распределения морских растений, совместное изучение соединений из морских водорослей, изучение биоразнообразия коралловых рифов. В мае 2007 г. состоялся визит президента ВАНТ проф. Данг Ву Миня в ДВО РАН. В результате переговоров были определены приоритетные направления научного сотрудничества – морская экология, биохимия и биохимическое разнообразие, океанология, гидрология, геология, гидрохимия.

В 2008 г. президентом ВАНТ назначен проф. Тъяу Ван Минь. В этом же году состоялся визит делегации ДВО РАН во главе с академиком В.И. Сергиенко во Вьетнам. В 2009–2010 гг. двустороннее сотрудничество между ДВО РАН и ВАНТ осуществлялось в рамках 33 соглашений по следующим темам:

- проведение совместных фундаментальных и прикладных исследований в области биотехнологии и фармакологии природных соединений флоры и фауны Вьетнама;
- проведение совместных исследований в области биохимии природных соединений морских микро- и макроорганизмов Вьетнама, а также морской биологии и экологии;
- изучение биоразнообразия беспозвоночных; проведение пресноводного мониторинга в бассейнах малых рек Вьетнама;
- совместные океанографические исследования;

- изучение проблем морской геологии, геофизики, океанографии и окружающей среды;
- взаимовыгодное сотрудничество в области создания подводных технических средств исследования и освоения Мирового океана;
- сотрудничество в области геологии и геофизики в Восточном море с целью обнаружения месторождений полезных ископаемых, разработка океанографических баз данных и информационных технологий;

- исследования гидродинамических процессов в водах южной части Вьетнама, колебаний уровня моря в позднем плейстоцене–голоцене на континентальном шельфе центральной части Вьетнама и образование твердых полезных ископаемых, подробная оценка и инновационное использование биологических ресурсов в тропических экосистемах Вьетнама.

С 10 по 14 августа 2009 г. Дальневосточное отделение РАН посетила делегация ВАНТ во главе с президентом ВАНТ проф. Тъяу Ван Минем (рис. 2). по результатам визита был подписан Меморандум о научно-техническом сотрудничестве между ДВО РАН и ВАНТ с намерением создать координационный центр развития научно-технического сотрудничества.

В 2009 г. заключен договор о создании Международной Вьетнамско-Российской научно-исследовательской лаборатории морской биологии и экологии (под эгидой ДВО РАН и ВАНТ) между Институтом биологии моря ДВО РАН и Институтом океанографии ВАНТ.

Особую роль в укреплении и расширении российско-вьетнамского научно-технического сотрудничества сыграло подписание Договора о создании Координационного центра развития научно-технического сотрудничества ДВО РАН и ВАНТ и Положения о Координационном центре развития научно-технического сотрудничества ДВО РАН и ВАНТ во время визита делегации ДВО РАН во Вьетнам 8–17 марта 2010 г. (рис. 3).

В 2010 г. состоялась пятая по счету Российско-Вьетнамская морская экспедиция на борту НИС «Академик Опарин» в территориальные воды Социалистической Республики Вьетнам. Впервые с российской стороны в экспедиции участвовали 29 сотрудников Тихо-

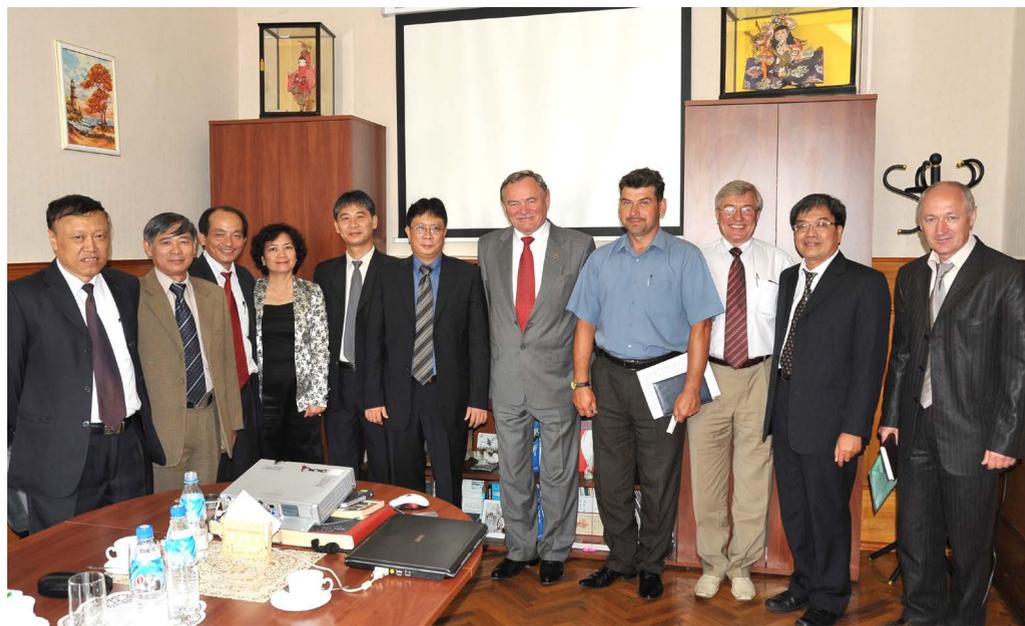


Рис. 2. Начальник Международного управления ВАНТ Тъяу Чи Тханг, директор Института геологии ВАНТ Чан Чонг Хоа, директор Института химии природных соединений ВАНТ Фам Куок Лонг, заместитель директора Института химии природных соединений ВАНТ Ле Май Хыонг, директор Института прикладных технологий ВАНТ Буй Минь Ли, президент ВАНТ Тъяу Ван Минь, председатель ДВО РАН академик Сергиенко В.И., помощник председателя ДВО РАН Спиченков А.В., заместитель председателя ДВО РАН чл.-корр. РАН Кульчин Ю.Н., заместитель директора Института морской геологии и геофизики ВАНТ Фунг Ван Фать, начальник Управления инновационного развития и международных связей ДВО РАН д.ф.-м.н. Чередниченко А.И. 11.09.2009, Владивосток, Россия



Рис. 3. Президент ВАНТ проф. Тъя Ван Минь и председатель ДВО РАН академик В.И. Сергиенко подписывают Договор о создании Координационного центра развития научно-технического сотрудничества ДВО РАН и ВАНТ. 09.03.2010, Ханой, Вьетнам

океанского института биорганической химии ДВО РАН и Института биологии моря ДВО РАН, с вьетнамской стороны – 10 ученых из четырех институтов ВАНТ. по завершении рейса в Ханое на базе Института химии природных соединений ВАНТ организован и проведен международный семинар «Совместные российско-вьетнамские экспедиции: морские биологически активные соединения и биоразнообразие Вьетнама». Особое внимание было уделено необходимости подготовки научных кадров для ВАНТ с помощью специалистов ДВО РАН, а также организации совместных экспедиций (морских и наземных) и совместных исследовательских лабораторий.

В 2010 г. созданы Открытая Российско-Вьетнамская научно-исследовательская лаборатория между Институтом биологии моря ДВО РАН и Нячангским институтом научных исследований и прикладных технологий ВАНТ и Институтом химии природных соединений ВАНТ, Открытая Российско-Вьетнамская научно-исследовательская лаборатория фармакологии и биотехнологии между Институтом биологии моря ДВО РАН и Институтом химии природных соединений ВАНТ, а также Совместная Вьетнамско-Российская лаборатория по морским наукам между Тихоокеанским океанологическим институтом ДВО РАН и Институтом морской геологии и геофизики ВАНТ.

В 2011–2013 гг. институты осуществляли двустороннее сотрудничество по 25 соглашениям. В 2011 г. заключено соглашение о создании Международной Вьетнамо-Российской лаборатории «Биология, экология и генетика наземных экосистем» между Биолого-почвенным институтом ДВО РАН и Институтом экологии и биологических ресурсов ВАНТ. В 2012 г. учреждена Вьетнамо-Российская лаборатория водных экосистем между Биолого-почвенным институтом ДВО РАН и Институтом тропической биологии ВАНТ (крупномасштабные исследования таксономии и экологии беспозвоночных континентальных и островных водоемов Вьетнама).

