

РЕГИОНАЛЬНАЯ
ГЕОЛОГИЯ
И МЕТАЛЛОГЕНИЯ

REGIONAL
GEOLOGY
and METALLOGENY

Основан в 1993 году

Учредитель — Всероссийский научно-исследовательский геологический
институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ)

№ 94/2023

Главный редактор

О. В. ПЕТРОВ

Editor-in-Chief

Oleg PETROV

Санкт-Петербург ♦ Издательство ВСЕГЕИ

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. ПИ №ФС77-82858 от 31 марта 2022 г.

Главный редактор:

Петров О.В., член-корреспондент РАН (ВСЕГЕИ)

Editor-in-Chief:

Petrov O.V., Corr. Member of RAS (VSEGEI)

Заместитель главного редактора:

Толмачева Т.Ю., д-р геол.-минерал. наук (ВСЕГЕИ)

Deputy Editor-in-Chief:

Tolmacheva T.Yu., D.Sc. (VSEGEI)

Члены редколлегии:

Бискэ Г.С., д-р геол.-минерал. наук (СПбГУ)
Бортников Н.С., академик РАН (ИГЕМ РАН)
Вялов В.И., д-р геол.-минерал. наук (МГУ)
Егоров А.С., д-р геол.-минерал. наук (СПГУ)
Ермилова О.К. (ВГБ)
Жарков А.М., д-р геол.-минерал. наук (СПГУ)
Кашубин С.Н., д-р геол.-минерал. наук (ВСЕГЕИ)
Котов А.Б., член-корреспондент РАН (ИГГД РАН)
Ларичев А.И., канд. геол.-минерал. наук (ВСЕГЕИ)
Миронов Ю.Б., д-р геол.-минерал. наук (ВСЕГЕИ)
Молчанов А.В., д-р геол.-минерал. наук (ВСЕГЕИ)
Морозов А.Ф., канд. геол.-минерал. наук
Проскурнин В.Ф., д-р геол.-минерал. наук (ВСЕГЕИ)
Розанов А.Ю., академик РАН (ПИН РАН)
Сысоев А.П., д-р техн. наук (ВСЕГЕИ)
Ханчук А.И., академик РАН (ДВГИ ДВО РАН)
Худолей А.К., д-р геол.-минерал. наук (СПбГУ)
Зельтманн Р., д-р геол.-минерал. наук
(Музей естествознания, Лондон)
Шатов В.В., канд. геол.-минерал. наук (ВСЕГЕИ)

Editorial board:

Biske G.S., D.Sc. (SPbU)
Bortnikov N.S., Academician of RAS (IGEM RAS)
Vyalov V.I., D.Sc. (MSU)
Egorov A.S., D.Sc. (SPMU)
Ermilova O.K. (RGL)
Zharkov A.M., D.Sc. (SPMU)
Kashubin S.N., D.Sc. (VSEGEI)
Kotov A.B., Corr. Member of RAS (IPGG RAS)
Larichev A.I., PhD (VSEGEI)
Mironov Yu.B., D.Sc. (VSEGEI)
Molchanov A.V., D.Sc. (VSEGEI)
Morozov A.F., PhD
Proskurnin V.F., D.Sc. (VSEGEI)
Rosanov A.Yu., Academician of RAS (PIN RAS)
Sysoev A.P., D.Sc.Tech (VSEGEI)
Khanchuk A.I., Academician of RAS (FEGI FEB RAS)
Khudoley A.K., D.Sc. (SPbU)
Seltmann R., D.Sc.
(Natural History Museum, London)
Shatov V.V., PhD (VSEGEI)

Журнал включен в национальную библиографическую базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ) и перечень Высшей аттестационной комиссии (ВАК) по специальности 1.6 – Науки о Земле и окружающей среде.

Адрес электронной версии журнала:

на русском языке: <http://reggeomet.ru/>

на английском языке (аннотации): <http://www.vsegei.ru/en/rgm/content/index.php>

Журнал распространяется через подписной каталог ГК «Урал-Пресс». Подписной индекс 71938.

Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения учредителя журнала.

Редакция: *Смирнова А.М., Алексеева О.Н., Зотова Е.А., Смирнова А.С., Миндрик А.А., Степурко О.Е.*

Подписано в печать 06.06.2023. Дата выхода в свет 26.06.2023. Печ. л. 14,5. Уч.-изд. л. 15,67. Формат 60 × 84/8.

Тираж 100 экз. Заказ № 80000657. Цена свободная

Адрес редакции и издателя

ВСЕГЕИ. Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.
Журнал «Региональная геология и металлогения».
Тел. (812) 328-90-90 (доб. 23-23, 24-24)
E-mail: izdatel@vsegei.ru

Отпечатано

на Картографической фабрике ВСЕГЕИ. Средний пр., 72,
Санкт-Петербург, Россия, 199178.
Тел. (812) 328-91-90, 321-81-53. E-mail: karta@vsegei.ru
www.kf-vsegei.ru

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

REGIONAL GEOLOGY

О. В. Петров, А. И. Ларичев, В. А. Шахвердов,
А. В. Брылина, Ю. П. Кропачев, О. В. Дронь,
В. П. Исаев, А. Г. Кичигин, А. М. Лыгин

4

Основные результаты работ
по геологическому изучению процессов,
связанных с миграцией углеводородов
в акватории озера Байкал

O. V. Petrov, A. I. Larichev, V. A. Shakhverdov,
A. V. Brylina, Yu. P. Kropachev, O. V. Dron,
V. P. Isaev, A. G. Kichigin, A. M. Lygin

Main results of geological
studies of processes
related to the hydrocarbon migration
in the lake Baikal water area

Д. В. Рябчук, О. А. Ковалева, Д. В. Прищепенко,
А. Ю. Сергеев, Е. Н. Нестерова

29

Характеристика поверхностных донных
отложений озера Байкал
и современные седиментационные процессы

D. V. Ryabchuk, O. A. Kovaleva, D. V. Prishchepenکو,
A. Yu. Sergeev, E. N. Nesterova

Characteristics of bottom surface
sediments of lake Baikal
and recent sedimentation processes

В. А. Шахвердов, М. В. Шахвердова, О. В. Дронь
Проявления углеводородов как уникальные
геологические объекты на дне озера Байкал

48

V. A. Shakhverdov, M. V. Shakhverdova, O. V. Dron
Hydrocarbon shows as unique
geological targets on the lake Baikal floor

В. А. Шахвердов, В. Ф. Сапега

56

О первой находке элементной серы
в приповерхностных осадках гидратсодержащей
структуры Р-2 («Песчанка») озера Байкал

V. A. Shakhverdov, V. F. Sapega
On the first finding of elemental sulphur
in near-surface sediments of P-2 hydrate-bearing
structure («Peschanka») lake Baikal

А. Г. Кичигин, Е. В. Кучменко, Н. М. Соловьев

68

Применение информационных технологий
интернет-картографии для анализа и представления
результатов работ по геологическому изучению
опасных процессов, связанных с миграцией
углеводородов в центральной экологической зоне
Байкальской природной территории

A. G. Kichigin, E. V. Kuchmenko, N. M. Solovev
Use of information technologies
for internet mapping for the analysis and presentation
of results of geological studying
hazardous processes related
to the hydrocarbon migration in the central
environmental zone of the Baikal natural area

МЕТАЛЛОГЕНИЯ

METALLOGENY

О. В. Петров, В. В. Шатов, А. И. Ханчук,
В. В. Иванов, Ю. П. Змиевский, В. И. Шпикерман,
Е. О. Петров, В. В. Снежко, А. В. Шманяк,
А. В. Молчанов, В. О. Халенев, Н. В. Шатова,
Н. В. Родионов, Б. В. Беляцкий, С. А. Сергеев

75

О перспективах открытия новых
золото-медно-порфировых месторождений
Малмыжского типа на территории
Нижнего Приамурья (Дальний Восток, Россия)

O. V. Petrov, V. V. Shatov, A. I. Khanchuk,
V. V. Ivanov, Yu. P. Zmievskiy, V. I. Shpikerman,
E. O. Petrov, V. V. Snezhko, A. V. Shmanyak,
A. V. Molchanov, V. O. Khalenev, N. V. Shatova,
N. V. Rodionov, B. V. Belyatskiy, S. A. Sergeev

On the prospects for the discovery
of new Malmyzh-type
gold-copper-porphyry deposits
in the Lower Amur region (Far East, Russia)

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

BRIEF REPORTS

Состоялось открытие памятника Е. А. Козловскому

113

The opening of the monument to E. A. Kozlovskiy took place

УДК 552.578.2.061.33:553.98(282.256.341)
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_4-28

О. В. Петров, А. И. Ларичев, В. А. Шахвердов, А. В. Брылина, Ю. П. Кропачев,
О. В. Дронь (ВСЕГЕИ), В. П. Исаев, А. Г. Кичигин (ООО «Байкальский центр»),
А. М. Лыгин (Гидроспецгеология)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С МИГРАЦИЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ В АКВАТОРИИ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Дана общая оценка геологического строения впадины озера Байкал. Рассмотрены вопросы, связанные с методикой и основными результатами изучения процессов миграции углеводородов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории в период 2015–2020 гг. Получен обширный материал по геологическому строению верхней части разреза современных осадков, геохимическим, физико-химическим и другим особенностям придонной области озера. Составлен электронный атлас карт центральной экологической зоны Байкальской природной территории масштаба 1 : 1 000 000, электронный каталог проявлений УВ и зон их разгрузки. Показана высокая эффективность комплексирования различных геологических методов с целью выделения, изучения и мониторинга объектов природной миграции углеводородов.

Ключевые слова: озеро Байкал, углеводороды, методы геологических исследований.

O. V. Petrov, A. I. Larichev, V. A. Shakhverdov, A. V. Brylina, Yu. P. Kropachev,
O. V. Dron (VSEGEI), V. P. Isaev, A. G. Kichigin (Baikal Center LLC),
A. M. Lygin (Gidropspetsgeologiya)

MAIN RESULTS OF GEOLOGICAL STUDIES OF PROCESSES RELATED TO THE HYDROCARBON MIGRATION IN THE LAKE BAIKAL WATER AREA

A general assessment of geology of the Lake Baikal basin is given. Issues related to the methodology and main results of studying hydrocarbon migration processes in the central environmental zone of the Baikal natural area from 2015 to 2020 are discussed. Extensive material has been obtained on geology of the upper part of the section of recent sediments, geochemical, physicochemical and other features of the near-bottom area of the lake. An electronic atlas of 1:1M maps of the central ecological zone of the Baikal natural area and an electronic catalogue of hydrocarbon occurrences and their discharge zones were compiled. The high efficiency of combining various geological methods for identifying, studying and monitoring sites of natural hydrocarbon migration is shown.

Keywords: Lake Baikal, hydrocarbon, methods of geological studies.

Для цитирования: Петров О. В. Основные результаты работ по геологическому изучению процессов, связанных с миграцией углеводородов в акватории озера Байкал / О. В. Петров, А. И. Ларичев, В. А. Шахвердов, А. В. Брылина, Ю. П. Кропачев, О. В. Дронь, В. П. Исаев, А. Г. Кичигин, А. М. Лыгин // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 94. – С. 4–28. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_4-28.

Введение. Данная статья открывает цикл публикаций по результатам исследований, которые проводились с 2015 по 2020 год в рамках работ по геологическому изучению опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории. В ней рассматриваются наиболее общие вопросы, связанные с методикой и основными результатами проведенных исследований на акватории озера Байкал.

Целью работ являлось геологическое изучение опасных процессов, связанных с природной мигра-

цией углеводородов (УВ) в центральной экологической зоне Байкальской природной территории (ЦЭЗ БПТ). Это потребовало решения следующих основных задач: оценка и мониторинг современного состояния и активности опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов; выявление основных геологических опасностей, связанных с миграцией углеводородов; создание электронного атласа карт, разрезов и видеоматериалов опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов.

В состав Байкальской природной территории (БПТ) входят озеро Байкал, его водоохранная

зона и водосборная площадь в пределах границ Российской Федерации, особо охраняемые природные территории (ООПТ), а также прилегающая к озеру Байкал зона шириной до 200 км на запад и северо-запад от него (ст. 2 ФЗ «Об охране озера Байкал»).

Границы БПТ утверждены распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2006 г. № 1641-р «О границах Байкальской природной территории», листы О-48-49, N-48-49, М-48-49 (все частично). Непосредственно к побережью Байкала примыкают 12 ООПТ, в том числе три заповедника, два национальных парка, шесть заказников. Кроме них на БПТ сеть ООПТ представлена ботаническим садом, природным парком; систематизирован материал по 147 геологическим памятникам природы статусов: действующий, предлагаемый, упраздненный. Границы водоохранной зоны озера были утверждены Распоряжением Правительства РФ от 05.03.2015 № 368-р.

Объект исследования. Изучение процессов миграции углеводородов из осадочной толщи в акваторию озера Байкал началось около 250 лет назад с исследования естественных проявлений газа, нефти и битумов. Наиболее активно изучение углеводородов на Байкале проводилось в 1930-х, 1950-х и в 1990-х годах преимущественно с целью поиска месторождений. Специализированные работы по изучению процессов, связанных с миграцией углеводородов, в пределах акватории и побережья озера Байкал стали проводиться с 1960-х годов. Среди этих работ можно упомянуть как однократные кратковременные исследования, выполненные Всесоюзным научно-исследовательским институтом ядерной геофизики и геохимии (ВНИИЯГГ) и Всесоюзным научно-исследовательским институтом природных газов (ВНИИГАЗ), так и многолетние исследовательские работы иркутских геологов из треста ПГО «Востсибнефтегеология», Иркутского государственного университета (кафедра нефти и газа) и Лимнологического института СО РАН [21; 27; 28]. Анализ и обобщение наиболее представительных и информативных материалов приводятся в производственных геологических отчетах, монографиях, публикациях, а также докладах.

Уникальность Байкала и его недр, с геологической точки зрения, заключается в том, что он одновременно является водным, седиментационным, осадочно-породным и нефтегазоносным бассейном. В нем существуют все положительные признаки нефтегазоносности, присущие другим известным нефтегазоносным бассейнам: наличие терригенных осадков большой мощности и присутствие рассеянного органического вещества в значительных концентрациях, достаточных для формирования нефтегазоматеринских толщ, благоприятные термобарические условия для масштабной генерации газообразных и жидких углеводородов. Они представлены горючим газом, нефтью, нефтяными битумами, газовыми кристаллогидратами, «газогрязевыми» вулканами,

углеводородными газами, растворенными в воде и углеводородными газами донных осадков. Образование перечисленного разнообразия углеводородов обусловлено благоприятным сочетанием всех геологических факторов нефтегазоносности: тектонических, литологических, стратиграфических, геохимических, гидрогеологических и термодинамических. При этом решающее значение для формирования углеводородных систем имеет мощная осадочная толща, сформировавшаяся за последние 25–30 млн лет.

В недрах осадочной толщи генерируются значительные скопления УВ (горючего газа, нефти), которые в процессе миграции постоянно поступают в акваторию озера Байкал. Возможно, что недра Байкала в настоящее время являются своеобразным автоклавом, в котором интенсивно и постоянно протекают процессы генерации углеводородных газов и, прежде всего, метана. При любом, даже очень слабом землетрясении могут происходить стихийные и даже катастрофические его выбросы. Аномально высокие объемы разгрузки УВ опасны не только для уникальной флоры и фауны озера Байкал, но и для людей.

Интерес к изучению процессов миграции УВ существенно возрос в связи с обнаружением газовых кристаллогидратов в 1997 г. при проведении глубоководного бурения по проекту «Байкал-бурение», когда при бурении скважины в Южной котловине озера Байкал (скв. ВDP-97) был получен керн донных отложений, содержащий включения похожего на белый лед вещества, которое и оказалось газовым гидратом [1].

Особенности геологического строения БПТ. Обсуждая проблему образования и миграции углеводородов, рассматривается не только акватория озера, а Байкальская природная территория, которая находится в Байкальской рифтовой системе – крупнейшей активной Евразийской рифтовой системе (рис. 1), являющейся своеобразной природной лабораторией для наблюдения ранних стадий континентального рифтогенеза [30]. Неотектоническая структура этой части континента определяется взаимодействиями Сибирской, Китайской, Таримской, Индийской древних платформ и Тибетского массива, которые в качестве жестких блоков существовали, начиная с нижнего палеозоя [25].