В 2013 г. подписаны Протокол о намерениях использования научно-исследовательского судна ДВО РАН для проведения совместных морских экспедиций, Соглашение о совместных научных исследованиях по изучению строения и особенностей тектоники восточного обрамления Евразии и окраинных морей между Дальневосточным геологическим институтом ДВО РАН и Институтом морской геологии и геофизики ВАНТ.

В 2010 г. окончился срок действия Тематического плана в рамках соглашения о научном сотрудничестве ДВО РАН и ВАНТ. Институтами ДВО РАН был подготовлен внушительный перечень проектов (16 тем сотрудничества) в новый тематический план на 2011–2013 гг.

В результате длительных переговоров между РАН и ВАНТ в июле 2012 г. состоялся визит президента ВАНТ в Москву, подписано Соглашение о научном сотрудничестве и обмене учеными между РАН и ВАНТ, Протокол к соглашению и Перечень совместных научных проектов РАН и ВАНТ. В перечень, состоящий из 51 проекта, включены 18 проектов от институтов ДВО РАН: Институт биологии моря – 6 проектов, Биолого-почвенный институт – 4 проекта, Тихоокеанский институт биоорганической химии – 4 проекта, Институт автоматике и процессов управления – 2 проекта, Тихоокеанский океанологический институт – 1 проект, Тихоокеанский институт географии – 1 проект.

В 2014 г. действовало уже 41 соглашение ДВО РАН и ВАНТ, это почти в 14 раз больше, чем в 2004 г., когда действовало только 3 соглашения. Институты ДВО РАН участвовали в 7 совместных с Вьетнамом программах и проектах. Распределение соглашений по областям наук выглядит так: в области наук о Земле – 38%, биологических наук – 24%; физико-математических наук – 20%; химических наук – 9%; рамочных соглашений ДВО РАН и ВАНТ – 9%. В этот год состоялись визиты 15 вьетнамских ученых в ДВО РАН и 33 дальневосточных ученых побывали в научных командировках во Вьетнаме. Для сравнения в 2004 г. было только 4 командировки российских ученых во Вьетнам и только 1 вьетнамский ученый посетил ДВО РАН. В 2014 г. были проведены 3 совместные конференции, 4 совместные экспедиции и полевые работы, а также к этому времени было создано 7 совместных российско-вьетнамских лабораторий и центров, дальневосточные ученые приняли участие в 2 конференциях во Вьетнаме.

В 2012 г. было подписано соглашение о проведении конкурса совместных проектов ДВО РАН и ВАНТ в области фундаментальных исследований. Первый конкурс проектов прошел в 2013 г., работы по первым проектам проводились в 2014–2015 гг. Данный совместный конкурс проектов в области фундаментальных исследований ДВО РАН и ВАНТ проводился с 2013 по 2020 г., всего был поддержан 21 проект с участием групп ученых институтов ВАНТ и следующих институтов ДВО РАН: БСИ, ФНЦ биоразнообразия, ННЦМБ, ТОИ, ТИГ, ДВГИ, ТИБОХ.

Российский фонд фундаментальных исследований проводил конкурс совместных проектов с Вьетнамом с 2006 по 2022 г. Всего было поддержано 24 совместных проекта ученых ДВО РАН и ВАНТ.

5 февраля 2018 г. в Ханое состоялось заседание Координационного центра по развитию научно-технического сотрудничества Дальневосточного отделения РАН и Вьетнамской академии наук и технологий. В ходе заседания была подписана Дорожная карта совместных российско-вьетнамской морских экспедиций на 2018–2025 гг. (рис. 4).

В рамках Дорожной карты в 2019 г. состоялась совместная экспедиция Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН на НИС «Академик Лаврентьев», организованная Тихоокеанским океанологическим институтом ДВО РАН и Тихоокеанским институтом географии ДВО РАН совместно с Институтом морской геологии и геофизики ВАНТ, Институтом географии ВАНТ и Институтом геологических наук ВАНТ.

В 2018, 2021 и 2023 гг. Тихоокеанский институт биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН организовал российско-вьетнамские научные экспедиции на борту НИС «Академик Опарин» в экономическую зону Вьетнама.

В 2021 г. с российской стороны в экспедиции помимо сотрудников ТИБОХ приняли участие коллеги из Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН), Национального научного центра морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН (ННЦМБ ДВО РАН), Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН (г. Севастополь) и Института медико-биологических проблем РАН (г. Москва). с вьетнамской стороны в экспедиции участвовали 16 ученых из Института окружающей среды и ресурсов ВАНТ, Института океанографии ВАНТ, Института химии природных соединений ВАНТ, Института космических технологий ВАНТ, Нячангского института научных исследований и прикладных технологий ВАНТ и Центра гидрологии Министерства природных ресурсов и окружающей среды СРВ. После возвращения НИС «Академик Опарин» во Владивосток ученые ДВО РАН и ВАНТ подвели предварительные итоги совместной экспедиции на гибридном семинаре 7 июля 2021 г.



Рис. 4. Президент ВАНТ проф. Тъяу Ван Минь и председатель ДВО РАН академик В.И. Сергиенко подписывают Дорожную карту совместных российско-вьетнамской морских экспедиций ДВО РАН и ВАНТ на 2018–2025 гг. 05.02.2018, Ханой, Вьетнам

В 2023 г. в рамках реализации Дорожной карты по сотрудничеству в области морских научных исследований на период 2023–2025 гг. ДВО РАН и ВАНТ ученым нашего отделения совместно с коллегами из ВАНТ удалось осуществить совместную морскую экспедицию на научно-исследовательском судне «Академик Опарин» в территориальных водах Вьетнама. 6 мая научно-исследовательское судно «Академик Опарин» вышло из порта Владивосток, а 17-го числа оно вошло в порт г. Нячанг, где прошла торжественная церемония встречи российских исследователей. 20 дней российские и вьетнамские ученые исследовали биологическое разнообразие Южно-Китайского моря. В экспедиции научно-исследовательского судна «Академик Опарин» приняли участие 59 ученых, из них 39 человек представляли российские организации и институты, включая Тихоокеанский институт биоорганической химии имени Г.Б. Елякова ДВО РАН; Национальный научный центр морской биологии имени А.В. Жирмунского ДВО РАН; Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБЮМ), г. Севастополь. В порту г. Нячанг к экспедиции присоединились 20 человек из восьми научно-исследовательских институтов Вьетнамской академии науки и технологии (ВАНТ), в том числе: из Института морской биохимии, Института химии морских природных продуктов, Института экологических технологий, Института космических технологий и Центра исследований и передачи технологий (г. Ханой); Института морской среды и природных ресурсов (г. Хайфон); Института океанографии и Нячангского института технологии и прикладных исследований (г. Нячанг).

8 июня в Нячанге состоялся Научный семинар по результатам совместной экспедиции ДВО РАН–ВАНТ. Участников семинара приветствовали руководители ДВО РАН и ВАНТ. о результатах 8-й совместной экспедиции ДВО РАН и ВАНТ на НИС «Академик Опарин» в морских водах на юге Вьетнама доложили руководители научной экспедиции к.х.н. Дмитрий Николаевич Пелагеев и Нгуен Ван Лонг, а также руководители отдельных научных направлений с российской и вьетнамской стороны, которые участвовали в экспедиции. Подвели итоги научного семинара директор ТИБОХ ДВО РАН д.х.н. П.С. Дмитренко и директор Института океанографии ВАНТ д-р Дао Виет Ха.

В ходе экспедиции ученые обеих стран собрали более 3600 образцов морских животных и глубинных отложений, а также провели исследования по биоразнообразию и поиску биологически активных веществ. Результаты еще обрабатываются и будут опубликованы в научных журналах

6 апреля 2023 г. в Ханое состоялось подписание обновленного Соглашения о научном сотрудничестве между Российской академией наук (РАН) и Вьетнамской академией наук

и технологий (ВАНТ). Новое соглашение подписано в ходе 24-го заседания Межправительственной Российско-Вьетнамской комиссии по торгово-экономическому и научно-техническому сотрудничеству. Соглашение предусматривает организацию совместных морских научных экспедиций, в том числе в исключительной экономической зоне Вьетнама, проведение совместных научных мероприятий двух академий и реализацию программ международной академической мобильности.

В 2023 г. выполнялись работы по 6 совместным программам и проектам. После перерыва во время пандемии увеличилось количество взаимных визитов, но оно пока не вернулось к показателям до 2020 г. В 2024 г. оставались в силе 34 соглашения между научными учреждениями ДВО РАН и ВАНТ. Несмотря на изменение количества соглашений, процентное распределение по областям наук осталось таким же, как и в 2014 г.

В 2024 г. успешно функционировали 7 совместных лабораторий и центров ДВО РАН и ВАНТ в области морской биологии и экологии, биохимии, исследования и разведки ключевых георесурсов, морских геологических и геофизических исследований, биологии, экологии и генетики наземных и водных экосистем.

В настоящее время приоритетными направлениями для сотрудничества ученых ДВО РАН и ВАНТ являются следующие:

1. Океанологические характеристики и экологическое состояние прибрежных вод Вьетнама.
2. Морская микробиология, морская биохимия, морская экология, морское биоразнообразие.
3. Наземные и морские экосистемы.
4. Разномасштабные процессы атмосферы, гидросферы, литосферы и их взаимодействие.
5. Геология, геофизика и газогеохимия шельфовой зоны Вьетнама.
6. Разработка и создание средств исследования геосферных процессов.
7. Изучение состояния и динамики изменений береговых комплексов юга Тихоокеанской России и Вьетнама и проблемы прибрежно-морского природопользования.
8. Лазерная физика и оптоэлектроника.
9. Разработка методов управления природопользованием в крупных трансграничных бассейнах Восточной Азии.

2 сентября 2024 г. во Владивостоке состоялось заседание Координационного центра развития научно-технического сотрудничества ДВО РАН и ВАНТ, было подписано дополнение к договору 2020 г. с изменением состава Консультативно-научного совета (рис. 5). На 2025 г. запланировано подписание Дорожной карты о сотрудничестве в области морских научных исследований между ДВО РАН и ВАНТ на 2026–2035 гг.

В 2025 г. исполняется 75 лет дипломатическим связям России и Вьетнама (30 января 1950 г.), отмечаются 50-летие освобождения юга Вьетнама и воссоединения страны (30 апреля 1975 г.), 80-летие Победы в Великой Отечественной войне (9 мая 1945 г.), 80-летие провозглашения независимости Вьетнама (2 сентября 1945 г.). Заложенный дальневосточными и вьетнамскими учеными прочный фундамент дружественных отношений с успехом выдержал испытания и трудности, возникавшие в сложных геополитических условиях. Совместными усилиями были найдены эффективно работающие формы взаимовыгодного научно-технического и дружественного сотрудничества между учеными ДВО РАН и ВАНТ. В последнее время отношения между двумя странами получили новый импульс развития, особенно после государственного визита во Вьетнам президента России Владимира Владимировича Путина в июне 2024 г., когда главы наших государств выразили обоюдный настрой на поступательное наращивание российско-вьетнамского многопланового сотрудничества, основанного на многолетних традициях дружбы и взаимного уважения. Оба президента признали важным углубление диалогового партнерства между Россией и АСЕАН. Подтверждена взаимная заинтересованность двух государств в расширении взаимодействия в научно-технической, технологической, образовательной и гуманитарной сферах. Реализация договоренностей, достигнутых по итогам недавних переговоров президентов наших стран, будет способствовать дальнейшему наращиванию взаимовыгодного двустороннего сотрудничества на благо народов России и Вьетнама, в интересах укрепления мира, безопасности и стабильности в Азиатско-Тихоокеанском регионе.



Рис. 5. Заседание Координационного центра развития научно-технического сотрудничества ДВО РАН и ВАНТ. 02.09.2024, Владивосток, Россия

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Васильева Е.А., Юрченко А. Н. Экспедиция № 63 в Филиппинское и Южно-Китайское моря на НИС «Академик Опарин» (апрель–июнь 2021 г.) // Вестн. ДВО РАН. 2022. № 1. С. 140–145.
2. Власова Г.А. История сотрудничества Тихоокеанского океанологического института с научными организациями Вьетнама // Российско-вьетнамские океанологические исследования в Южно-Китайском море. Владивосток: ТОИ, 2020. С. 11–52. URL: <https://www.poi.dvo.ru/ru/node/1564> (дата обращения: 29.11.2024).
3. Гаврилов Г.М. Результаты рыбохозяйственных исследований ТИНРО в экономических зонах Вьетнама, Камбоджи и прилегающих водах Южно-Китайского моря // Труды ВНИРО. 2010. № 149. С. 318–350. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-rybohozyaystvennyh-issledovaniy-tinro-v-ekonomicheskikh-zonah-vietnama-kambodzi-i-prilegayuschih-vodah-yuzhno-kitayskogo> (дата обращения: 29.11.2024).
4. Даутова Т.Н. Морские биологические исследования ННЦМБ ДВО РАН и ВАНТ: долговременное сотрудничество и новые перспективы // Вестн. ДВО РАН. 2020. № 2. С. 19–27.
5. Евсеев Г.А. Советско-вьетнамский симпозиум по морской биологии // Биология моря. 1984. № 6. С. 59–60.
6. Кудрявцев В.Ю. Сотрудничество СССР и СРВ в сфере науки (1976–1983 гг.) // Известия Восточного института. 2023. № 3 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotrudnichestvo-sssr-i-srv-v-sfere-nauki-1976-1983-gg> (дата обращения: 29.11.2024).
7. Российско-вьетнамские океанологические исследования в Южно-Китайском море / Кол. авторов; гл. ред. В.Б. Лобанов. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2020. 334 с.
8. Сидоренко А.В. Плодотворное научное сотрудничество (20 лет соглашения о сотрудничестве советских и вьетнамских ученых) // Вестник АН СССР. 1981. № 12. С. 82–89.
9. Снытко В.А., Тупоногов В.Н., Колпаков Н.В. Вклад ученых ТИНРО-центра в изучение донных и придонных рыб // Известия ТИНРО. 2005. № 141. С. 173–208. (дата обращения: 29.11.2024). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vklad-uchenyh-tinro-tsentra-v-izuchenie-donnyh-i-pridonnyh-ryb>
10. Советский Союз – Вьетнам. Документы и материалы. М.: Политиздат, 1982. 656 с.
11. Шакиров Р.Б., Ли Н.С., Обжиров А.И., Валитов М.Г., Съедин В.Т., Телегин Ю.А., Прошкина З.Н., Окулов А.К., Стороженко А.В., Иванов М.В., Швалов Д.А., Легкодимов А.А., Еськова А.И.,

Липинская Н.А., Бовсун М.А., Максеев Д.С., Калгин В.Ю., Якимов Т.С., Тхань Н.Ч., Ань Л.Д. Комплексная российско-вьетнамская геолого-геофизическая и океанографическая экспедиция в Южно-Китайское море (НИС «Академик М.А. Лаврентьев», рейс 88, 2019 г.) // Вестн. ДВО РАН. 2020. № 3. С. 138–152.

12. Юрченко Е.А., Маляренко Т.В. Совместная Российско-вьетнамская экспедиция № 49 в Южно-Китайском море на НИС «Академик Опарин» (ноябрь 2016 – январь 2017 г.) // Вестн. ДВО РАН. 2017. № 4. С. 154–158.

13. Юрченко Е.А., Юрченко А.Н. Совместная российско-вьетнамская экспедиция № 50 в Южно-Китайском море на НИС «Академик Опарин» (июнь–август 2018 г.) // Вестн. ДВО РАН. 2019. № 5. С. 153–157.

14. Юрченко Е.А., Юрченко А.Н., Аминин Д.Л. Морские экспедиции ТИБОХ ДВО РАН в Южно-Китайское море (2004–2018 гг.) // Вестн. ДВО РАН. 2019. № 5. С. 149–152.

REFERENCES

1. Vasilyeva E.A., Yurchenko A.N. Expedition No. 63 to the Philippine and South China Seas on the research vessel “Akademik Oparin” (April–June, 2021). *Vestnik of the FEB RAS*. 2022;(1):140–145. (In Russ.).