Возраст рифта определяется по отложениям и осадкам древнейших синрифтовых отложений. Наиболее широко распространено мнение об олигоцен-миоценовом возрасте Байкальского рифта, предполагающее двухэтапную историю его развития: ранне- и позднеорогенный этапы [8; 18; 19]. Однако эти положения не совсем согласуются с наблюдаемыми геологическими особенностями района и противоречат результатам реконструкции полей палеонапряжений. По последним представлениям, древнейшие отложения Байкальской впадины определены как верхнемеловые (60–70 млн лет), что наиболее полно соответствует имеющимся геолого-геофизическим данным [13; 14; 35].

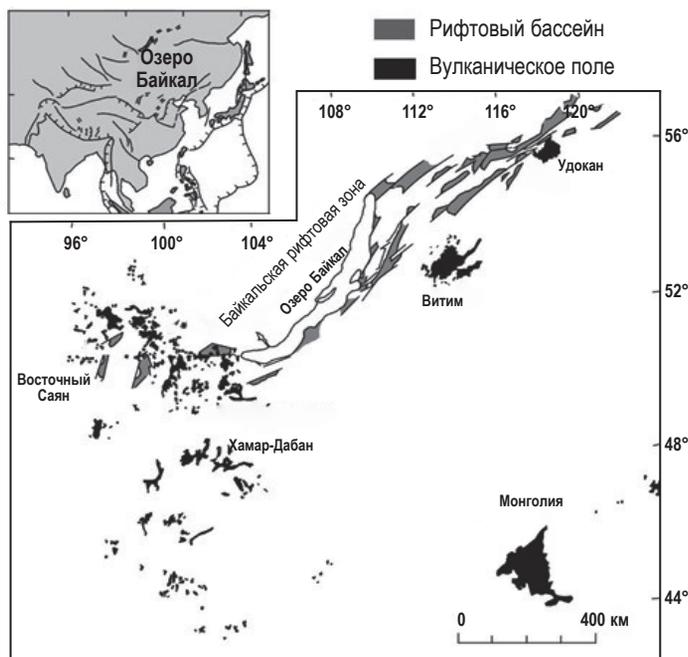


Рис. 1. Расположение бассейнов, входящих в Байкальскую рифтовую систему [32] с изменениями [30]

Представление о геологическом строении Байкальской впадины сложилось по результатам глубоководного бурения, геофизическим данным (в большей мере сейсморазведке) и детальному литолого-стратиграфическому анализу синрифтовых комплексов на окружающей озеро суше.

Морфологически впадина озера Байкал состоит из трех котловин – Северной, Центральной и Южной, разделенных двумя поднятиями – Академическим хребтом и Селенгинско-Бугульдейской перемычкой. Наиболее глубоководной является Центральная котловина озера Байкал – 1637 м. Максимальная глубина Южной котловины – 1461 м, а Северной редко превышает 900 м (максимальная глубина – 904 м). Во всех котловинах Байкала разрез донных отложений, полученный в результате бурения, характеризуется ритмичностью, связанной с чередованием прослоев терригенных глинистых осадков и диатомовых илов. Результаты глубоководного бурения и литологического описания керна позволили оценить

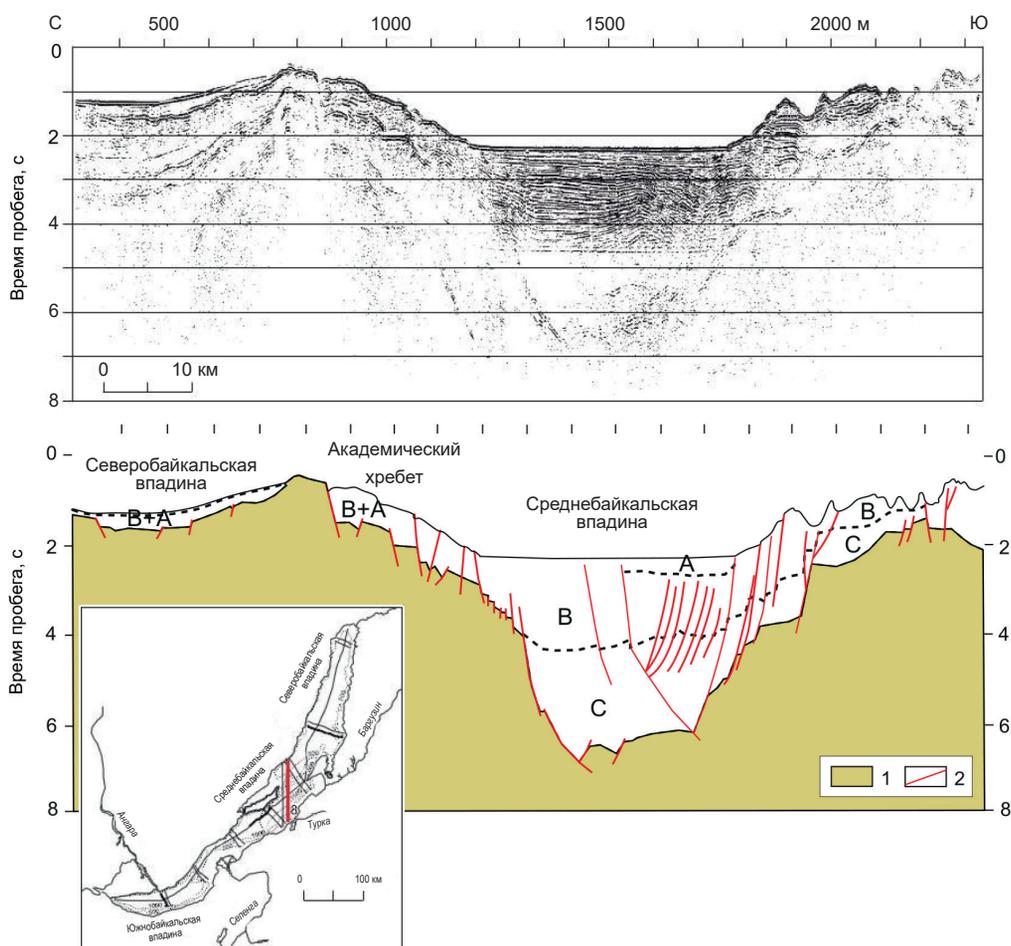


Рис. 2. Сейсмический разрез МОВ-ОГТ по профилю 8, проходящий через подводный Академический хребет и примыкающие к нему Северобайкальскую и Среднебайкальскую впадины [31] с изменениями [15]

А – слоистый недеформированный комплекс – ССК-3 (верхний плиоцен – квартер); В – слоистый деформированный комплекс – ССК-2 (верхний олигоцен – нижний плиоцен); С – прозрачный сейсмический комплекс – ССК-1 (верхний мел – нижний олигоцен)

1 – дорифтовый фундамент; 2 – предполагаемые разломы. На врезке – положение профиля на схеме озера Байкал

строение осадочной толщи и выяснить условия осадконакопления в различных морфоструктурах озера [5; 12].

Так как Байкальский рифт имеет сложную многоэтапную историю развития, возраст и условия формирования его Южной, Центральной и Северной котловин различны, что довольно четко фиксируется на сейсмических разрезах.

На рис. 2 представлена модель строения озера Байкал, выполненная по результатам интерпретации сейсмического разреза МОВ, проходящего через Северобайкальскую и Среднебайкальскую впадины [15; 31]. Согласно данным работам, мощность осадочного выполнения Байкала составляет 7–8 км.

Довольно близкие подсчеты мощности (до 9,5 км) в Среднебайкальской котловине представлены по результатам интерпретации материалов метода преломленных волн (МПВ) (рис. 3) [30]. Представление о строении Южнобайкальской котловины было получено из результатов сейсмических работ методом МПВ вдоль профиля Солзан–Посольское (рис. 4).

Осадочная толща краевых зон Байкальского рифта и внутренней части Байкальской впадины исследована по обнажениям. В разрезах донных осадков выделены три тектоно-литостратиграфических комплекса (ТЛСК) (табл. 1) [14; 15]. ТЛСК-1 слагают преимущественно мел-эоценовые мономиктовые отложения различной фациальной и генетической природы и латерит-каолинистая кора выветривания [11]. ТЛСК-2 представлен олигоцен-нижнеплиоценовыми терригенно-глини-

стыми отложениями нижней молассы. В составе данного комплекса преобладают песчано-глинисто-алевритовые отложения прибрежно-озерного, озерного и дельтового генезиса (танхойская свита). Присутствуют и грубообломочные отложения конусов выноса (осиновская свита), отложения, характерные для малоглубинных озер (тагайская свита) и крупных, достаточно глубоких озер (сасинская свита). ТЛСК-3 включает в себя верхнеплиоцен-четвертичные полимиктовые отложения, отнесенные к осадкам верхней молассы. Состав комплекса характеризуется отложениями прибрежной зоны крупного глубоководного озера, сменяющиеся во внутренней части глубоководными глинисто-алевритовыми осадками [5; 14; 15; 17].

Данным тектоно-литостратиграфическим комплексам Прибайкалья соответствуют три сейсмостратиграфических комплекса (ССК) в разрезе донных отложений (табл. 1) [8; 14; 18; 34; 36]. ССК-1 – прозрачный сейсмический комплекс, слагающий наиболее глубоководные части осадочного разреза, залегающие непосредственно на породах фундамента в центральной части хребта. Присутствует только в Южной и Средней котловинах Байкала. ССК-2 – слоистый сильно деформированный комплекс, содержащий довольно протяженные отражающие горизонты, разбитые множеством дизъюнктивных нарушений. Распространен по всей акватории озера Байкал. ССК-3 – слоистый недеформированный комплекс, залегающий с несогласием на ССК-2. Выявлен во всех трех котловинах Байкала.

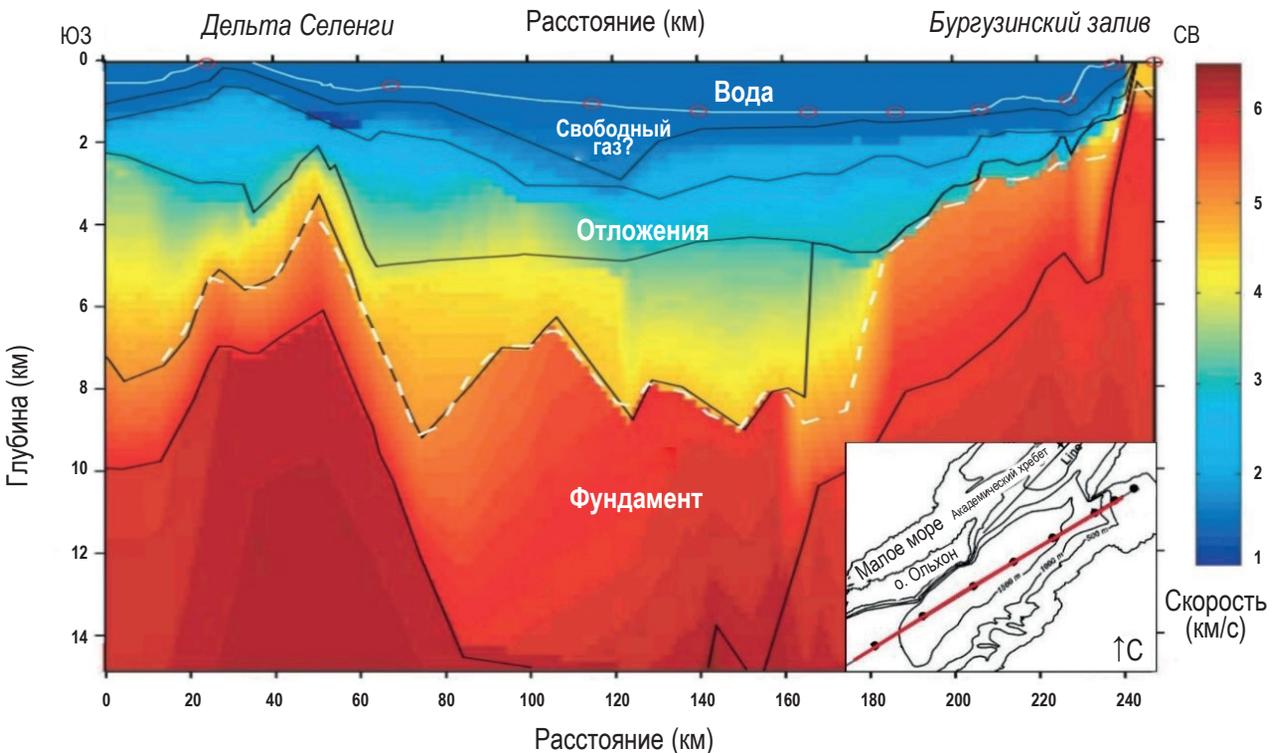


Рис. 3. Скоростная модель по данным МПВ вдоль Центральной Байкальской котловины. Белая пунктирная линия – граница фундамента [29]

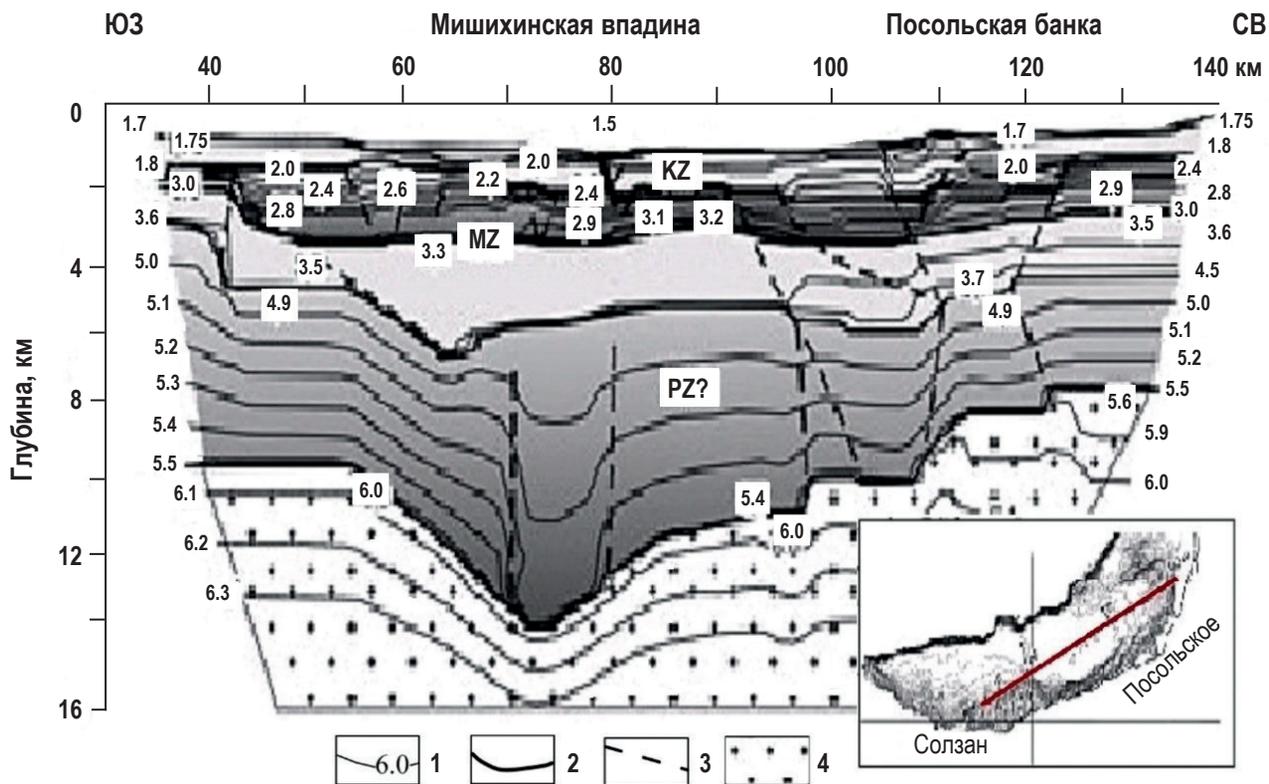


Рис. 4. Сейсмический разрез по результатам численного моделирования

1 – изолинии скорости (км/с); 2 – сейсмические границы; 3 – предполагаемые разломы; 4 – фундамент [26]

Таким образом, к настоящему времени получен достаточный объем данных о глубинном строении Байкальской котловины. Однако достоверная информация, которая могла бы дать однозначный ответ о структуре и возрасте глубокозалегающих комплексов пород, отсутствуют, а результаты интерпретации в рамках применяемых геофизических моделей неоднозначны.