2. Vlasova G.A. History of cooperation between the Pacific Oceanological Institute and scientific organizations of Vietnam. Russian-Vietnamese oceanological research in the South China Sea. Vladivostok: POI; 2020:11–52. (In Russ.). URL: <https://www.poi.dvo.ru/ru/node/1564> (date of application: November 29, 2024).

3. Gavrilov G.M. Results of fisheries research of TINRO in the economic zones of Vietnam, Cambodia and adjacent waters of the South China Sea. *Proceedings of VNIRO*. 2010;(149):318–350. (In Russ.).

4. Dautova T.N. Marine biological research of the NSCMB FEB RAS and VAST: long-term cooperation and new prospects. *Vestnik of the FEB RAS*. 2020;(2):19–27. (In Russ.).

5. Evseev G.A. Soviet-Vietnamese symposium on marine biology. *Russian Journal of Marine Biology* 1984;(6):59–60. (In Russ.).

6. Kudryavtsev V.Yu. Cooperation of the USSR and the SRV in the field of science (1976–1983). *Bulletin of the Eastern Institute*. 2023;3(59). (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotrudnichestvo-sssr-i-srv-v-sfere-nauki-1976-1983-gg> (date of application: November 29, 2024).

7. Lobanov V.B. (Ed.-in-chief). Russian-Vietnamese oceanographic research in the South China Sea. Vladivostok: Pacific Oceanological Institute FEB RAS; 2020. 334 p. (In Russ.).

8. Sidorenko A.V. Fruitful scientific cooperation (20 years of the agreement on cooperation between Soviet and Vietnamese scientists). *Bulletin of the USSR Academy of Sciences*. 1981;(12):82–89. (In Russ.).

9. Snytko V.A., Tuponogov V.N., Kolpakov N.V. Contribution of TINRO-Center scientists to the study of bottom and demersal fishes. *TINRO News*. 2005;(141):173–208. (In Russ.).

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vklad-uchenyh-tinro-tsentra-v-izuchenie-donnyh-i-pridonnyh-ryb> (date of application: November 29, 2024).

10. Soviet Union – Vietnam. Documents and materials. Moscow: Politizdat; 1982. 656 p. (In Russ.).

11. Shakirov R.B., Lee N.S., Obzhairov A.I., Valitov M.G., Syedin V.T., Telegin Yu.A., Proshkina Z.N., Okulov A.K., Storozhenko A.V., Ivanov M.V., Shvalov D.A., Legkodimov A.A., Eskova A.I., Lipinskaya N.A., Bovsun M.A., Makseev D.S., Kalgin V.Yu., Yakimov T.S., Thanh N.Ch., Anh L.D. Integrated Russian-Vietnamese geological, geophysical and oceanographic expedition to the South China Sea (R/V “Akademik M.A. Lavrentiev”, cruise 88, 2019). *Vestnik of the FEB RAS*. 2020;(3):138–152. (In Russ.).

12. Yurchenko E.A., Maliarenko T.V. Joint Russian-Vietnamese Expedition No. 49 in the South China Sea on the R/V “Akademik Oparin” (November, 2016 – January, 2017). *Vestnik of the FEB RAS*. 2017;(4):154–158. (In Russ.).

13. Yurchenko E.A., Yurchenko A.N. Joint Russian-Vietnamese Expedition No. 50 in the South China Sea on the R/V “Akademik Oparin” (June–August, 2018). *Vestnik of the FEB RAS*. 2019;(5):153–157. (In Russ.).

14. Yurchenko E.A., Yurchenko A.N., Aminin D.L. Marine expeditions of the Pacific Oceanological Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS to the South China Sea (2004–2018). *Vestnik of the FEB RAS*. 2019;(5):149–152. (In Russ.).

Научная статья
УДК 947.901
DOI: 10.31857/S0869769825020142
EDN: GEBZCW

От ботаники до геологии: русское изучение северо-востока Китая (1946–1954)

А.А. Хисамутдинов

Амир Александрович Хисамутдинов
доктор исторических наук, заведующий отделом
Центральная научная библиотека ДВО РАН, Владивосток, Россия
khisamut@yahoo.com
<http://orcid.org/0000-0002-8228-7513>

Аннотация. Статья посвящена деятельности Харбинского общества естествоиспытателей и этнографов (ХОЕЭ). Оно было основано в 1946 г. и зарегистрировано в Обществе советских граждан в Харбине. Его деятелями стали последние русские исследователи-эмигранты в Китае: Б.В. Скворцов, А.Г. Малявкин, В.Н. Алин, И.Г. и А.И. Барановы, В.И. Кузьмин, Г.И. Разжигаев, В.С. Стариков, А.М. Смирнов и др., внесшие большой вклад в изучение северо-востока Китая. Их исследовательские результаты публиковались в «Записках Харбинского общества естествоиспытателей и этнографов» (Харбин, 1946–1954, 14 вып.). ХОЕЭ делилось на секции: ботаника, зоология, сельское хозяйство, историко-этнографическая и геология. Организация поддерживала научные связи с Дальневосточным филиалом АН СССР. Для подготовки статьи использованы коллекции Гавайского университета и Музея русской культуры в Сан-Франциско, а также литература, выявленная в других российских и иностранных коллекциях, включая частные.

Ключевые слова: русская наука в Китае, русское востоковедение в Китае, русские в Китае, русская печать в Китае

Для цитирования: Хисамутдинов А.А. От ботаники до геологии: русское изучение северо-востока Китая (1946–1954) // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 2. С. 186–199.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020142>

Благодарности. Автор благодарит за помощь заместителя председателя Музея русской культуры (Сан-Франциско, США) Ива Франкьена (Yves Franquien) и русского библиографа Гавайского университета (Гонолулу, США) Патрицию Полански (Patricia Polansky).

From botany to geology: Russian study of northeast China (1946–1954)

A.A. Khisamutdinov

Amir A. Khisamutdinov

Doctor of Sciences in History, Head of the Research Department

Central Scientific Library, FEB RAS, Vladivostok, Russia

khisamut@yahoo.com

<http://orcid.org/0000-0002-8228-7513>

Abstract. The article is devoted to the activities of the Harbin Society of Naturalists and Ethnographers (HOEE, founded in 1946), which was registered with the Society of Soviet Citizens in Harbin and its leaders, who became the last Russian emigrant researchers in China (B.V. Skvortsov, A.G. Malyavkin, V.N. Alin, I.G. and A.I. Baranov, V.I. Kuzmin, G.I. Razzhigaev, V.S. Starikov, A.M. Smirnov, and others), who made a great contribution to the study of northeast China. Their research results were published in the “Notes of the Harbin Society of Naturalists and Ethnographers” (Harbin, 1946–1954. 14 vol.). The HOEE was divided into sections: botany, zoology, agriculture, historical and ethnographic and geology. The organization maintained scientific ties with the Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences. The collection of the University of Hawaii and the Museum of Russian Culture in San Francisco, as well as literature found in other Russian and foreign collections, including private collections, was used to prepare the article.

Keywords: Russian science in China, Russian Oriental studies in China, Russians in China, Russian press in China

For citation: Khisamutdinov A.A. From botany to geology: Russian study of northeast China (1946–1954). *Vestnik of the FEB RAS.* 2025;(2): 186–199. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825020142>

Acknowledgments. The author thanks for assistance the Deputy Chairman of the Museum of Russian Culture (San Francisco, USA) Yves Franquien and the Russian bibliographer of the University of Hawaii (Honolulu, USA) Patricia Polansky.

Введение

Русские эмигранты с первых лет своего пребывания в Китае смогли проявить себя в научных исследованиях, создавая научно-просветительские организации и изучая местность, которая стала их второй родиной. Эта работа оказалась невозможна с японской оккупацией северо-востока Китая и резким изменением политической обстановки в стране. Только после окончания Второй мировой войны русские жители Харбина смогли основать Харбинское общество естествоиспытателей и этнографов (ХОЕЭ), ставшее последней русской научной организацией в Китае.

К сожалению, об этом Обществе имеется немного информации. Вероятно, это связано с тем, что основные источники по данной теме сосредоточены в зарубежных коллекциях. Частично о публикациях этой организации сообщает американский справочник [1, р. 241–247]. В книжном собрании Гавайского университета в Гонолулу хранятся редчайшие издания по русским исследованиям в Китае [2]. Также для подготовки статьи использованы документы, выявленные в Музее русской культуры (МРК) в Сан-Франциско, литература и документы из других российских и иностранных коллекций, включая частные.

Основание последнего русского научного общества в Китае. Исследования русских эмигрантов в Китае прошли несколько этапов. Вначале это было Общество изучения

Маньчжурского края (ОИМК), члены которого основали Харбинский краеведческий музей и проводили исследования в рамках нескольких секций – археологии и этнографии, геологии и др. Первая реорганизация произошла в начале 1929 г., когда китайские власти переименовали ОИМК в Общество изучения культурного развития Особого района восточных провинций (ОРВП), а музей вместе с русскими исследователями передал Департаменту народного образования ОРВП. Он вошел в состав Научно-исследовательского института Да-Лу, получив новое название – Музей Северной Маньжурии.

Старшее поколение эмигрантов помогло молодежи создать несколько научных общественных формирований, которые продолжили изучение северо-востока Китая, но их деятельность была короткой [3, с. 309–312]: японцы крайне ревниво относились к русским исследованиям. Когда в 1937 г. в Харбине возникла Биологическая комиссия, она начала свою работу в виде закрытого кружка любителей природы. Основное ядро составляли сотрудники Харбинского краеведческого музея, проводя заседания на частных квартирах. Несмотря на эти конспиративные условия, комиссия смогла расширить рамки исследований, постепенно превращаясь в полусекретное краеведческое объединение.

Поражение Японии привело к тому, что руководство Харбинским краеведческим музеем вернулось к русским, которые взяли на себя ответственность по сохранению уникальных коллекций, собранных ими. Тогда русские жители Харбина с огромным энтузиазмом встречали Советскую армию и радовались поражению империалистической Японии. Немало молодых харбинцев участвовали в тех событиях: одни были переводчиками, а другие добровольцами в военных действиях против японцев.

Некоторое время музей подчинялся Харбинскому политехническому институту. В помещении музея помимо его сотрудников стали собираться русские преподаватели харбинских учебных заведений, которые учредили Комиссию по делам Харбинского музея (2 сентября 1945 – 22 апреля 1946). Они сразу же решили издавать «Известия Харбинского краеведческого музея». В первом номере Б.В. Скворцов напечатал статью «К истории Общества изучения Маньчжурского края и созданного им музея». Всего вышло восемь номеров «Известий».

16 марта 1946 г. члены Биологической комиссии собрались на учредительное собрание новой организации и утвердили проект устава Харбинского общества естествоиспытателей и этнографов, которое зарегистрировали в Обществе советских граждан (Харбин, Пристань, Коммерческая улица, № 7). Инициаторы подчеркнули, что их организация «является советским научным обществом, объединяющим всех лиц, работающих в Маньчжурии в области естествознания, этнографии и вообще изучения местного края» [4]. Члены нового общества разделились по интересам на секции: ботаника, зоология, сельскохозяйственная секция. В историко-этнографическую секцию вошли этнографы, археологи, востоковеды и краеведы.

На 10 мая 1946 г. в Обществе зарегистрировались 67 человек, имевшие советское гражданство. Председателем избрали известного харбинского ученого Бориса Васильевича Скворцова, выпускника естественного отделения физико-математического факультета Петроградского университета (1917). Он преподавал естественные науки в Харбинском коммерческом училище и во 2-й железнодорожной школе, занимался исследованиями лекарственных растений. В прошлом Скворцов являлся председателем Харбинского сельскохозяйственного общества и ученым секретарем ОИМК. Многие годы он редактировал журнал «Сельское хозяйство в Северной Маньжурии».

Секретарем по научной части общества избрали Андрея Ипполитовича Баранова, сына известного китаеведа И.Г. Баранова. Он окончил Юридический факультет в Харбине и свободно владел китайским языком. Под влиянием Т.П. Гордеева и Б.В. Скворцова он начал изучать естественные науки и закончил отделение ботаники Пекинского университета, специализируясь на систематике растений и флоре Дальнего Востока. После окончания учебы Андрей стал научным сотрудником Харбинского краеведческого музея (до 1950).

Большую роль в Обществе играл член правления Василий Николаевич Алин, окончивший в 1923 г. экстерном Харбинское реальное училище. Он увлекался зоологией (энтомологией) и этнографией, публиковал статьи в «Известиях Харбинского краевого музея». Свои сборы бабочек Алин отправлял в США.

Секретарем по административной и хозяйственной части стал директор Харбинского музея Владимир Иванович Кузьмин.

Помимо секционной работы одной из основных задач Общества было издание «Записок», которые посвящались исследованиям северо-востока Китая. Ответственность за это направление возложили на казначея и заведующего издательством Анатолия Гавриловича Малявкина, выпускника восточно-экономического отделения Юридического факультета в Харбине. Он был сотрудником Харбинского краеведческого музея и переводчиком в Торгпредстве СССР в Харбине. Малявкин распространял публикации через магазин «Наука» (Харбин, Новый город, Большой проспект, № 75). В основном Общество существовало на пожертвования и продажи изданий. При этом его члены находили возможность финансово поддерживать краеведческий музей.

Вероятно, одной из проблем ХОЕЭ было то, что его членами могли быть только лица, имевшие советское гражданство. Например, известные исследователи Т.П. Гордеев или В.В. Поносов не числились в рядах Общества.

Пожалуй, **Секция ботаники** была основной в Обществе. Ее работой руководил Борис Васильевич Скворцов, составлявший в то время «Атлас деревьев и кустарников Северной Маньчжурии». Члены секции изучали систематику и биологию маньчжурских растений, регулярно совершая экскурсии и экспедиции, собирая гербарии. Андрей Баранов занимался сборами растений и флоры в окрестностях Харбина. Молодой ученый взял на себя ответственность по составлению общего обзора результатов изучения флоры за последние десять лет, связав ее с деятельностью Биологической комиссии (1937–1947). Также Баранов-младший со своим учителем исследовали растительность Малого Хингана (район Ганюаньхэ). В.И. Кузьмин занимался обработкой второй части своей работы о классе слизевиков *Mucousetes* в Маньчжурии.

Второй выпуск «Записок» (составитель и редактор А.И. Баранов) заполнили статьи ботаников. В предисловии отмечалось, что номер «посвящается полностью низшим растениям. Эти последние не только в Маньчжурии, но во всей Восточной Азии до сих пор еще почти не исследованы в противоположность высшим растениям, которые изучены значительно более полно. Поэтому, печатая две статьи членов нашего О-ва, Б.В. Скворцова и В.И. Кузьмина, помещенные в настоящем выпуске „Записок» и посвященные низшим споровым нашего края, мы надеемся, что они представят интерес для специалистов, тем более что в каждой из них кроме диагнозов имеется и атлас оригинальных рисунков, сделанных авторами с натуры» [5, с. 1].

Председатель секции Скворцов представил статью по описанию новых и малоизвестных видов водорослей, флагеллант и водяных грибов, найденных в 1931–1945 гг. Основное количество новых видов было выявлено в пределах Маньчжурии, меньшая часть состояла из видов, присланных автору для изучения из различных частей света. Скворцов посетовал, что несколько его рукописей погибли в Харбинском музее, а часть сгорела во время войны. В этой работе Б.В. Скворцов дал описание 187 видов растений, из которых 114 относились к совершенно новым видам.

Ботаник В.И. Кузьмин напечатал статью «Описание некоторых маньчжурских *Mucetouzoa*», поделившись своими находками, собранными в Харбине в 1939–1941 гг. Очерк содержал описания 20 видов и разновидностей слизевиков, включая четыре новые формы.