Материалы и методы исследований. Многолетняя практика проведения геологосъемочных и эколого-геологических работ ФГБУ «ВСЕГЕИ» на различных акваториях показала, что среди методов исследований есть те, которые отличаются высокой степенью достоверности оценки состояния геологической среды и сопредельных с ней сред, и эффективно фиксируют их изменения и неоднородности. В основе этих исследований лежат методы комплексного геологического картирования, которые подразумевают сочетание как геологических и геохимических, так и геофизических методов. Главным результатом такого подхода является возможность унификации требований к системе наблюдений и сопоставимость полученных результатов. При изучении особенностей проявления опасных процессов, связанных с миграцией УВ на акватории озера, использованы следующие методы.

Дообработка и интерпретация сейсмических данных. При интерпретации сейсмических разрезов, полученных методом отраженных волн

общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) и непрерывного сейсмического профилирования (НСП), выполненной для изучения глубинного строения озера Байкал, применялись современные способы обработки материалов. Временные разрезы систематизированы в сводном сейсмическом проекте, в пакете программ CubeTechnology ©1990-2015, что позволило более уверенно идентифицировать отражающие сейсмические горизонты Байкальской котловины. Методика заключалась в следующем: после расчета геометрии наблюдений и редакции сейсмограмм выполнялось мультифокусирование сейсмограмм методом кинематической фильтрации [2]. Метод основан на том, что оптимальное суммирование сейсмических сигналов в методе ОГТ достигается за счет учета кривизны и наклона отражающих элементов при инвариантности относительно скорости распространения волн на интервале фокусировки. Дообработка временных разрезов МОВ-ОГТ и НСП включала в себя расчет разрезов методом «Сейсмостратиграфического суммирования» [4] и спектральную декомпозицию RGB [2].

Состав и схема обработанных многоканальных профилей и проинтерпретированных разрезов методом «Стратиграфического суммирования» представлены на рис. 5.

Геофизический комплекс методов, который включает непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), гидролокацию бокового обзора (ГЛБО) и многолучевое эхолотирование (МЛПЭ).

Таблица 1

Корреляция стратиграфических подразделений, тектонических фаз и сейсмических границ [15]

Система	Отдел/подотдел/ярус	Возраст нижней границы, млн лет [Geologic time ... , 2008]	Региональный корреляционный горизонт [Mats, 2013]	Тектоно-литостратиграфический комплекс	Сейсмостратиграфический комплекс [Hutchinson, et al., 1993]	Тектоническая фаза	Возраст, млн лет	Сейсмическая граница
Квартер	Голоцен	0,01	Нюрганский	ТЛСК-3	Слоистый недеформированный ССК-3	Тыйская	0,15–0,12	A2, U1
	Плейстоцен	0,13						
	средний	0,7						
Неоген	Плиоцен	1,80	Шанхаихинский (аносовский)	ТЛСК-2	ССК-2	Приморская	1,0–0,8	A1, U2
		верхний						
	Миоцен	5,3	Сасинский подгоризонт	ТЛСК-2-2	Верхний слоистый деформированный ССК-2-1	Нюрганская	2,0	B10, U3
		нижний						
	Олигоцен	16,1	Тагайский подгоризонт	ТЛСК-2-1	Нижний слоистый деформированный ССК-2-1	Ольхонская	3–4	B6, U4
		нижний						
Палеоген	Эоцен	28,4	Каменский	ТЛСК-1	Сейсмически прозрачный ССК-1	Северо-байкальская	10	B2, U5
		верхний						
Мел	Маастрихит	55,8	Фундамент	Фундамент	Фундамент	Тункинская	27–25	U6
		нижний						
	Фундамент	65,5						
	Фундамент	70,6						
								?

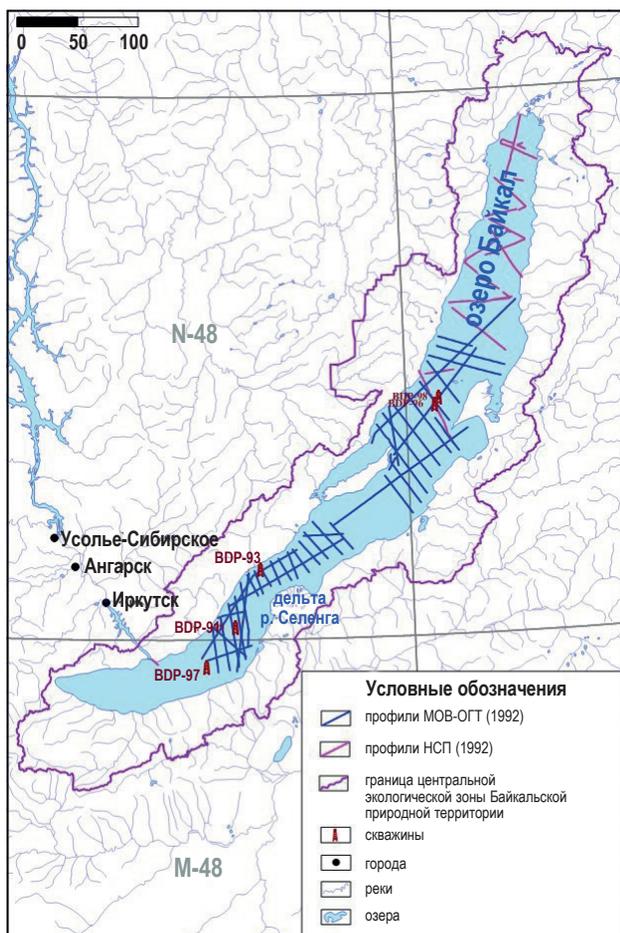


Рис. 5. Карта-схема озера Байкал с сейсмическими профилями 1992 г. (сост. С. А. Гриценко, 2020 г.)

НСАП позволяет, в отличие от методов МОГТ и НСП, указанных выше, с помощью волн звукового и ультразвукового диапазона получить детальные данные о строении верхней части геологического разреза. На территории исследования НСАП выполнялось с использованием сейсмоакустического приборно-аппаратурного комплекса GEONT-HRP (производство ООО «Спектр-Геофизика», Россия) с рабочей частотой – 0,3–2 кГц. Для возбуждения сейсмического импульса нами использовался электроискровой источник типа спаркер. Устойчивую его работу в пресных водах озера Байкал обеспечивал специальный электродный модуль собственного изготовления, заполненный соленой водой. Кроме того, был выбран оптимальный частотный диапазон зондирующих импульсов, улучшена разрешающая способность исследований до 2–3 м, что позволило провести профилирование на всех глубинах водного слоя Байкала и получить отражающие границы от верхней части донных осадков с максимальной мощностью до 400 м. Ранее применявшиеся технические средства не позволяли достигать подобных результатов. С помощью НСАП оценивалось состояние структурных сейсмостратиграфических и сейсмолитологических параметров верхней части геологического разреза дна вдоль трассы движения научно-исследова-

тельского судна (НИС). Также были установлены нарушения геологической среды, активизированные подходящие к поверхности дна разрывные нарушения, гравитационные смещения блоков пород, нарушения характеристичных мощностей отложений, структурные нарушения и т. п.

Гидролокация бокового обзора основана на получении акустической «фотографии» (сонограммы) поверхности дна с помощью сигналов в ультразвуковом диапазоне, посылаемых приемопередающей антенной, буксируемой НИС. Метод применялся для оценки площадей распространения, выяснения различий состава, границ распространения и размеров отдельных природных и природно-техногенных объектов, для выявления и детализации зон литодинамической активности и грязевулканической деятельности, а также для характеристики рельефа морского дна и состояния донных ландшафтов со всеми видами возможных нарушений геологической среды в ее поверхностном проявлении. Основным ограничением применения метода ГЛБО на Байкале является сложный рельеф с резким перепадом глубин.

Многолучевое эхолотирование выполнялось для получения детального качественного и количественного представления о морфологии рельефа дна и фиксации всех его изменений (нарушений), а также поиска и идентификации, объектов миграции углеводородов, проявленных в рельефе и в водной толще (рис. 6). Для съемки рельефа поверхности дна озера использовался автоматизированный комплекс на базе многолучевого эхолота EM710 норвежской фирмы «KONGSBERG». Его высокочастотная система с большой разрешающей способностью, обеспечивала соблюдение требований IHO S-44 Special Order, Order 1 как по точности и плотности зондирования, так и по обнаружению малых объектов.

Геологический комплекс методов относится к прямым методам исследований, что позволяет непосредственно наблюдать за состоянием геологической среды и происходящими в ней процессами и явлениями. Комплекс набортных исследований на станциях наблюдения включал геологическую и фотодокументацию донных отложений, получение образцов донного грунта и придонной воды на химико-аналитические исследования (гранулометрического анализа, определения содержания комплекса химических элементов в донных осадках и природных водах, нефтепродуктов и некоторых органических загрязнителей, определения радионуклидов и др.), оперативную дегазацию образцов донного грунта и природных вод для изучения водорастворенных и остаточных газов донных отложений, а также определение быстро меняющихся физико-химических показателей воды (Eh, pH и T °C) и донного грунта (pH и T °C).

Для фототелевизионного профилирования использовались подводный дистанционно управляемый дрон Chasing M2 (рис. 7), а также телеуправляемый подводный аппарат (ТПА) Fish-106.

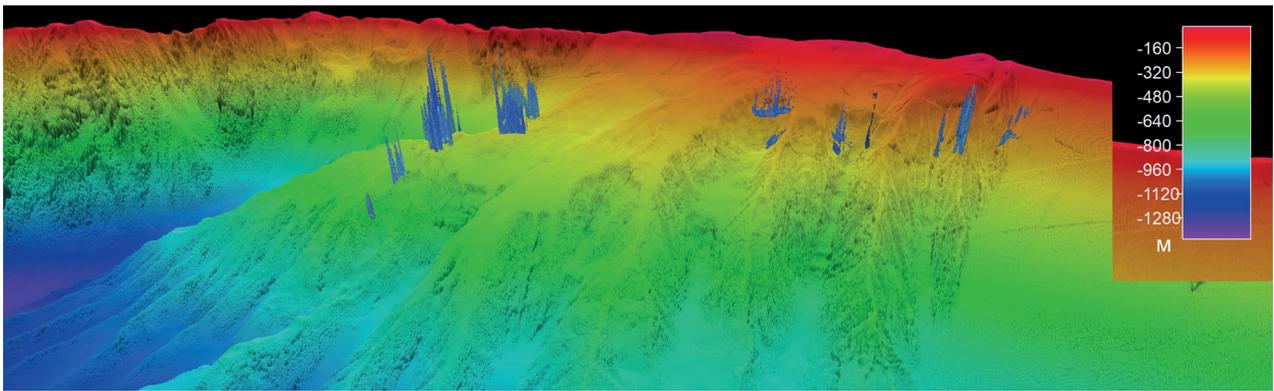


Рис. 6. Трехмерная модель рельефа дна и струй газовых эманаций в толще воды по данным многолучевого эхолотирования района проявления газовых гидратов Голоустное

Подводные фото- и видеосъемка проводилась для наблюдения и съемки объектов миграции углеводородов, заверки и интерпретации данных ГЛБО и пробоотбора, для визуализации и детального изучения опасных литодинамических процессов, в том числе в пределах районов предполагаемого проявления «грязевых» вулканов и газопроявлений (грифонов).

Для геологического отбора донного грунта применялись коробчатый пробоотборник боксскорер (рис. 7, в), труба гравитационная (рис. 7, з) и бентосная герметичная трубка (рис. 7, д). Газо-гидрогеохимический отбор воды из придонного слоя выполнялся с помощью бентосной трубки, боксскорера или батометра (рис. 7, е).

При выявлении газовых гидратов производился отбор их образцов и специализированная обработка с целью выделения газовой и водной составляющих для подготовки проб на изотопные и геохимические исследования.

Измерения массовой концентрации нефтепродуктов в воде выполнялись непосредственно после отбора проб на анализаторе жидкости «Флюорат-02-2М» (ООО «Люмэкс», Санкт-Петербург). Применялась «Методика проведения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природной, питьевой и сточной воды флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» – ПНД Ф 14.1:2.4.128-98, которая обеспечивала выполнение измерений концентрации нефтепродуктов для природных и питьевых вод в диапазоне от 0,005 до 50 мг/дм³.

Химико-аналитические исследования. Анализ геохимических проб на содержание в них химических элементов выполнялся в Центральной лаборатории ФГБУ «ВСЕГЕИ» по утвержденным отраслевым или государственным методикам; в отдельных случаях – по прошедшим метрологическую аттестацию методикам предприятия. Корректность результатов гарантируется применением государственных стандартных образцов состава, большой коллекцией которых располагает лаборатория. С 1999 г. Лаборатория является корпоративным членом Международной ассоциации геоаналитиков (IAG), объединяющей свыше 200 лабораторий основных развитых стран.

Комплекс геохимических аналитических методов включал приближенно-количественный эмиссионный спектральный анализ на 46 элементов (ПКЭСА), масс-спектрометрию с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS) для определения Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Pb, As в донных осадках и Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Rb, Y, Mo, Ag, Cd, Te, Ba, La, Hf, W, Pb, Bi, U в придонных водах, флуориметрический метод анализа для определения массовой концентрации нефтепродуктов (общих). Для определения ртути применялся непламенный метод атомной абсорбции.

Анализ изотопного состава водорода и кислорода (dD, d¹⁸O) в пробах воды выполнялся в Центре изотопных исследований (ЦИИ) ФГБУ «ВСЕГЕИ» так же, как и определение изотопного состава углерода (δ¹³C) газов, в том числе полученных в результате разложения газовых кристаллогидратов.

Хроматографический анализ газов выполнялся ООО ПГК «Сибгеоком» (г. Иркутск) с использованием отечественного высокочувствительного поверенного хроматографического газового комплекса серии «Хромос GX-10000» в соответствии со СТО-ИГ 026-2011 «Определения компонентного состава природных газовых смесей хроматографическим методом» (ФГУП «СНИИГГИМС»). Определялись следующие компоненты: CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₃H₈, C₃H₆, C₄H₁₀, nC₄H₁₀, C₄H₈, iC₅H₁₂, nC₅H₁₂, C₅H₁₀, iC₆H₁₄, nC₆H₁₄, C₆H₆, C₇H₈, C₆H₄(CH₃), орто- и пара-метаксилолы, N₂, O₂, CO₂, H₂, He. Отбор пробы осуществлялся согласно ГОСТу 18917-82 «Газ горючий природный. Методы отбора проб».

Для анализа литологического состава песчаных осадков применялся гранулометрический 19-фракционный ситовой анализ (анализаторная просеивающая машина AS 200 с управлением «g» фирмы Retsch), а для существенно глинистых отложений – лазерный анализатор частиц (седиментограф) Микросайзер 201А (ООО «Научные приборы», Россия).