Пятый выпуск «Записок» харбинские ботаники посвятили памяти академика В.Л. Комарова (составитель и редактор В.И. Кузьмин). Б.В. Скворцов поделился воспоминаниями о том времени, когда в 1914 г. он был учеником Комарова в университете. Он писал: «Научные работы В.Л. Комарова, большинство которых связано с Маньчжурией, велики и неопенимы. Организованное в 1922 г. О-во Изучения Маньчжурского края в г. Харбине, ставившее своей целью всестороннее изучение Маньчжурии, сразу заинтересовало В.Л. Комарова широкой программой своей деятельности. Он с большим желанием взялся сотрудничать вместе с О-вом по дальнейшему изучению флоры и растительности Маньчжурии. Все сборы растений, которые делались членами О-ва и в частности автором настоящей заметки, дублировались и посылались Владимиру Леонтьевичу для изучения и определения, причем им был описан ряд еще неизвестных растений для этой части Азии» [6, с. 1].

В 1925 г. В.Л. Комарова избрали почетным членом ОИМК, а в 1926 г., находясь проездом в Харбине, он выступил в Обществе с докладом о его работах в Маньчжурии. Знакомясь в Харбинском музее с ботаническими коллекциями, он их подробно изучил, после чего дал рекомендации сотрудникам музея.

Благодаря инициативе Комарова ОИМК смогло завязать тесные связи с Дальневосточным филиалом АН СССР во Владивостоке и Горнотаежной станцией в г. Никольске-Уссурийском. Также Харбинский музей получил возможность книжного обмена с Главным Ботаническим садом и Академией наук СССР. Бесценной стала помощь В.Л. Комарова в составлении гербария флоры Северной Маньчжурии и определении названий растений, чем он значительно облегчил работу харбинцев по изучению новых гербарных сборов.

Издавая этот номер, ботаники решили более подробно описать «маньчжурский период» известного советского ученого, взяв за основу отчеты и статьи В.Л. Комарова. По ним составители попытались воссоздать картину исследований ученым дальневосточной флоры. Также был опубликован список видов, описанных Владимиром Леонтьевичем для Маньчжурии, который включал в себя 162 вида из общего числа около 200, описанных Комаровым для Маньчжурской флористической области.

В девятом выпуске (ответственный составитель-редактор Б.В. Скворцов), посвященном ботанике, публиковались статьи по биологии и систематике высших растений, а также частично описывалась растительность северо-востока Китая. Учитель ботаники А.Л. Кириллов напечатал статью «Из наблюдений над растительностью района станции Хандаохэцзы КЧЖД [Китайско-Чанчунская железная дорога] в Северной Маньчжурии». В предисловии автор отметил: «Три заметки по биологии, экологии и, отчасти, систематике растений этого района хотя и написаны автором в разное время, но они дополняют друг друга, и мы помещаем их вместе, предпосылая им общее введение. Первая представляет попытку обрисовать постепенный ход развития травянистых растений в указанном районе в первую половину весны. Здесь даны краткие экологические и морфологические характеристики и календарь цветения для 33 видов, относящихся большей частью к группе весенних эфемеров. Эти растения отличаются весьма кратким периодом развития, что в значительной степени затрудняет изучение их образа жизни. Оригинальная по замыслу, эта работа, могла быть выполнена автором только потому, что он в течение ряда лет, живя на станции Хандаохэцзы, мог производить регулярные наблюдения над этими первенцами маньчжурской весны. Статья иллюстрирована списком весенних растений и сделанными с натуры 8 таблицами в красках. Вторая часть посвящена срокам цветения и экологии представителей семейства лютиковых, обнаруженных в районе указанной станции. Третья часть знакомит с кустарниками изучаемой местности» [7, с. 1].

Деятели Общества отдельно выделили **Секцию зоологии**, которой руководил зоолог и энтомолог Василий Николаевич Алин. В течение отчетного периода члены секции провели ряд одиночных и групповых экскурсий, во время которых производили сборы зоологических коллекций. Большой материал собран по энтомологии (В.Н. Алин – «Биология бабочек Маньчжурии»), а также продолжилось составление коллекции птиц. Члены секции прорабатывали и другие темы: П.А. Павлов – «Промысловые рыбы Маньчжурии».

Деятели секции зоологии собрали статьи для седьмого выпуска «Записок» Общества. Ответственный редактор выпуска В.Н. Алин опубликовал статью «К биологии бабочек в Маньчжурии». В предисловии молодой ученый отметил: «Я пытался запечатлеть на негативах некоторые интересные моменты их жизни. Прилагаемая серия фотографий иллюстрирует жизненный цикл *P. xuthus* L., который широко распространен в пределах Маньчжурии. Мои наблюдения над жизнью этой бабочки, а также приводимые фотографии были сделаны в городе Харбине» [8, с. 5].

А.Ю. Панневиц написал статью «Материалы к изучению колонка в Сунцзянской провинции Северной Маньчжурии», основанную на коллекции Харбинского краеведческого музея, сведениях и сборах, полученных от Б.В. Скворцова, а также на материалах архива А.Д. Воейкова, хранящихся в делах Общества.

23 марта 1947 г. в помещении конторы Питомника КЧЖД в г. Харбине состоялось организационное собрание **Сельскохозяйственной секции**, на котором присутствовали свыше 30 человек. Председателем секции избрали заведующего питомником Константина Ивановича Дужего (родился в 1883 г.). В правление секции вошли агроном В.К. Рерих (брат известного художника и путешественника), агроном И.М. Суриков, агроном Т.И. Гусаров, агроном С.Г. Латта, М.В. Герасимов, А.Т. Гусев, П.И. Квитко, В.М. Виталисов, А.Л. Каньянц, Н.Н. Прикащиков и Е.А. Уласовец. Наиболее интересными разработками занимались

В.И. Кузьмин («Характеристика маньчжурских медоносов» и «Дикорастущие лекарственные растения»), Б.В. Скворцов («Растительные ресурсы Маньчжурии») и В.С. Стариков («Использование дикорастущих пищевых растений»).

В целях популяризации всех видов сельского хозяйства секция устраивала различные выставки, на которых присутствовал почти весь Харбин.

Секция поручила В.С. Старикову составить шестой выпуск «Записок», посвященный сельскому хозяйству. «Настоящий сборник, – писала редколлегия, – содержит ряд очерков и статей, напоминающих об этих фактах. Толчком к его изданию послужила “Выставка цветов, плодов и овощей”, устроенная Обществом граждан СССР в Харбине 6–12 сентября 1946 г. Доклады, прочитанные разными лицами на Выставке, составляют основу сборника. Однако сборник имеет и другую цель. Один из лозунгов Выставки гласил: „Наша Выставка является призывом к дальнейшей работе”» [9, с. 1]

Сборник отображал всю гамму интересов членов секции: Н.Н. Прикашиков – «К истории русского садоводства в Маньчжурии», П.И. Квитко – «О крупноплодных яблонях в городе Харбине», Б.В. Скворцов – «Культура американского мускатного винограда в городе Харбине», «К изучению влияния холодной зимы 1944–45 гг. на морозостойкость плодовых, ягодных и др. растений города Харбина и его окрестностей» и «К апробации баклажан, разводимых в Маньчжурии», В.М. Виталисов – «Роль русских в развитии садоводства и овощеводства в Маньчжурии», А.Л. Кананянц – «Новая груша для Харбина», В.Н. Алин – «Насекомые-вредители садов, полей и огородов в Маньчжурии и методы борьбы с ними», В.И. Кузьмин – «Декоративные кустарники и их роль в саду», А.Т. Гусев – «Рынок лекарственных продуктов в городе Харбине и возможность культуры и сбора лекарственных растений», В.И. Кузьмин и Б.В. Скворцов – «Лекарственные растения отечественной, народной и научной медицины в Маньчжурии и их применение».

Большую роль в ХОЕЭ сыграла **Историко-этнографическая секция**, которую возглавил известный китаевед Ипполит Гаврилович Баранов. Дейтельными членами секции были востоковед и переводчик Георгий Георгиевич Авенариус, Виктор Семенович Макаров, Анатолий Гаврилович Малявкин, Василий Николаевич Алин, Глеб Иванович Разжигаев и др. Все они свободно владели китайским языком.