Фактические материалы. Исследовательские работы на акватории озера Байкал выполнялись сотрудниками полевой партии ФГБУ «ВСЕГЕИ»

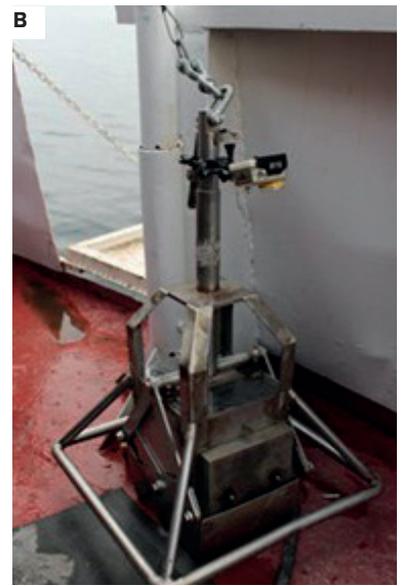


Рис. 7. Системы отбора проб и аппаратура
Дистанционно управляемые подводные дроны: а – Chasing M2; б – ТПА Fish-106.
Системы отбора проб, донного грунта: в –
коробчатый пробоотборник бокскорер; г –
труба гравитационная (3 м); д – бентосная
герметичная трубка; воды: е – батометр
конструкции «Нискина»

на судах Лимнологического института СО РАН: НИС «Академик Г. Ю. Верещагин», НИС «Академик В. А. Коптюг», НИС «Г. Титов»; Байкальского Музея Иркутского научного центра СО РАН НИС «Профессор А. А. Тресков», а также на катере «Ferretti Altura 39 – Sanritsu» ООО «Байкальский центр». Наибольший акцент в исследованиях уделялся не только выявлению и детальному обследованию отдельных объектов, но и региональному изучению особенностей процессов природной миграции углеводородов.

Всего на акватории озера литолого-геохимические наблюдения проведены более чем на 390 станциях (включая станции проведения фототелепрофилирования) и задокументировано около 130 м керна. В результате для проведения комплексных аналитических исследований получено более 500 проб донного грунта. Гидрогеохимическое опробование придонной воды выполнено более чем на 250 станциях. В том числе проведен анализ 12 проб остаточной воды газовых кристаллогидратов.

В ходе газогидрохимического опробования выполнен отбор водорастворенных газов как из придонной, так и приповерхностной воды. Проведена термодезгазация донных отложений. Общее количество проб газа на газохроматографический анализ, включая газ из газовых гидратов, составило 550 проб.

Одним из важнейших направлений работ явились измерения непосредственно на борту НИС быстро меняющихся физико-химических параметров, таких как щелочно-кислотные свойства и температура донных грунтов, а также окислительно-восстановительный потенциал (Eh), щелочно-кислотные свойства и температура придонных вод. Всего выполнено около 310 измерений Eh придонной воды и более 630 – рН и 650 – температуры грунта и придонной воды. При этом одновременные парные (как грунта, так и придонной воды) измерения температуры выполнены на 276 станциях.

Подводные телевизионные съемки газовых грифонов и донных ландшафтов проведены на 83 станциях.

Общая протяженность НСАП в акватории озера Байкал составила около 2600 линейных км. Выбор районов работ, направление профилей и их количество определялись в зависимости от наличия объектов миграции углеводородов и морфологии донного рельефа. Гидролокация бокового обзора проведена на более 950 линейных км, при ширине обзора от 50 до 100 м по одному борту. Общий объем многолучевого эхолотирования превысил 4500 линейных км.

Проведен значительный объем аналитических исследований, которые в том числе включали: определение концентрации химических элементов (Cd, Ni, Co, Cr, Pb, Zn, Cu, Fe, Mn, As, Hg) в донных осадках методом ICP MS – 476 анализов; определение химических элементов в воде методом ICP MS (на 30 элементов) – 255 анализов; определение углерода органического – 476 анализов;

определение массовой концентрации нефтепродуктов в придонной воде и донных осадках – 415 анализов; гранулометрический состав донных осадков – 297 анализов; хроматографический анализ остаточных газов донных отложений, растворенных и свободных газов – 566 анализов.

Основные результаты и их обсуждение. Обработка и интерпретация сейсмических данных. При интерпретации сейсмических разрезов МОГТ и НСП было выделено несколько отражающих горизонтов: граница фундамента «F», границы, соответствующие ольхонской и нюрганской тектоническим фазам («B6» и «B10») и горизонт подошвы газогидратного слоя «BSR».

Определение границы фундамента является одним из наиболее важных и дискуссионных вопросов при изучении Байкала. На сейсмических разрезах под границей фундамента понимается сейсмический горизонт, ниже которого отраженные сейсмические волны не регистрируются или проявлены крайне слабо. Его поверхность характеризуется неровным, расчлененным рельефом (рис. 8). Граница фундамента Байкальской котловины соответствует подошве верхнемеловых–кайнозойских отложений осадочного чехла. Положение данного горизонта было выявлено различными методами (МОВ, МПВ) и представлено в независимых друг от друга работах [8; 9; 14; 15; 26; 30; 31].

Стратификация и слежение границы фундамента (горизонта «F») выполнялось на основании особого характера сейсмической записи на данной границе с учетом анализа ранее опубликованных материалов. В Южнобайкальской котловине положение сейсмического горизонта, соответствующего фундаменту «F», находится значительно глубже, чем в Центральной и Северной котловинах (рис. 4) [26]. Такая мощная толща осадочных отложений (более 12 км) объясняется автором наличием в Южной котловине, помимо пород кайнозойского и мезозойского возраста, более древних, предположительно, палеозойских отложений. Дальнейшее слежение горизонта «F» производилось на основании его увязки на пересекающихся профилях.

Среди толщ осадочного чехла были прослежены два опорных отражающих кайнозойских горизонта, наиболее выдержанные по всей акватории озера и имеющие стратиграфическую привязку по скважинам: «B6» (верхний миоцен) и «B10» (середина эоценового периода).

Горизонт «B10» соответствует границе несогласия, вызванной нюрганской тектонической фазой, характеризующейся интенсивным рифтогенезом, резкой сменой характера осадконакопления по всей Байкальской территории и быстрым глубоким погружением дна Байкальской впадины [1; 14; 15]. С данной фазой связано изменение характера тектонических напряжений, что привело к изменению структуры отложений – деформированные слои сменились недеформированными (граница между толщами «A» и «B»,

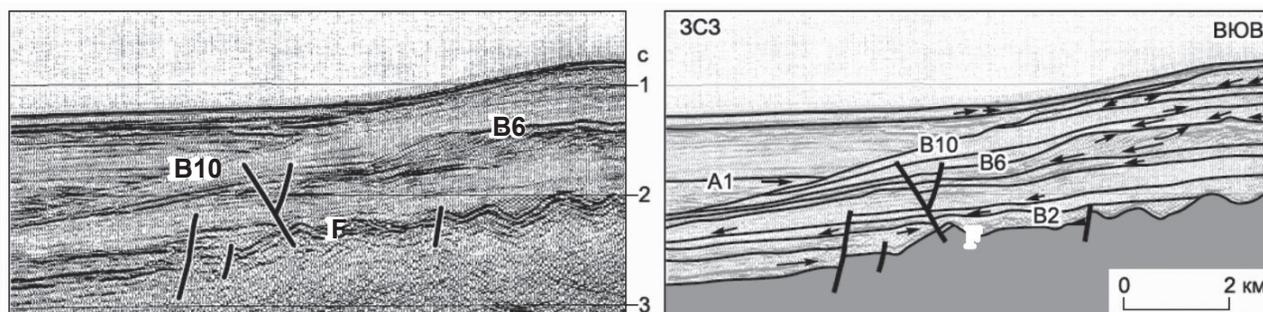


Рис. 8. Фрагмент профиля 58 через южную часть Северобайкальской впадины [36] с изменениями [15]

рис. 4). Данная граница относится к типу несогласия трансгрессивного прилегания [15; 36]. Положение горизонта «В10» подтверждено скважинами ВDP-96 и ВDP-98 [5].

Сейсмический горизонт «В6» соответствует ольхонской тектонической фазе, разделяющей два этапа развития Байкальского рифта: ранне- и позднеорогенный. За время существования ольхонской тектонической фазы происходил рост рифтовых плеч, о. Ольхон и Святоносского блока [14; 15]. Положение данной границы зафиксировано в самой глубокой на озере Байкал скв. – ВDP-98 [1]. Граница «В6» связана с переходом от мелководных фаций к глубоководным мелкозернистым отложениям, связанным с резким увеличением скорости понижения дна Байкала [36]. Данная граница делит сейсмический комплекс «В» на две части: верхняя тонкослоистая пачка (В6–В10), которая формировалась в спокойных озерных условиях, и нижняя пачка (В5–В6), накопление которой осуществлялось в районе дельты палеобаргузина [5].

В осадочных отложениях Байкала был выделен и прослежен сейсмический отражающий горизонт подошвы газогидратного слоя «BSR» (bottom simulating reflectors). Нижняя граница слоя газогидратов определяется изолинией термобарического поля в осадочной толще. Упругие свойства слоя газовых гидратов существенно отличаются от среды ниже подошвы BSR, поэтому на этой границе образуется достаточно мощное отражение, которое имеет отрицательную полярность в связи с наличием свободного газа в подстилающих отложениях. Так как изолиния термобарического поля не всегда совпадает с направлением слоистости в осадках, то такое отражение на временных разрезах может пересекать отражения, связанные с изменением упругих свойств, вызванных литологическими особенностями пород. Граница BSR параллельна дну озера с ее постепенным погружением в сторону увеличения глубины. Данные свойства являются важнейшими признаками отражений от подошвы газовых гидратов по сейсмическим данным [2; 20].

Разрывные нарушения широко развиты в пределах Байкальской природной территории и оказывают существенное влияние на размещение и характер складчатых и магматических структур. Морфологически они представляют собой сбросы,

сбросо-сдвиги и надвиги. Более всего развиты разломы северо-восточного и северо-западного направлений. Среди дизъюнктивных нарушений по их значимости выделяются главные и второстепенные. В составе главных – глубинные разломы, связанные с краевым швом Сибирской платформы, а также основные региональные разломы (Главный Саянский, Тункинский, Темникский, Гильберинский, Южно-Заганский и др.). В бортах тектонических впадин и на участках сочленения крупных блоков они нередко сопровождаются зонами высокотемпературных тектонитов. В геофизических полях им соответствуют резко выраженные градиентные, а на космических снимках линейные зоны. Поэтому при прослеживании горизонтов особое внимание уделялось выявлению разрывных нарушений и их сопоставлению с имеющимися данными о тектоническом строении района работ. В результате, помимо крупных региональных разломов, были выделены контуры предполагаемых локальных разрывных нарушений.

На разрезах, приведенных на рис. 9–12, представлены основные отражающие горизонты, включая: F – кровля дорифтового фундамента (подошва мезо-кайнозойских отложений); В10 – граница несогласия, вызванная нюрганской тектонической фазой; В6 – граница несогласия, возможно, соответствующая ольхонской тектонической фазе; BSR – подошва газогидратного слоя. Дополнительно, на сейсмогеологические разрезы вынесены разрывные нарушения с учетом имеющихся данных о строении района работ по структурно-тектонической карте и генетические характеристики поверхности дна по геоморфологической карте озера Байкал.

Глубинные разрезы построены путем глубинной миграции Кирхгофа временных разрезов по скоростным разрезам. Пример стратиграфической привязки и слежения рассмотренных выше горизонтов по профилю 15 приведен на рис. 12.

Построение структурных карт. Сейсмические данные имеют решающее значение при изучении геологического строения Байкала. Для вычисления глубин залегания отражающих горизонтов (структурных карт) использовался метод пересчета карты изохрон с применением скоростной модели, разработанной А. Я. Гольмштоком [1; 20]. После получения решения в каждом узле

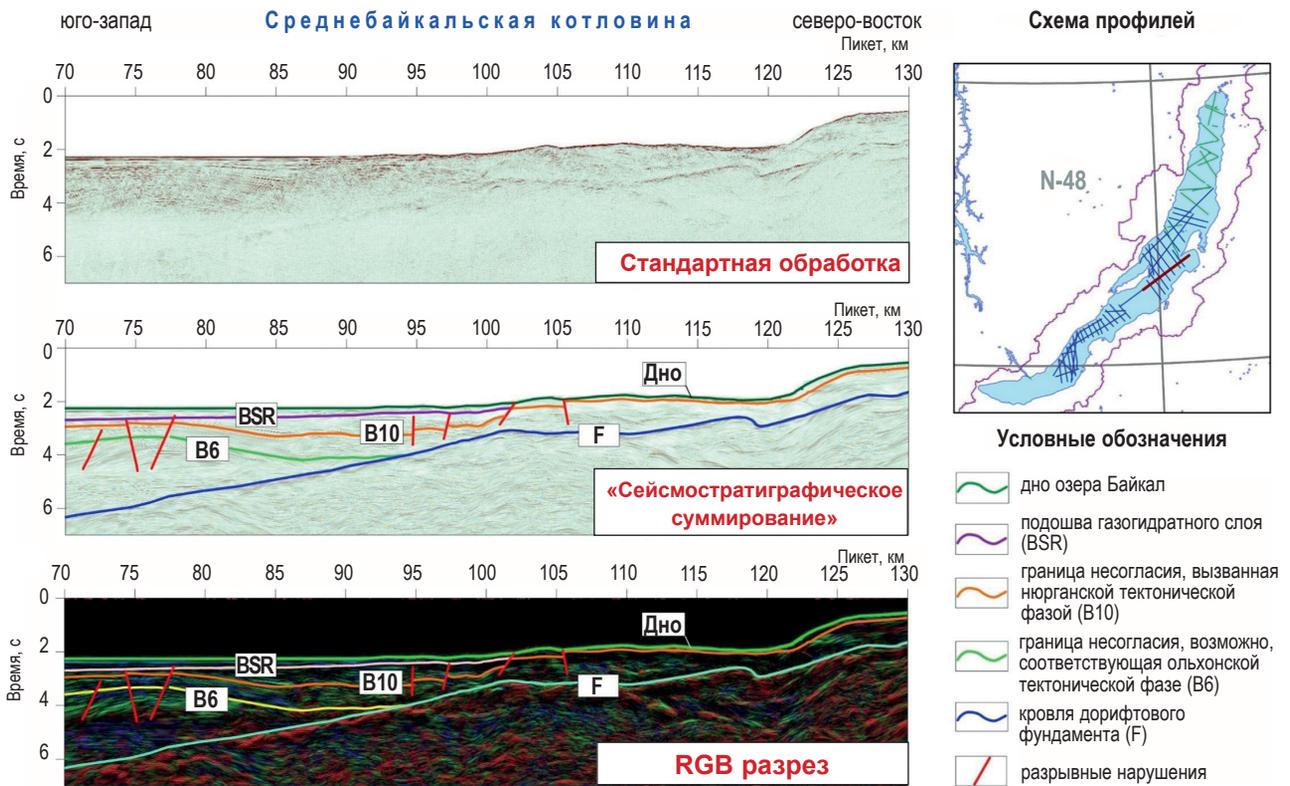


Рис. 9. Сравнение различных вариантов разреза МОВ-ОГТ по профилю 13

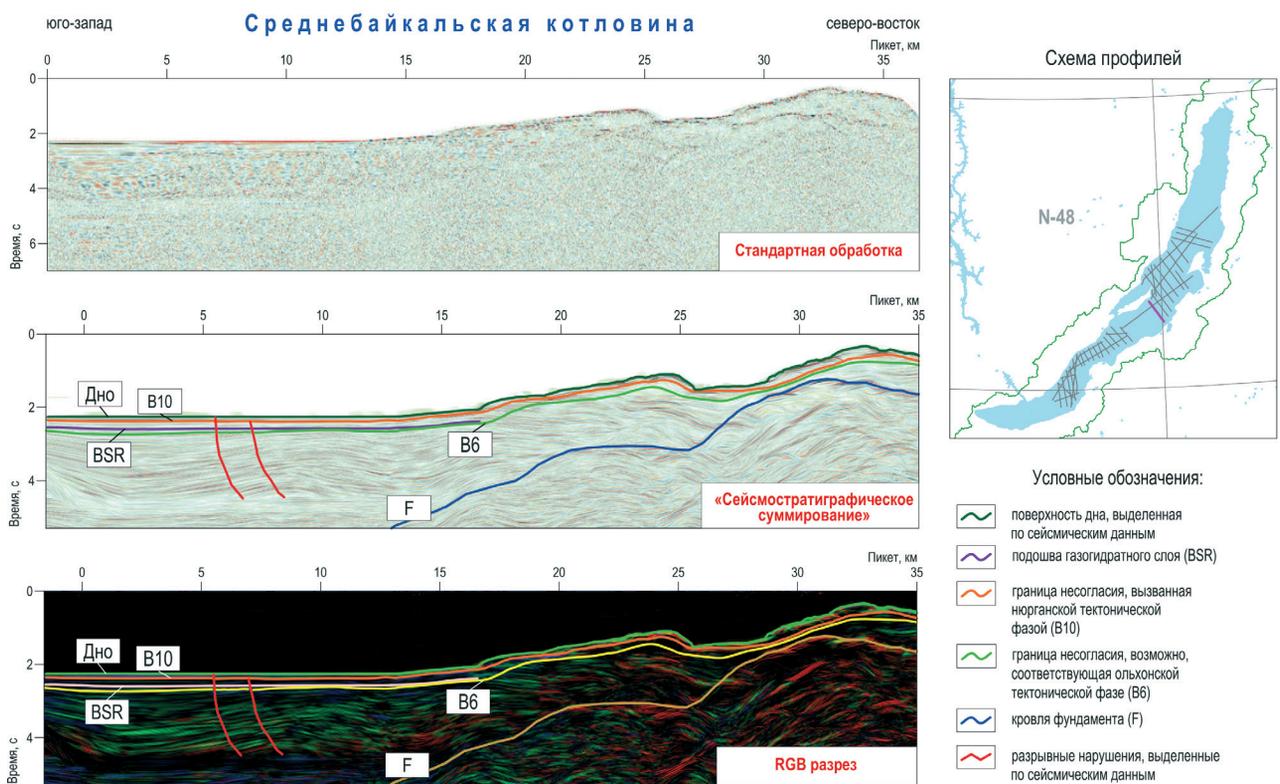


Рис. 10. Сейсмогеологический разрез по профилю 38

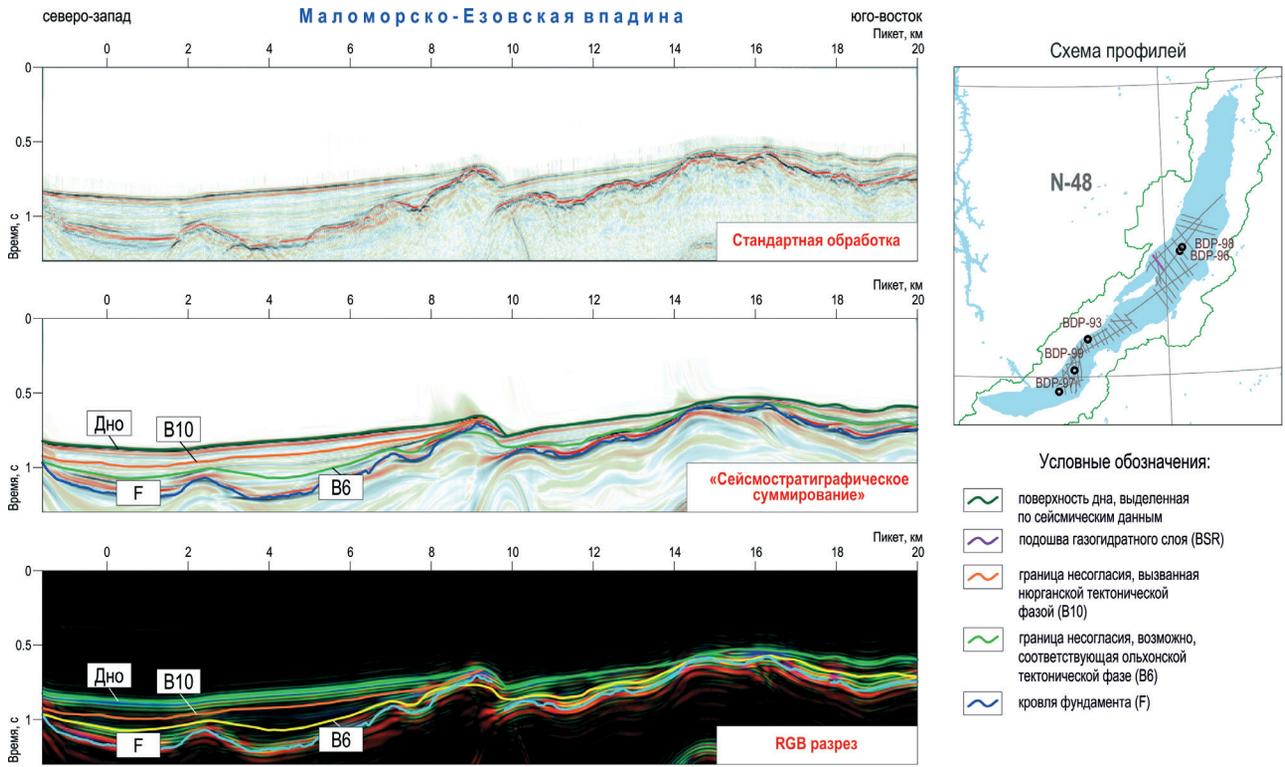


Рис. 11. Сейсмогеологический разрез по профилю 44

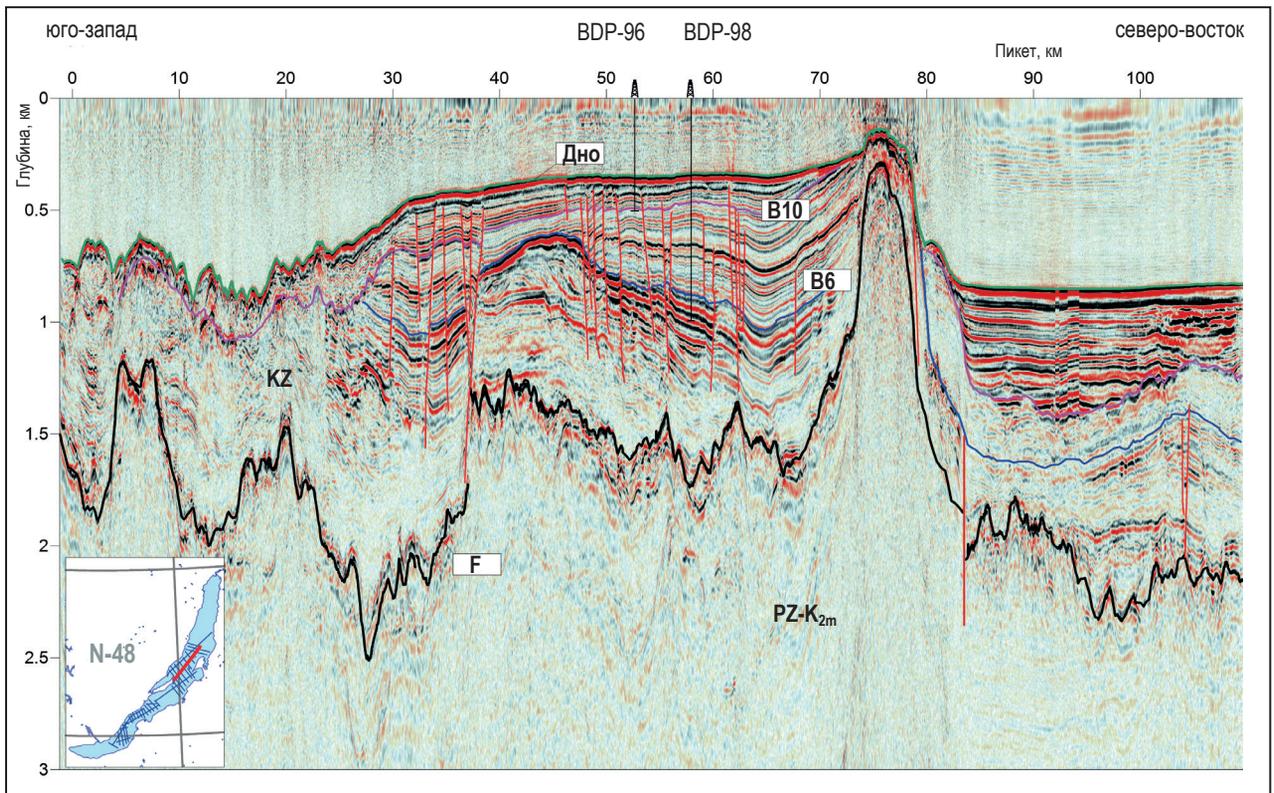


Рис. 12. Слежение и стратиграфическая привязка горизонтов по профилю 15

регулярной сетки карты изохрон вычислялась мощность осадков до границы. Карта прогноза мощности мезо-кайнозойских отложений вычислялась путем разности структурной карты по горизонту «F» и батиметрической карты дна.

Структурные карты по отражающему горизонту «B6», который соответствует ольхонской тектонической фазе, карта по кровле дорифтового фундамента «F» (подошва мезо-кайнозойских отложений) и карта прогноза мощности осадочного чехла озера Байкал, рассчитанные по вышеприведенной методике, представлены на рис. 13–16.

Структурная карта по отражающей границе «B10», соответствующей границе несогласия, вызванного нюрганской тектонической фазой, была дополнена прослеживанием глубинных профилей НСП, выполненных в северной части акватории озера Байкал. На профилях НСП присутствует информация на временах до 2,5 с, в отличие от профилей МОГТ, где длина записи 4 с. При интерпретации разрезов НСП была отслежена наиболее контрастная отражающая граница, условно отождествляемая с отражающим горизонтом «B10». В связи с отсутствием скважин не представилось возможным более точно привязать данную геологическую границу к сейсмической. При построении данной структурной карты была учтена средняя скорость до горизонта «B10», использованная для расчета структурной карты по результатам МОГТ. Актуализированная карта была увязана со структурной картой, полученной по данным МОГТ (рис. 16). В результате впервые была построена структурная карта по границе несогласия, вызванная нюрганской тектонической фазой, практически на всю площадь озера Байкал.

Высокая скорость погружения кристаллического фундамента с одновременным компенсационным накоплением осадков привели к формированию мощной осадочной толщи. Осадки содержат большое количество растительного органического вещества, что при участии процессов катагенеза приводит к образованию и накоплению в них разнообразных углеводородов. В результате сейсмогеологических процессов они, в том числе метан, в свободной или растворенной форме могут в большом количестве мигрировать по проницаемым каналам к поверхности дна озера, что представляет экологическую опасность для водных организмов: нектона, планктона и бентоса, то есть для тех организмов, которые дышат кислородом, растворенным в воде.

Изучение проявлений углеводородов на акватории озера. Всего за период работ (2015–2020 гг.) различными средствами наблюдения на акватории озера нами было зарегистрировано и внесено в электронный каталог 2316 проявлений, связанных с процессами миграции углеводородов. Из них непосредственно выходов углеводородов – 859, выраженных геоморфологически в рельефе дна – 74, проявленных физическими полями – 1465, химических проявлений – 307. Среди них выявлен целый ряд новых объектов, обнаруженных по материалам полевых и каме-

ральных работ, в том числе при анализе космических съемок. Схема дает представление о характере расположения основных объектов в пределах акватории озера (рис. 17).

Наиболее многочисленными объектами миграции углеводородов являются **газопроявления или выходы газа со дна** (грифоны, газовые «факелы») [34]. Всего за время проведения работ зарегистрировано более 800 выходов газа, часть из которых была зафиксирована впервые. Большинство объектов проявлены в толще воды в виде акустических аномалий, которые фиксируются в процессе проведения различных видов эхолотирования. В период стояния ледяного покрова выходы углеводородных газов часто сопровождаются участками чистой воды, так называемыми «пропаринами», или утончением льда. По данным хроматографического анализа, в составе свободных газов на акватории озера преобладает метан. Средняя его концентрация составляет около 50 об.% и может достигать 95 об.%.

Места массовой и активной разгрузки газа изучены с помощью геофизических методов (НСАП, ГЛБО, МПЛЭ). В результате выполненных исследований составлены объемные модели поверхности дна основных объектов миграции углеводородов и районов акватории потенциального их проявления: Посольская банка, пос. Большое Голоустное, губа Таланка – мыс Туркинский, мыс Крестовский и др. Выявлены новые места разгрузки газов (так называемых «сипов») и характер их проявления в пределах водной толщи. Только в пределах Селенгинского мелководья по результатам анализа данных ГЛБО было выявлено более 50 различных объектов.

Анализ структурно-тектонической обстановки, элементов геоморфологии дна озера, разрывной тектоники в комплексе с пространственным расположением источников газа и «пропарин» показывает, что наиболее многочисленные газопоявления расположены на внешней периферии дельты р. Селенга и в ее мелководной зоне, где проявлены тектонические нарушения и отсутствуют породы, экранирующие и перекрывающие проникновение газа в водную толщу. В результате газ мигрирует к поверхности по проницаемым вертикальным зонам, образуя стабильные в пространстве области газовых источников, проявляющиеся в виде многочисленных газовых струй. Многолетние наблюдения показывают, что газовые грифоны часто фиксируются преимущественно в одних и тех же местах. Например, объект с высоким дебитом газа, который располагается на Селенгинском мелководье в точке с координатами 52,1830° с. ш. 106,1177° в. д. и глубиной дна около 40 м наблюдается начиная с 2015 г. (15Б-40, 16Б-70, 17Б-37, 18Б-45, 19Б-1). При этом, все пять лет очаг разгрузки газа сохраняет высокую активность.

На глубинах, доступных для видеоаппаратуры, произведена видео- и фотосъемка дна в районах источников газа. Видеограммы подводных съемок доступны на Информационном сайте о состоянии недр Российской Федерации в разделе «Байкальская природная территория» макета программного