18 мая 1947 г. состоялась организация **Секции геологии, палеонтологии и физической географии**, которую возглавлял горный инженер Андрей Максимилианович (Маркович) Смирнов, интересующийся палеонтологией. После окончания в 1930 г. Ленинградского горного института он стал начальником Арбуйской партии Геологоразведочного института цветных металлов. В том же году Смирнов уехал в Харбин, где занялся преподавательской деятельностью, потом работал геологом. Последнее место работы – геолог горного отдела компании Bryner & Co (1937–1941), затем трудился на Мулинских угольных копях.

Четвертый выпуск «Записок» ХОЕЭ составила статья А.М. Смирнова «Мезозойские эффузивно-туфогенные комплексы в стратиграфии ангарских отложений Восточной Азии». Публикация подготовлена по результатам изучения стратиграфии Мулинских угленосных отложений Северной Маньчжурии.

Один из учеников А.М. Смирнова Борис Павлович Момот окончил горный факультет ХПИ, репатрировался в СССР, где стал кандидатом геолого-минералогических наук.

Члены ХОЕЭ уделяли внимание и подрастающему поколению. 9 мая 1947 г. в помещении Клуба молодежи Саманного и Корпусного городков состоялась однодневная выставка по краеведению, устроенная силами краеведов. На выставке были продемонстрированы результаты их работ, достигнутые за последний год. Среди выставленных экспонатов обращали на себя внимание следующие: коллекция китайских монет, собранная Борисом Павловичем Момотом, цветущие весенние растения и препарированные тушки местных птиц, добытые молодым зоологом А.Б. Скворцовым.

10 мая 1947 г. состоялось общее собрание членов ХОЕЭ, на котором с отчетным докладом о деятельности Общества выступил секретарь А.И. Баранов, а с финансовым отчетом казначей Общества А.Г. Малявкин. Затем состоялись перевыборы Правления Общества, в которое были избраны: Б.В. Скворцов (председатель), А.Г. Малявкин (вице-председатель), В.Н. Алин (казначей), В.С. Стариков (секретарь), А.Ю. Панневиц (2-й секретарь), И.Г. Баранов и А.М. Смирнов.

Тогда все члены общества с большим энтузиазмом смотрели в будущее: Общество с завидной регулярностью издавало «Записки», совершались экспедиции и экскурсии, устраивались выставки, открывались курсы, читались доклады и лекции.

Закрытие Общества и судьбы его деятелей. К сожалению, массовая репатриация и эмиграция в другие страны привели к закрытию Общества. После Б.В. Скворцова вторым председателем стал А.Г. Малявкин. После его отъезда на целину Общество возглавил И.Г. Баранов, который вспоминал: «Но у нас «по недоразумению» всё имущество о[бщест]ва было конфисковано, после жесточайшего обыска, сотрудниками д[епартамен]та общ[ественной] безо[п]асности в Харбине. Китайцы потом пришли к соглашению с Совет[ским] генер[альным] консульством в Харбине, что всё это произошло “по недоразумению” и что организация не была зарегистрирована в ДОБе [Департамент общественной безопасности. – А.Х.]. Но организация эта была в числе отделов (культурн[ый] отдел) об[ществ]а совграждан и по приказу консульского сотрудника организация получала субсидию на издание “Записок” от О[бществ]а граждан. Всю эту кашу заварил, как можно догадаться, некий сотрудник Дила (департамент по иностр[анным] делам) в Харбине, русофоб, уволенный потом за свои художества со службы и, кажется, исчезнувший из того города» [10].

Члены Общества были не только обескуражены этим событием. Для них это решение китайских властей стало огромным разочарованием, так как они с воодушевлением занимались исследованиями в Китае, предполагая, что стране будут важны их достижения. Неожиданный налет китайских полицейских на Общество и временное задержание пятых членов правления заставило по-другому посмотреть на их будущее в Китае. Китайцы конфисковали весь архив с отчетами и научными результатами. Также исчезли материалы, подготовленные для следующих «Записок». «Вернули нам только часть личных книг, – писал И.Г. Баранов. – После этого “недоразумения” члены общества уже больше не собирались. В особенности пострадали Б.В. Скворцов, В.Н. Алин и я. Это одно из самых мрачных воспоминаний о жизни в Китае. А между тем сами же китайцы ранее говорили, что регистрация не нужна» [10].

Закрытое китайскими властями в 1955 г. Общество естествоиспытателей и этнографов стало последним русским научным объединением. Позднее А.И. Баранов писал: «Русские краеведы первыми обследовали эту страну и положили краеугольный камень ее дальнейшего изучения. Они же первыми ознакомили научный мир в России и за границей с природой, географией, этнографией, историей и археологией Маньчжурии. В работах русских исследователей сохранились свидетельства о многих интересных особенностях природы и жизни в Маньчжурии, которые впоследствии были утрачены. Понятно, что это обстоятельство значительно повышает ценность русских трудов по маньчжуроведению для современной науки» [11, с. 138].

Часть бывших членов Общества предпочли репатрироваться в Советский Союз. Среди них был заведующий кафедрой китайского языка в ХПИ (1946–1955) Ипполит Гаврилович Баранов, опубликовавший в Китае более 150 работ. Живя в Алма-Ате, Баранов продолжил переписку с бывшими членами Общества.

Анатолий Гаврилович Малявкин также жил в Алма-Ате (с 1954), затем переехал в Новосибирск (с 1963). Научный сотрудник Института истории, филологии и философии Сибирского отделения АН СССР (с 1969) и доктор исторических наук скончался в 1994 г.

Репатрировался и А.М. Смирнов, ставший научным сотрудником геологического отдела Дальневосточного филиала АН СССР (с 1956). Он успешно защитил кандидатскую («Геологическое развитие и структурные особенности зоны сочленения Китайской платформы и Тихоокеанского складчатого пояса», 1960) и докторскую («Докембрий северо-запада Тихоокеанского подвижного пояса и его платформенного обрамления», 1972) диссертации. Андрей Максимилианович Смирнов скончался в 1984 г. во Владивостоке.

В 1955 г. репатрировался Владимир Сергеевич Стариков, став научным сотрудником Музея антропологии и этнографии (1955–1987) и защитив докторскую диссертацию «Современная материальная культура китайцев в Маньчжурии, ее истоки и развитие» (1976).

Проблемы, связанные с драматичным закрытием Общества, и политика невмешательства Советского консульства в Харбине заставили некоторых членов Общества уехать в другие страны. Перед отъездом в США Андрей Ипполитович Баранов поработал в Институте

лесного хозяйства и почвоведения при Академии наук КНР. Приехав в Америку, он стал сотрудником гербария Arnold Arboretum в университете Гарварда и в других научных центрах. Он опубликовал более 120 научных работ. А.И. Баранов скончался в 1987 г. в Бостоне.

В Бразилию уехали сразу трое деятелей Общества. Перед отъездом Борис Васильевич Скворцов поработал научным сотрудником Института леса при Академии наук КНР в Харбине (1950–1962), в последние годы в должности профессора (1958–1962). Затем он жил в Бразилии (с 1962), был сотрудником Ботанического института в Сан-Паулу. Он описал и опубликовал сведения о более 1000 видов жгутиковых водорослей. Скончался в 1980 г. в Сан-Паулу (Бразилия). В этом же городе жил Глеб Иванович Разжигаев, уехавший из Китая в Бразилию в 1957 г. вместе с семьей жены и умерший в 1994 г. В Бразилии окончилась жизнь и ближайшего помощника Скворцова Василия Николаевича Алина: он скончался в 1995 г. в возрасте 90 лет.