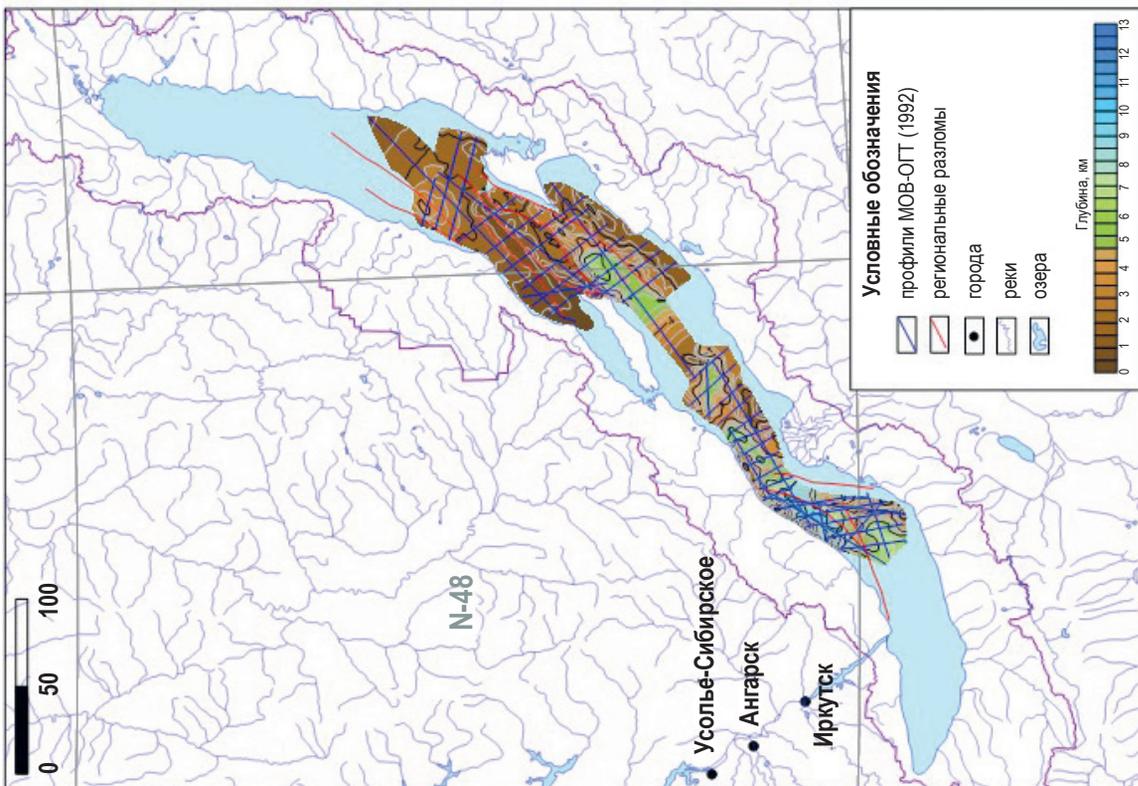


Рис. 14. Структурная карта по кровле дорифтового фундамента озера Байкал

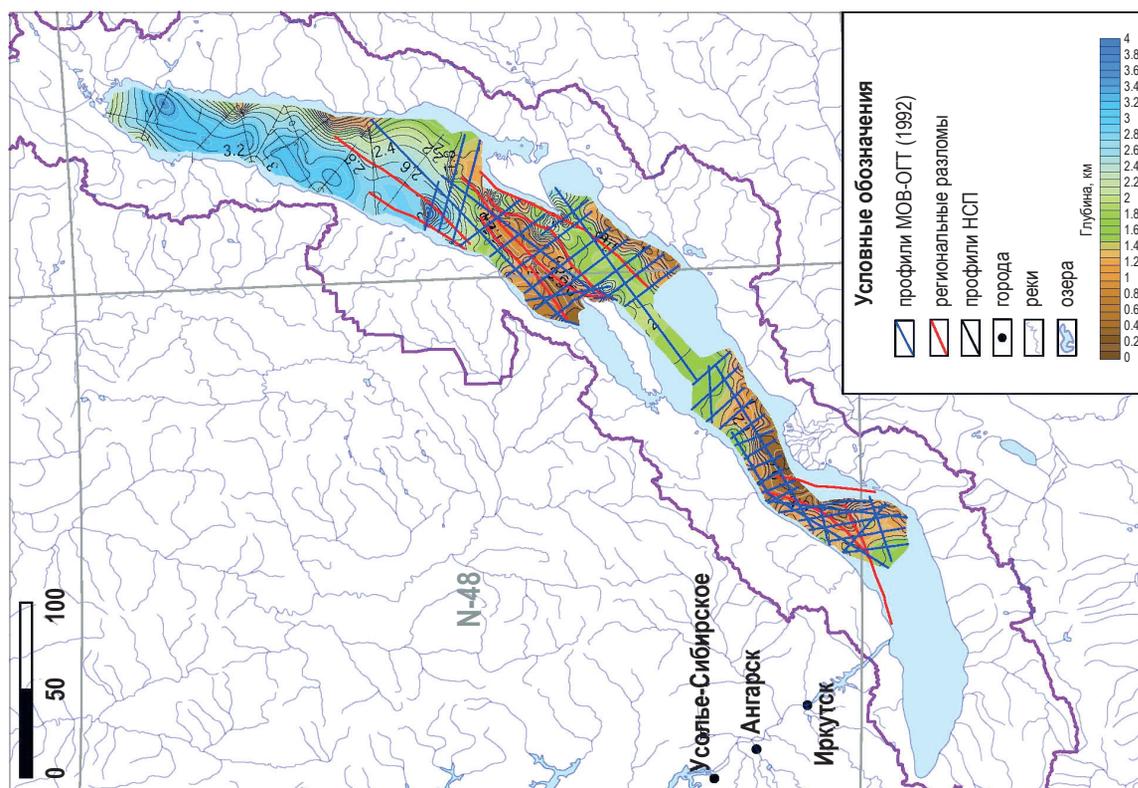


Рис. 13. Структурная карта по отражающему горизонту «B6»

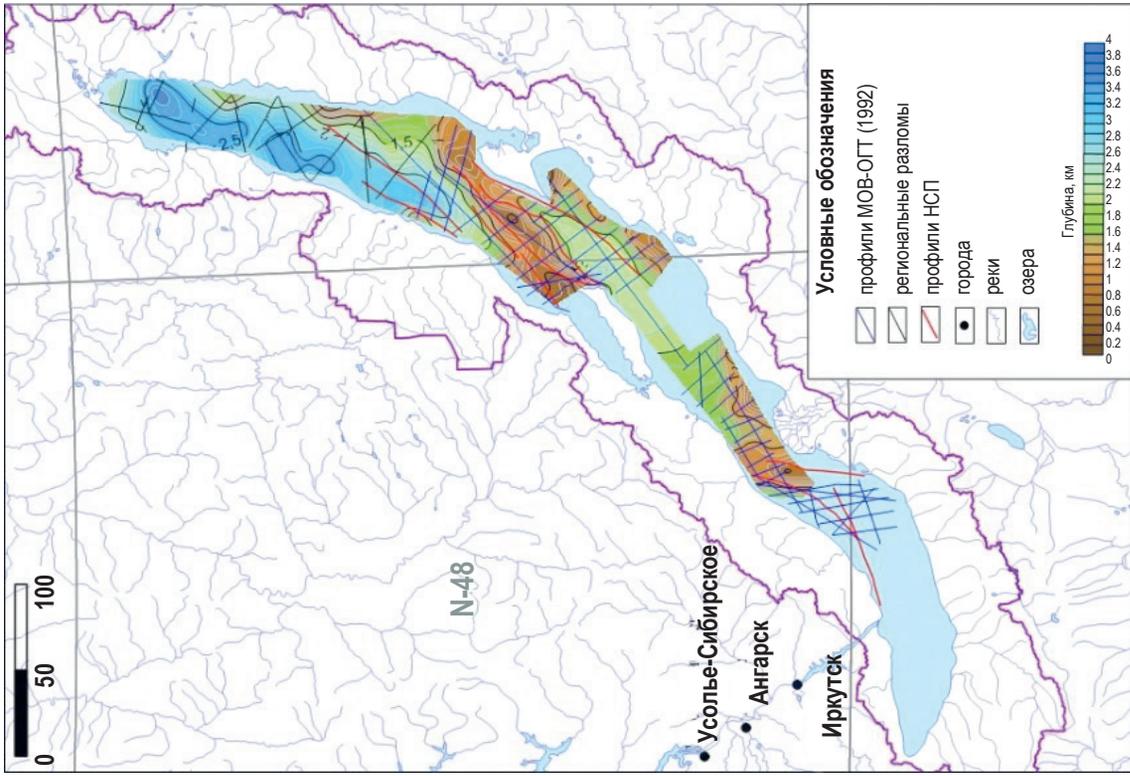


Рис. 16. Структурная карта по отражающему горизонту «В10»

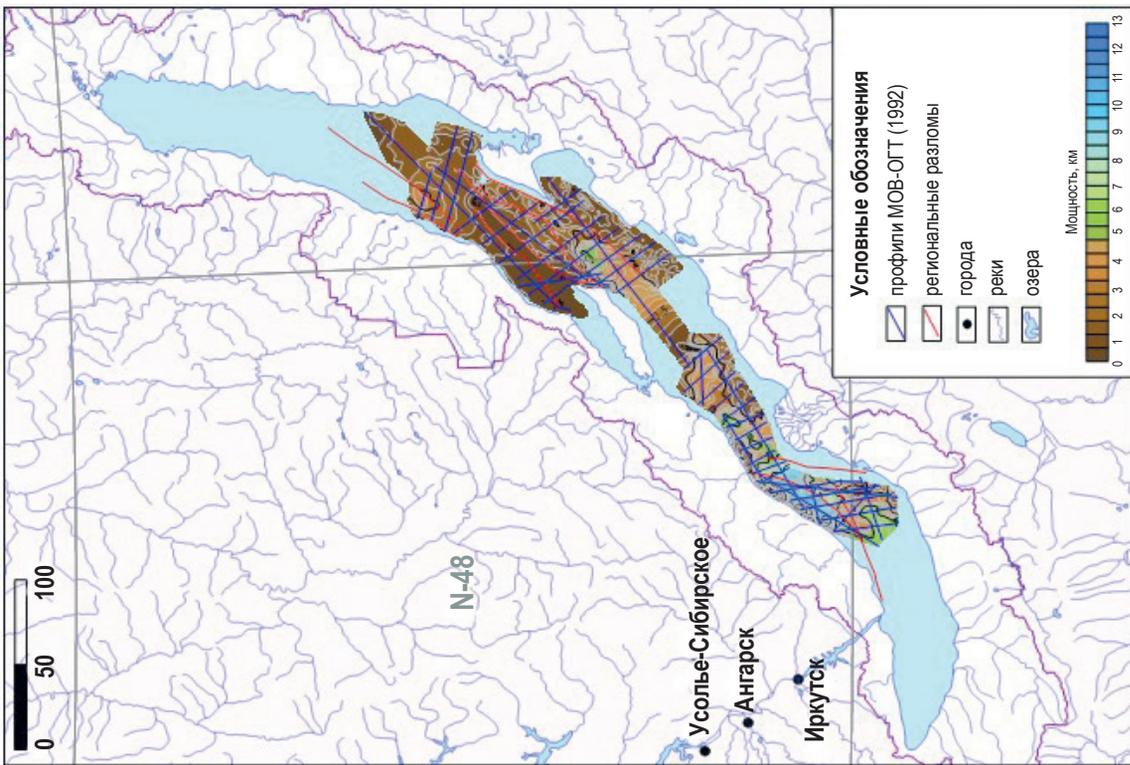


Рис. 15. Карта прогноза мощности мезо-кайнозойских отложений в границах акватории озера Байкал

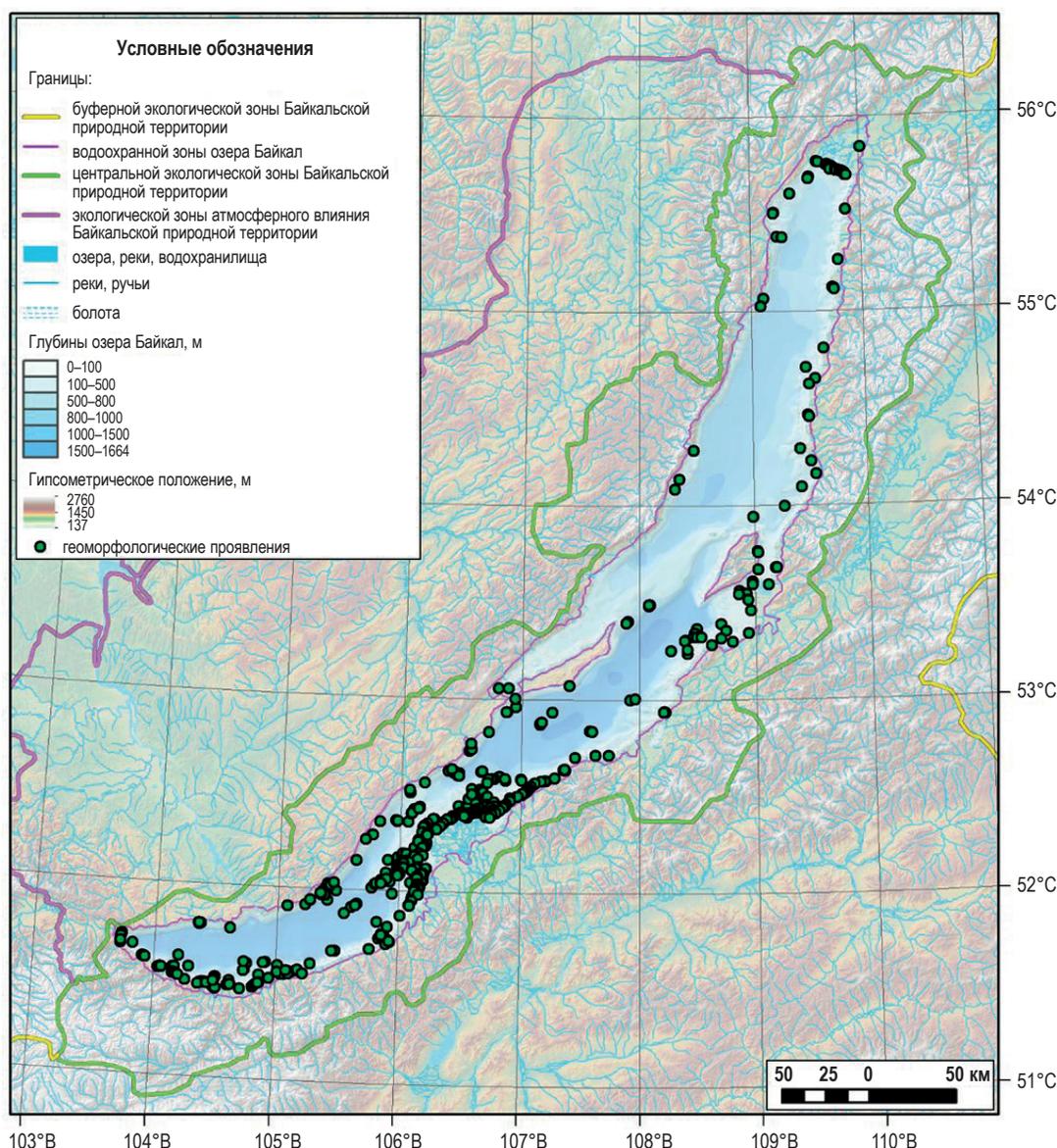


Рис. 17. Схема расположения основных проявлений углеводородов в ЦЭЗ БПТ по результатам полевых работ

модуля информационно-аналитической системы Государственного мониторинга состояния недр.

Еще одним типом газовых проявлений являются объекты, связанные с разрушением газовых гидратов. Все они формируются на больших глубинах и сопровождаются многими выявленными проявлениями газовых гидратов, таких как «Голоустное», «Таланка», «Горевой Утес» и др. При этом высота газового «факела» над уровнем дна достигает 400–500 м и более (рис. 18).

Отрицательное воздействие метана на организмы обусловлено его хорошей растворимостью в воде, что приводит к уменьшению концентрации кислорода и созданию анаэробных условий, не совместимых с жизнью гидробионтов. Масштабное губительное влияние газопоявлений на экосистему озера Байкал не установлено. В то же время отмечены случаи массовой гибели рыб и нерпы, которые могут быть связаны с выбросами

метана [7]. Возможно, существенное увеличение масштабов выхода газа происходит в моменты сильных землетрясений, что приводит к гибели животных и рыб от асфиксии. Кроме того, выделение газа приводит к изменению структуры льда, в результате чего в зимний период над газовыми грифонами уменьшается толщина ледового покрова, а весной образуются многочисленные «пропарины», что приводит к гибели людей и техники.

В то же время, активное функционирование хемо- и фотоавтотрофов в области выходов метана способствует активному образованию биомассы, образующей в экосистеме первый трофический уровень пищевой цепи. Поскольку между первым и последующими уровнями трофической цепи существует положительная корреляция, вполне объяснимой становится высокая продуктивность биоценозов в ряде областей акватории озера Байкал. Следовательно, глубинный метан, с одной

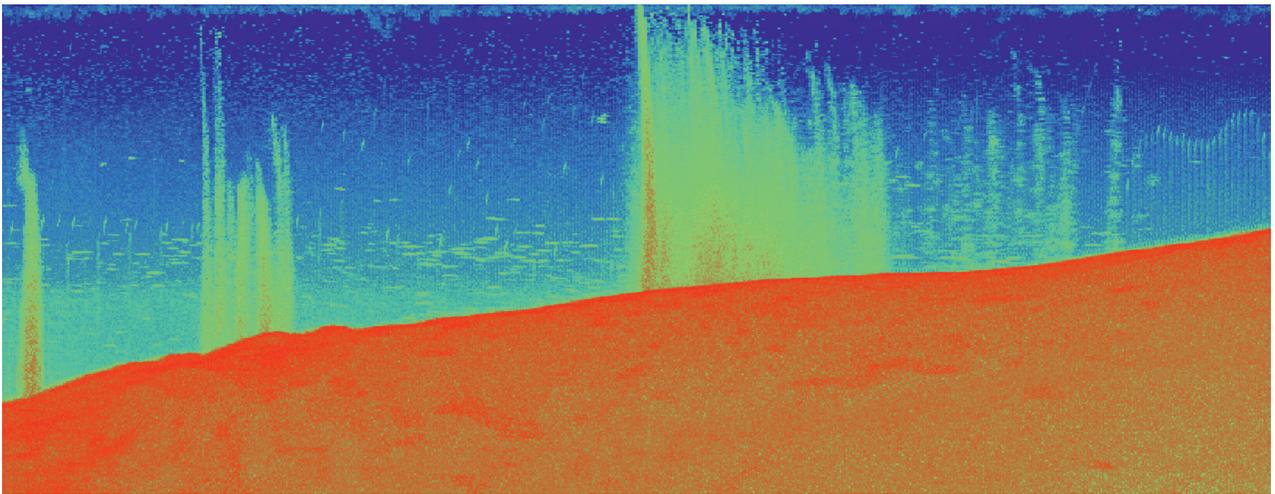


Рис. 18. Вид газовых струй в толще воды по данным многолучевого эхолотирования в районе проявления газовых гидратов Голоустное

стороны, вреден для аэробных организмов, с другой стороны, вносит дополнительный вклад в энергообеспечение, которое лежит в основе разнообразия и, соответственно, устойчивости экосистемы Байкала.

Важнейшими объектами миграции углеводородов для исследований на озере Байкал являются **донные проявления газовых кристаллогидратов**. В последние годы активным их изучением занимаются сотрудники Лимнологического института СО РАН. К настоящему времени в пределах акватории Южной и Центральной котловин ими выявлено более 50 точек, в которых удалось получить керн, содержащий газы гидраты [23; 28; 32].

В ходе экспедиций ФГБУ «ВСЕГЕИ» были изучены 12 наиболее крупных проявлений газовых кристаллогидратов, расположенных в Южной и Центральной котловинах озера Байкал, таких как «Мамай», «Кедровая», «Таланка», «Голоустное», «Маленький», проявление нефти и газовых кристаллогидратов «Горевой Утес» и др. (рис. 19). Гидратсодержащие структуры были исследованы с помощью комплекса геофизических методов (многолучевое эхолотирование и сейсмоакустическое профилирование) и прямых геологических наблюдений. Проведенные работы показали, что большинство проявлений располагается на гребнях межканьонных хребтов при их пересечении неотектоническими нарушениями. Наиболее глубоководные проявления связаны с «газо-вулканическими» структурами, приуроченными к активизированным нарушениям северо-восточного простирания.

На 11 объектах отобраны образцы кристаллогидратов (рис. 20), разных по морфологическим особенностям: массивные выделения, прожилковые и вкрапленные формы. В процессе обработки образцов газовых гидратов получены пробы газа и гидратной воды. Газохроматографический анализ выделенной газовой составляющей гидратов показал, что основным в ее составе является метан. Его доля в среднем составляет 90,7 об.%, и достигает 96 об.%. В небольшом количестве

проб выявлена примесь этана, которая в среднем составляет 0,26 об.%. Гидрохимические исследования состава гидратной воды показали, что относительный коэффициент концентрации элементов в гидратной воде относительно придонной ($[C_g(\text{гв})/C_g(\text{пв})]$), где $C_g(\text{гв})$ – средняя концентрация химического элемента в гидратной воде, а $C_g(\text{пв})$ – средняя концентрация химического элемента в придонной воде), составляет для: Al – 163; La – 141,8; Hf – 129,3; Y – 83,8; Fe – 36,9; Cu – 63,2; Bi – 53,1; Si – 34,3; Pb – 20,4; Cd – 20,1. Кроме того, для таких химических элементов как Li, Be, Mn, Co, Ni, Zn, As, Rb, Ag, W, Bi в отдельных образцах остаточной воды коэффициент концентрации относительно их фона в придонных водах может достигать нескольких десятков и более. Это свидетельствует о возможной активной мобилизации вещества в результате процессов природной миграции углеводородов.

Анализ полученных данных показывает, что источником метана как в донных выходах, так и в газовых кристаллогидратах является метан, образовавшийся в результате преобразования органического вещества, захороненного в многокилометровой толще подбайкальских осадков. Таким образом, весь метан в этих объектах является метаном катогенетическим (то есть термогенным). При этом «материнская» газовая смесь будет содержать и достаточные концентрации других, более тяжелых гомологов метана, в зависимости от степени катогенетического преобразования органического вещества и глубины источника газа. Кроме того, изотопная характеристика углерода, входящего в ее состав, будет достаточно неоднородной (разнообразной). О роли катогенетических процессов в формировании компонентов газового гидрата можно судить и по изотопному составу воды, оставшейся после удаления газовой фазы газового гидрата. Ее изотопные характеристики (от $-109,1$ до $-121,6$ dD‰ и от $-13,8$ до $14,9$ d ^{18}O ‰, VSMOW) говорят о существенно более тяжелом ее составе по сравнению с «легкими» водами озера

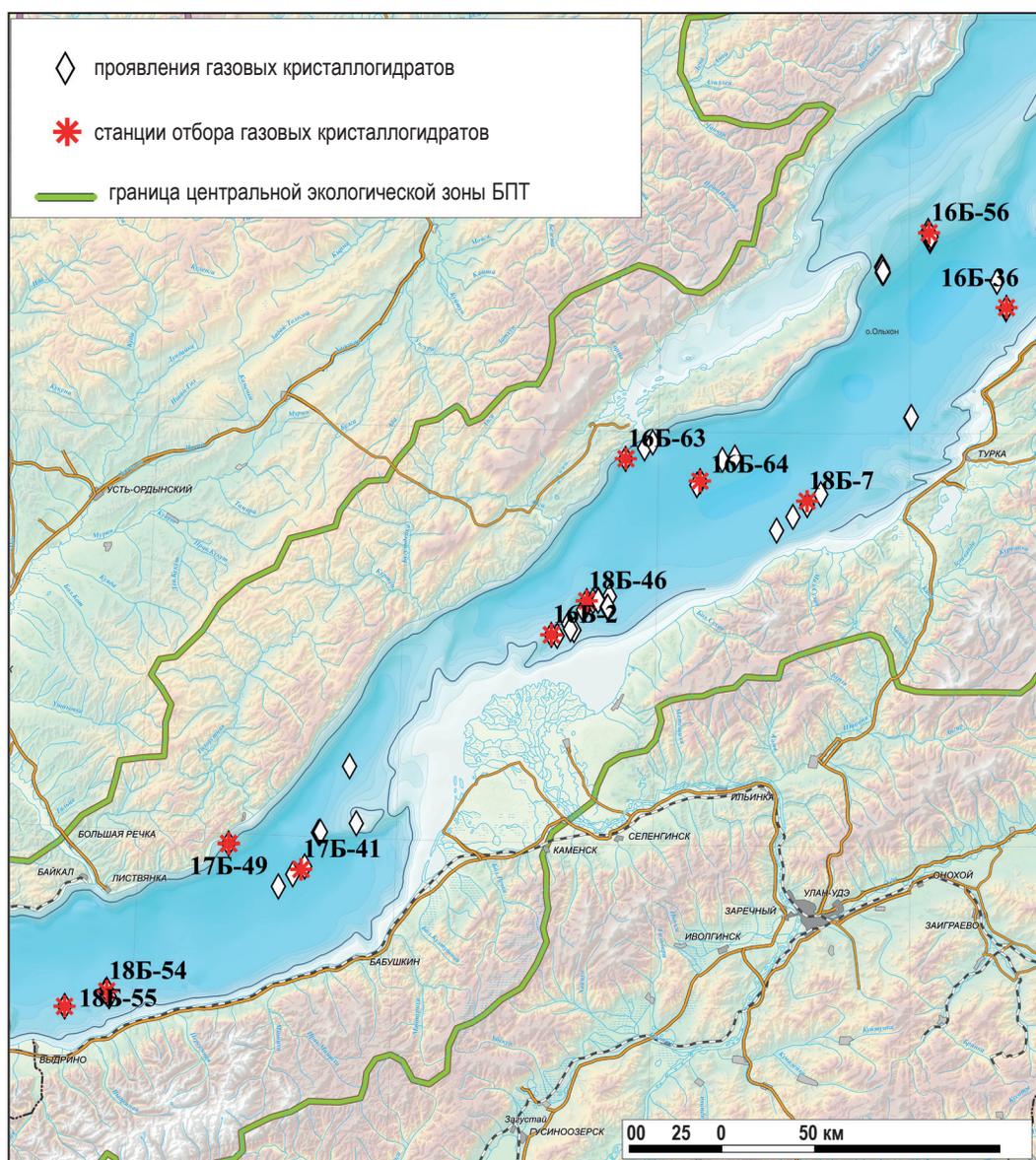


Рис. 19. Схема расположения отбора образцов газовых гидратов в Южной и Центральной котловинах озера Байкал (2016–2019 гг.)

Байкал, которые характеризуются низким содержанием дейтерия и ^{18}O (от -131 до -161 dD‰ и от $-15,9$ до $-20,7$ d ^{18}O ‰, VSMOW) и поэтому не могут рассматриваться в качестве составляющей компоненты при формировании газового кристаллогидрата.

Выходы нефти обнаружены только в акватории Байкала. Наиболее изученные находятся в прибрежной акватории озера севернее зал. Провал, напротив устьев рек Стволовая, Большая и Малая Зеленовская (мыс Толстый), в районе ст. Танхой. На поверхности воды они фиксируются в виде нефтяных slickов, общая площадь которых, по данным дешифрирования космоснимков, составляет около 22 км^2 .

В зимний период нефть встречается в виде капель во льду и в трещинах ледяного покрова.

Нефть, как правило, черная, тяжелая, вязкая. Она характеризуется высокой плотностью ($936,5 \text{ кг/м}^3$) и вязкостью ($40,6 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$), высокой смолистостью ($21,17\%$), низкой сернистостью ($0,32\%$), повышенной концентрацией твердого парафина ($2,77\%$) с высокой температурой плавления ($57 \text{ }^\circ\text{C}$) и высоким содержанием асфальтенов и асфальтогеновых кислот ($8,57\%$). Нефть представлена только высококипящими фракциями ($>200 \text{ }^\circ\text{C}$) и содержит $70,26\%$ углеводородов. В составе последних преобладают насыщенные УВ – $48,14\%$, ароматические – $22,12\%$. О ее происхождении и возрасте мнения исследователей расходятся. Возрастной диапазон колеблется от кембрия (докембрия) до кайнозоя. Описание этой нефти можно встретить с 1928 г. в работах В. Д. Рязанова и др. [15; 21; 23]. Подобная нефть обнаружена сотрудниками ВСЕГЕИ и Сибирского



Рис. 20. Нефть в ковше (ст. 16Б-36: 53,3042° с. ш., 108,3912° в. д.)

филиала «Росгеолфонд» в сентябре 2015 г., но не в озере, а на пляжной гальке.

Совершенно другая нефть обнаружена летом 2005 г. сотрудниками ЛИН СО РАН (г. Иркутск) с НИС «Верещагин». Место выхода нефти расположено в открытом Байкале в 7 км к западу–северо-западу от мыса Горевой Утес (к юго-западу от Баргузинского залива). Однако образцы нефти отобраны не были и исследования ее состава не проводились. В 2016 г. мощное выделение газа и нефти было зафиксировано эхолотом на дне (глубина по эхолоту 895 м) в точке с координатами 53,3042° с. ш., 108,3912° в. д. полевым отрядом ФГБУ «ВСЕГЕИ» (рис. 20). Нефть выходит активно, а на поверхности воды проявляется яркими радужными пленками. Проведенный пробоотбор показал, что нефть и газовые гидраты в разрезе донных отложений находятся совместно. В результате проведенной газовой хроматографии масс-спектрологии образца нефти, отобранной из ковша, определено, что она является продуктом глубокой деградации сырой нефти. На хроматограмме практически полностью отсутствуют пики n-алканов. Основная часть состава относится к неподеленным нафтено-ароматическим соединениям. Масла составляют 82,62 %, смолы суммарно представлены 15,32%, а асфальтены – 2,06%. Среди масел основная доля приходится на мета-

но-нафтеновые УВ – 70,86%, а ароматические УВ – 29,14% (табл. 2).

Анализ изотопно-фракционных кривых углерода образцов нефти, отобранных в разных районах озера Байкал, показал единство их нефтематеринского вещества. По общему изотопному составу углерода байкальская нефть схожа с нефтью районов Азербайджана и Пермского Приуралья, приуроченной к породам мелового и палеозойского возраста соответственно.

Битумы (байкериты) обнаружены на Байкале в начале XX столетия. Нефтяные битумы чаще всего представлены озокеритом, т. е. твердыми метановыми углеводородами. Они найдены на мысе Облом (в северной части залива Провал), вблизи пос. Ключи-Стволовая, в бух. Песчаная, у ст. Танхой. Битумы встречаются редко, в небольших объемах и не содержат вредных веществ. Береговым наземным отрядом ФГБУ «ВСЕГЕИ» в 2015–2016 гг. битумы были обнаружены в обнажениях углей, песчаников и песков. По своим свойствам они соответствуют тяжелой мальте, переходной к асфальту. Этот битум имеет, несомненно, нефтяную природу, т. е. представляет собой бывшую нефть, потерявшую в результате выветривания легкие дистиллятные фракции, слегка окисленную и, возможно, полимеризованную.

Грязевые вулканы и покмарки. Грязевые вулканы распространены во многих регионах, характеризующихся альпийским тектогенезом. Предположение об их наличии на байкальском дне было сделано В. П. Исаевым в 1998 г. В последующие годы «грязевые» вулканы были обнаружены в Тункинской и Баргузинской впадинах Байкальской рифтовой зоны [10].

Расположение выявленных грязевых вулканов свидетельствует о роли разрывных нарушений в их формировании. Не исключена генетическая связь с ними донных выходов газовых гидратов. Газовый вулканизм на Байкале, безусловно, опасен, прежде всего для людей, населенных пунктов и предприятий, расположенных в прибрежной зоне озера. Возможно, с катастрофическими извержениями горячего газа, которые происходили на озере Байкал в недалеком прошлом, связано и его название.

Таблица 2

Групповой и углеводородный состав нефти со станции 16Б-36

Групповой состав битумоида, вес. %				УВ состав масел, вес. %				Насыщенные УВ/ Ароматические УВ
Масла	Бензолные смолы	Спиртбензолные смолы	Асфальтены	Метано-нафтеновые	Моноароматические	Биароматические	Полиароматические	
82,62	9,91	5,41	2,06	70,86	9,84	6,55	12,75	2,43

Картирование грязевулканических структур имеет важное значение с точки зрения обеспечения безопасности населения и транспортного сообщения по льду озера в зимнее время.

Заключение. Использование современных технологий обработки сейсмических данных позволило повысить информативность сейсмических разрезов и уточнить геологическое строение озера Байкал. Установлены особенности строения осадочного чехла и фундамента: Центральная и Южная котловины Байкала сложены мезо-кайнозойскими осадочными отложениями средней мощностью до 9–10 км и разделены выступами фундамента, контролируемые крупными дизъюнктивными нарушениями; минимальная мощность осадочного чехла (первые сотни метров) наблюдается в районе Академического хребта, максимальная отмечена в юго-западной части внешнего края дельты Селенги; плейстоцен-голоценовый комплекс пород, ограниченный границей несогласия «В10», вызванной нюрганской тектонической фазой, формирует огромную седиментационную ванну мощностью до 3,1 км в Северной котловине озера.

В результате работ был решен ряд важных геологических задач. Выявлены основные региональные закономерности проявления опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в ЦЭЗ БПТ. Создан и постоянно пополняется (актуализируется) электронный каталог проявлений УВ и зон их разгрузки. Кроме непосредственно выходов углеводородов в каталоге зафиксированы в качестве признаков миграции углеводородов следующие виды проявлений:

- геоморфологические проявления в рельефе дна;
- физические проявления в водной среде и на льду (пропарина и их скопления, утончение льда);
- химические проявления в водной среде и донных отложениях (аномальные содержания метана, гомологов метана, непредельных УВ и других химических веществ);
- аномалии быстро меняющихся физико-химических показателей (E_h , pH, УЭП, t°).

Составлен и постоянно обновляется Электронный атлас карт ЦЭЗ БПТ масштаба 1 : 1 000 000 и врезками масштаба 1 : 200 000 с тематическими слоями, отражающими расположение объектов миграции углеводородов. Проведено районирование территории по степени активности процессов, связанных с миграцией углеводородов и выделены следующие районы.

Районы с высокой степенью активности характеризуются постоянно фиксируемым проявлением процессов миграции углеводородов и наличием таких форм проявления, как струи газа, капли нефти, выходящие из поверхности дна, они же в водной толще, нефтяная пленка на поверхности воды, пропарина во льду, капли нефти на поверхности льда. Зоны постоянной разгрузки представляют наибольшую опасность – проваливание под лед людей и автотранспорта, замор рыб и нерпы от асфиксии.