В статье использованы иллюстрации из Музея русской культуры в Сан-Франциско. Публикуются с разрешения правообладателя (см. Приложение).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bakich O. Harbin Russian imprints: bibliography as history, 1898–1961: Materials for a definitive bibliography. New York; Paris: Norman Ross Publishing Inc., 2002. China. 275 p.
2. Полански П. Русская печать в Азиатско-Тихоокеанском регионе = Russian Publications in the Asia-Pacific Region: Каталог собрания Библиотеки имени Гамильтона Гавайского университета. М.: Пашков дом, 2015. Ч. 1: 213 [2] с.: ил.
3. Хисамутдинова Н.В. Из Владивостока – в эмиграцию: судьбы дальневосточных профессоров // Вестник Кемеровского государственного университета. 2015. № 2/6 (62). С. 309–312.
4. Харбинское общество естествоиспытателей и этнографов // Записки Харбинского общества естествоиспытателей и этнографов. Харбин, 1946. № 1. С. 3.
5. Предисловие // Записки Харбинского общества естествоиспытателей и этнографов. Харбин, 1946. № 2 (Ботаника). С. [1].
6. От редакции // Записки Харбинского общества естествоиспытателей и этнографов. Харбин, 1946. № 5. Памяти В.Л. Комарова. С. [1].
7. Кирилов А.Л. Из наблюдений над растительностью района станции Хандаохэцзы КЧЖд в Северной Маньчжурии // Записки Харбинского общества естествоиспытателей и этнографов. Харбин, 1949. № 9 (Ботаника). 34 с.: ил.
8. Алин В.Н. К биологии бабочек в Маньчжурии // Записки Харбинского общества естествоиспытателей и этнографов. Харбин, 1947. № 7 (Зоология). С. 5–10.
9. Редколлегия. от редакции // Записки Харбинского общества естествоиспытателей и этнографов. Харбин, 1947. № 6. Сельское хозяйство. С. 1.
10. Архив Гродековского музея (Хабаровск). Письма И.Г. Баранова П.Е. Скачкову от 21 марта 1961.
11. Баранов А.И. Харбин как центр краеведческой работы русских в Маньчжурии // Политехник. Сидней, 1989. № 12. С. 138–140.

REFERENCES

1. Bakich O. Harbin Russian imprints: bibliography as history, 1898–1961: Materials for a definitive bibliography. New York; Paris: Norman Ross Publishing Inc.; 2002. China. 275 p.
2. Polansky P. Russkaya pechat' v Aziatsko-Tihookeanskom regione = Russian Publications in the Asia-Pacific Region: Katalog sobraniya Biblioteki imeni Gamil'tona Gavajskogo universiteta. Moscow: Pashkov dom; 2015. Ch. 1. 213, [2] P. (In Russ., in Engl.).
3. Hisamutdinova N.V. Iz Vladivostoka – v emigraciyu: sud'by dal'nevostochnyh professorov = [From Vladivostok to emigration: the fate of Far Eastern professors]. *Vestnik Kemerovskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2015;(2/6):309–312. (In Russ.).
4. Harbinskoe obshchestvo estestvoispytatelej i etnografov = [Harbin Society of Naturalists and Ethnographers]. *Zapiski Harbinskogo Obshchestva Estestvoispytatelej i Etnografov*. Harbin, 1946;(1):3. (In Russ.).

5. Predislovie = [Preface]. *Zapiski Harbinskogo Obshchestva Estestvoispytatelej i Etnografov*. Harbin, 1946;(2):[1]. (In Russ.).
6. Ot redakcii = [From the editor]. *Zapiski Harbinskogo Obshchestva Estestvoispytatelej i Etnografov*. Harbin. 1946;(5):[1]. (In Russ.).
7. Kirilov A.L. Iz nablyudenij nad rastitel'nost'yu rajona stancii Handaoheczy KCHzd v Severnoj Man'chzhurii = [From observations of the vegetation in the area of the Handaohezi station of the Chinese Railway in Northern Manchuria]. *Zapiski Harbinskogo Obshchestva Estestvoispytatelej i Etnografov*. Harbin, 1949;(9):34. (In Russ.).
8. Alin V.N. K biologii babochek v Man'chzhurii = [On the biology of butterflies in Manchuria]. *Zapiski Harbinskogo Obshchestva Estestvoispytatelej i Etnografov*. Harbin, 1947;7(Zoologiya):5–10. (In Russ.).
9. Redkollegiya. Ot redakcii = [From the editor]. *Zapiski Harbinskogo Obshchestva Estestvoispytatelej i Etnografov*. Harbin, 1947;(6):110. (In Russ.).
10. Arhiv Grodekovskogo muzeya (Habarovsk). Pis'ma I.G. Baranova P.E. Skachkovu ot 21 marta 1961 = [Letters from I.G. Baranova P.E. Skachkov dated March 21, 1961]. (In Russ.).
11. Baranov A.I. Harbin kak centr kraevedcheskoj raboty russkih v Man'chzhurii = [Harbin as a center for local history work of Russians in Manchuria]. *Politekhnik*. 1989;(12):138–140. (In Russ.).

ПРИЛОЖЕНИЕ



Орнитологическая коллекция Музея Общества изучения Маньчжурского края (ОИМК)



Б.П. Яковлев – основатель Естественно-исторического отдела Музея ОИМК. На витрине представлена главным образом Ботаническая коллекция Б.В. Скворцова. *Собрание Музея русской культуры в Сан-Франциско*



Естественно-научный отдел музея ОИМК. Раздел зоология и ботаника. *Собрание Музея русской культуры в Сан-Франциско*



Музей ОИМК. Отдел сельскохозяйственных продуктов Северной Маньчжурии. Стоит хранитель музея Г.Я. Маляровский. *Собрание Музея русской культуры в Сан-Франциско*



Русские исследователи в Харбине. Экскурсия в Кусяцунь на палеонтологические раскопки 17 октября 1937 г. Третий справа – геолог Э.Э. Анерт (см. о нем: Хисамутдинов А.А. Геолог Эдуард Анерт: «держаться возможно ближе к истине» // Вестник ДВО РАН. 2020. № 3)



Русские ученые в Харбине со своими учениками на экскурсии в храмы Ци-лэ-си и Конфуция 30 мая 1937 г. Пятый справа в темных очках – натуралист Т.П. Гордеев (см. о нем: Хисамутдинов А.А. Ботаник и педагог Тарас Петрович Гордеев // Вестник ДВО РАН. 2024. № 2). *Собрание Музея русской культуры в Сан-Франциско (коллекция В.Н. Жернакова)*



Русские научные сотрудники бывшего музея ОИМК. Сидят: слева – В.Н. Жернаков, справа – заведующий музеем В.В. Поносов. *Собрание Музея русской культуры в Сан-Франциско (коллекция В.Н. Жернакова)*



Перед входом в Музей Хэйлунцзянской провинции. Китайские и русские (в первом ряду – В.Н. Жернаков и Т.П. Гордеев) сотрудники. 1950–1960-е годы. *Собрание Музея русской культуры в Сан-Франциско (коллекция В.Н. Жернакова)*



Вход в Музей провинции Хэйлунцзян – государственный музей китайской провинции Хэйлунцзян. 2024 г. *Фото А.А. Хисамудинова*



Экспозиция отдела таксидермии Музея провинции Хэйлунцзян. 2024 г. Фото А.А. Хисамудинова



Экспозиция «Русские в Харбине». Музей провинции Хэйлунцзян. 2024 г. Фото А.А. Хисамудинова

*Подписка на журнал «Вестник Дальневосточного отделения РАН»
принимается с любого номера Агентством подписки
и доставки периодических изданий Урал-Пресс (www.ural-press.ru).
Подписной индекс 70193 в Каталоге периодических изданий «Газеты и журналы»
Урал-Пресс.*

*Полнотекстовые варианты статей можно найти в Интернете:
<http://elibrary.ru/issues.asp?id=2774>, <http://journals.rcsi.science/0869-7698/issue/view/>*

Ответственные за номер: Г.И. Долгих, В.В. Богатов
Над номером работали: В.С. Жердев, Л.А. Русова, Н.С. Мун, Г.А. Веренцова

Учредители
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Российская академия наук»
119991, г. Москва, Ленинский просп., д. 14
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Дальневосточное отделение
Российской академии наук»
690091, г. Владивосток, ул. Светланская, д. 50

Адрес редакции:
690091, Владивосток, ул. Светланская, 50, к. 51
Тел. +7(423)222-25-88
E-mail: vestnikdvo@hq.febras.ru
<https://vestdvoras.ru>

Издатель
Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Российская академия наук»
119991, Москва, Ленинский просп., д. 14
Отпечатано в ФГБУ «Издательство «Наука»
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Подписано к печати
Дата выхода в свет
Формат 70 × 108 1/16
Усл. печ. л.
Уч.-изд. л.
Тираж экз.
Заказ
Цена свободная