Районы со средней степенью активности характеризуются формами проявления, которые либо эпизодически активны (разгрузка фиксируется 1 раз в несколько лет и реже), либо которые имеют признаки того, что разгрузка происходила когда-либо. Это такие формы проявления, как неактивные в настоящее время грязевые вулканы и эпизодически проявляющиеся кольцевые образования на льду. Зоны эпизодической разгрузки могут представлять опасность только в период активизации процессов миграции углеводородов.

Районы, где отсутствуют активные формы проявления процессов миграции углеводородов, представлены участками, где предполагается или установлено наличие залежей газовых кристаллогидратов, не имеющие признаков активной разгрузки ни в настоящее время, ни в прошлом. На таких участках процессы могут активизироваться и представлять опасность только при катастрофически сильных внешних воздействиях (землетрясения, критическое снижение уровня воды в озере). Достоверных сведений о случаях такой активизации и связанным с этим разрушением газогидратного слоя со значительным объемом разгрузки углеводородных газов, представляющим опасность, в настоящее время нет. Также к этой категории районирования можно отнести участки, на которых к настоящему моменту какие-либо проявления или признаки наличия углеводородов не зафиксированы.

Полученные данные обеспечили повышение степени изученности опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в ЦЭЗ БПТ, что позволило обосновать места размещения пунктов их мониторинга и разработать актуальную программу мониторинга этих опасных процессов.

Большое значение для понимания региональных закономерностей проявления опасных процессов, связанных с природной миграцией углеводородов, имеют геоморфологические исследования и изучение литологического состава донных отложений. В результате этих работ составлены актуальные Геоморфологическая карта дна озера Байкал и Литологическая карта поверхности дна в масштабе 1 : 1 000 000 с детальными врезками для наиболее интересных участков акватории озера.

Комплексные геофизические исследования показали их наибольший эффект при выявлении акустических аномалий, связанных с процессами миграции природных углеводородов на озере Байкал. Таким образом, была подтверждена целесообразность проведения опережающих геофизических исследований, что позволяет выделить перспективные площади для дальнейшего изучения. Кроме того, выявление новых объектов позволило более объективно подходить к анализу их пространственного расположения и условий их формирования и особенностей процессов миграции углеводородов.

Эффективность полученных результатов состоит в получении новых фактических геолого-геофизических и аналитических данных, необходимых для изучения и прогноза опасных геологических

процессов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории с учетом ее особенностей и перспектив социально-экономического развития. Результаты выполненных работ обеспечили повышение степени изученности и прогнозирования опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в ЦЭЗ БПТ.

Авторы выражают благодарность А. Ф. Морозову, без решающей роли которого эти чрезвычайно интересные и практически значимые исследования не были бы осуществлены, за многолетнюю поддержку на всех стадиях выполнения работ, а также сотрудникам Лимнологического института СО РАН, Байкальского Музея Иркутского научного центра СО РАН, ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» за участие и помощь в проведении изысканий.

Исследования выполнены в рамках реализации ФГБУ «ВСЕГЕИ» мероприятий ФЦП «Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие Байкальской природной территории на 2012–2020 годы» по объекту «Геологическое изучение опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидраты метана в осадках озера Байкал / М. И. Кузьмин, Г. В. Калмычков, А. Д. Дучков и др. // Геология рудных месторождений. – 2000. – Т. 42, № 1. – С. 25–37.
2. Гинсбург Г. Д., Соловьев В. А. Субмаринные газовые гидраты. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994. – 199 с.
3. Гриценко С. А. Изображение геологических разрезов и определение скоростей методом общей глубинной точки. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2014. – 120 с.
4. Гриценко С. А., Егорова Н. В. К вопросу о сейсмостратиграфии, мультифокусировании и интерполяции сейсмических разрезов (математический обзор) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2018. – Т. 13, № 2.
5. Десятилетние итоги проекта «Байкал-бурение» / М. И. Кузьмин, Е. Б. Карабанов, Т. Каваи и др. // Геология и геофизика. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – Т. 42, № 1–2. – 390 с.
6. Ефремова А. Г., Гритчина Н. Д. Газогидраты в морских осадках и проблема их практического использования // Геология нефти и газа. – 1981. – № 2. – С. 32–35.
7. Землетрясение 1912 года на южном Байкале: следы в донных осадках и выброс газа в водную толщу / Е. Г. Вологина, М. Штурм, Я. Б. Радзиминович, С. С. Воробьева, А. А. Щетников // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 12. – С. 1744–1755.
8. Зоненшайн Л. П., Казьмин В. Г., Кузьмин М. Н. Новые данные по истории Байкала: результаты наблюдения с подводных обитаемых аппаратов // Геотектоника. – 1995. – № 3. – С. 46–58.
9. Изучение байкальской рифтовой впадины методом сейсмической томографии на преломленных волнах / С. В. Крылов, В. С. Селезнев, В. М. Соловьев, Г. В. Петрик, И. Ф. Шелудько // Геофизика, Докл. РАН. – 1995. – Т. 345, № 5. – С. 674–677.
10. Исаев В. П. Миграция углеводородов как физико-химический процесс формирования месторождений нефти и газа // Генезис нефти и газа: сб. науч. ст. – М.: ГЕОС, 2003. – С. 129–131.
11. К-Аг датирование палеоценовой коры выветривания в Байкальском регионе / Н. А. Логачев, Л. С. Брандт, С. В. Рассказов, А. В. Иванов, С. В. Брандт, А. А. Конев, А. М. Пясова // Докл. РАН. – 2002. – Т. 385, № 6. – С. 648–650.
12. Коллектив участников проекта «Байкал-бурение». Позднекайнозойская палеоклиматическая запись в осадках озера Байкал (по результатам исследования 600-метрового керна глубокого бурения) // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41 (1). – С. 3–32.
13. Логачев Н. А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44, № 5. – С. 391–406.
14. Мац В. Д. Байкальский рифт: плиоцен (миоцен) – четвертичный эпизод или продукт длительного развития с позднего мела под воздействием различных тектонических факторов. Обзор представлений // Геодинамика и тектонофизика. – 2015. – Т. 6, № 4. – С. 467–489. DOI:10.5800/GT/2015-6-4-0190.
15. Мац В. Д. Возраст и геодинамическая природа осадочного выполнения Байкальского рифта // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 9. – С. 1219–1244.
16. Нефтегазоносность отложений озера Байкал / А. Э. Конторович, В. А. Каширцев, В. И. Москвин и др. // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 12. – С. 1346–1356.
17. О возрасте молассовых толщ Байкальской рифтовой зоны по фауне мелких млекопитающих / О. М. Адаменко, Р. С. Адаменко, В. А. Белова, А. С. Ендрихинский // Среда и жизнь на рубежах эпох кайнозоя в Сибири и на Дальнем Востоке. – Новосибирск: Наука, 1984. – С. 189–193.
18. Особенности строения осадочной толщи оз. Байкал по результатам многоканальной сейсмической съемки (1989 г.) / Д. Р. Хатчинсон, А. Ю. Гольмшток, Л. П. Зоненшайн, Т. К. Мур, К. А. Шольц, К. Д. Клитгорд // Геология и геофизика. – 1993. – Т. 34, № 10–11. – С. 25–36.
19. Отложения Танхойского третичного поля, Южнобайкальская впадина: стратиграфия, корреляция и структурные перестройки в Байкальском регионе / С. В. Рассказов, Н. А. Лямина, И. В. Лузина, Г. П. Черняева, И. С. Чувашова, М. В. Усольцева // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5, № 4. – С. 993–1032.
20. Оценки теплового потока на озере Байкал по сейсмическим данным о нижней границе слоя газовых гидратов / А. Я. Гольмшток, А. Д. Дучков, Д. Р. Хатчинсон и др. // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38, № 10. – С. 1677–1691.
21. Пузырьковые выходы газа из донных отложений / М. М. Макаров, Д. А. Лопаткин, Н. Г. Гранин и др. // Экологический атлас бассейна оз. Байкал. – 2014. – URL: <http://bic.iwlearn.org/ru/atlas/atlas/138-puzyrkovyevyhody-gaza-iz-donnyh-otlozhenii-map> (дата обращения: 18.04.2023).
22. Пуцилло В. Г., Миронов С. И. Нефти, битумы и битуминозные породы района оз. Байкал // Нефти и битумы Сибири. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – С. 7–53.
23. Разломные зоны и поля напряжений в осадках озера Байкал: тектонофизическая интерпретация гидроакустических и геофизических данных / К. Ж. Семинский, А. В. Черемных, О. М. Хлыстов, Г. Г. Ахманов // Геология и геофизика. – 2022. – № 7. – С. 1016–1034.
24. Самсонов В. В. Происхождение байкальской нефти и проблемы нефтегазоносности Бурятии // Проблемы Сибирской нефти. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963. – С. 127–150.
25. Современная геодинамика и гелиогеодинамика: учеб. пособие / К. Г. Леви, Н. В. Задонина, С. А. Язев, В. И. Воронин. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. – 539 с.
26. Суворов В. Д., Мишенькина З. Р. Структура осадочных отложений и фундамента под южной котловиной озера Байкал по данным КМПВ // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46, № 11. – С. 1159–1167.
27. Физико-химическая модель образования газовых гидратов с различным структурным типом на грязевом

вулкани К-2 (Кукуйский каньон, озеро Байкал) / А. Ю. Манков, О. М. Хлыстов, А. Хачикубо, А. Г. Огиенко // Геология и геофизика. – 2013. – № 4. – С. 615–626.

28. Хлыстов О. М. Новые находки скоплений газовых гидратов озера Байкал // Четвертая Верещагинская Байкальская конференция. – Иркутск : Изд-во ЛИИ СО РАН, 2005. – С. 208–209.

29. Bottom simulating reflector in Lake Baikal / R. D. Hutchinson, A. J. Golmshtok, C. A. Scholz et al. // EOS. – 1991. – Vol. 72. – P. 307.

30. Brink U. S., Taylor M. H. Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting // Journal of Geophysical Research. – 2002. – Vol. 107, no. 7. – Pp. 2–15.

31. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data / D. R. Hutchinson, A. J. Golmshtok, L. P. Zonenshain, T. C. Moore, C. A. Scholz, K. D. Klitgord // Geology. – 1992. – Vol. 20, iss. 7. – Pp. 589–592. DOI: 10.1130/0091-7613(1992)020<0589:DATFOT>2.3.CO;2.

32. Gas hydrates in Lake Baikal / O. M. Khlystov, A. V. Khabuev, H. Minami, A. Hachikubo, A. A. Krylov // Limnology and Freshwater Biology. – 2018. – No. 1. – Pp. 66–70. DOI: 10.31951/2658-3518-2018-A-1-66 (70556).

33. Kiselev A. I. Volcanism of the Baikal rift zone // Tectonophysics. – 1987. – Vol. 143. – Pp. 235–244.

34. Mats V. D. Late cretaceous and cenozoic stratigraphy of the Baikal Rift sediments // Stratigraphy and Geological Correlation. – 2013. – Vol. 21, iss. 6. – Pp. 637–651.

35. Mats V. D. The structure and development of the Baikal rift depression // Earth-Science Reviews. – 1993. – Vol. 34, iss. 2. – Pp. 81–118.

36. Sedimentation and subsidence patterns in the central and north basins of Lake Baikal from seismic stratigraphy / T. C. Moore Jr., K. D. Klitgord, A. J. Golmshtok, E. Weber // Geological Society of America Bulletin. – 1997. – Vol. 109, no. 6. – Pp. 746–766.

REFERENCES

1. Kuz'min M. I., Kalmychkov G. V., Duchkov A. D. et al. Gidraty metana v osadkakh ozera Baykal [Methane Hydrates in Lake Baikal Sediments]. *Geology of ore deposits*, 2000, vol. 42, no. 1, pp. 25–37.

2. Ginsburg G. D., Solov'ev V. A. Submarinnye gazovye gidraty [Submarine gas hydrates]. St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 1994, 199 p.

3. Gritsenko S. A. Izobrazhenie geologicheskikh razrezov i opredelenie skorostey metodom obshchey glubinnoy tochki [Image of geological sections and determination of velocities by the method of the General depth point]. St. Petersburg, Izdatel'stvo VSEGEI, 2014, 120 p.

4. Gritsenko S. A., Egorova N. V. K voprosu o seismostratigrafii, mull'tifokusirovaniy i interpolyatsii seismicheskikh razrezov (matematicheskiy obzor) [On the issue of seismostratigraphy, multifocusing and interpolation of seismic sections (mathematical review)]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2018, vol. 13, no. 2.

5. Kuz'min M. I., Karabanov E. B., Kavai T. et al. Desyatiletnie itogi proekta «Baykal-burenii» [Ten-year results of the Baikal-drilling project]. *Geology and Geophysics*. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN, 2001, vol. 42, no. 1–2, 390 p.

6. Efremova A. G., Gritchina N. D. Gazogidraty v morskikh osadkakh i problema ikh prakticheskogo ispol'zovaniya [Gas hydrates in marine sediments and the problem of their practical use]. *Geology of Oil and Gas*, 1981, no. 2, pp. 32–35.

7. Vologina E. G., Shturm M., Radziminovich Ya. B. et al. Zemletryasenie 1912 goda na yuzhnom Baykale: sledy v donnykh osadkakh i vybros gaza v vodnyuyu tolshchu [1912 earthquake in southern Baikal: traces in bottom sediments and gas release into the water column]. *Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 12, pp. 1744–1755.

8. Zonenshain L. P., Kaz'min V. G., Kuz'min M. N. Novye dannye po istorii Baykala: rezul'taty nablyudeniya s podvodnykh obitaemykh apparatov [New data on the history of Baikal: results of observations from underwater manned vehicles]. *Geotectonics*, 1995, no. 3, pp. 46–58.

9. Krylov S. V., Seleznev V. S., Solov'ev V. M. et al. Izuchenie baykal'skoy riftovoy vpadiny metodom seismicheskoy tomografii na prelomlennykh volnakh [Study of the Baikal rift basin by refracted wave seismic tomography]. *Geophysics, Reports of the Academy of Sciences*, 1995, vol. 345, no. 5, pp. 674–677.

10. Isaev V. P. Migratsiya uglevodorodov kak fiziko-khimicheskiy protsess formirovaniya mestorozhdeniy nefiti i gaza [Migration of hydrocarbons as a physical and chemical process of formation of oil and gas fields]. *The Genesis of Oil and Gas*. Moscow, GEOS, 2003, pp. 129–131.

11. Logachev N. A., Brandt L. S., Rasskazov S. V. et al. K-Ar datirovanie paleotsenovoy kory vyvetrivaniya v Baykal'skom regione [K-Ar dating of the Paleocene weathering crust in Baikalskoe region]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 2002, vol. 385, no. 6, pp. 648–650.

12. Kollektiv uchastnikov proekta «Baykal-burenii». Pozdnekaynozoyckaya paleoklimaticheskaya zapis' v osadkakh ozera Baykal (po rezul'tatam issledovaniya 600-metpovogo kerna glubokogo bureniya) [A team of participants in the Baikal-Burenii project. Late Cenozoic paleoclimatic record in the sediments of Lake Baikal (based on the results of a study of a 600-meter deep drilling core)]. *Geology and Geophysics*, 2000, vol. 41 (1), pp. 3–32.

13. Logachev N. A. Istoriya i geodinamika Baykal'skogo rifta [History and Geodynamics of the Baikal Rift]. *Geology and Geophysics*, 2003, vol. 44, no. 5, pp. 391–406.

14. Mats V. D. Baykal'skiy rift: plitsen (miotsen) – chetvertichnyy epizod ili produkt dlitel'nogo razvitiya s pozdnego mela pod vozdeystviem razlichnykh tektonicheskikh faktorov. Obzor predstavleniy [The Baikal Rift: Pliocene (Miocene) is a Quaternary episode or a product of a long development since the Late Cretaceous under the influence of various tectonic factors. Review of representations]. *Geodynamics and Tectonophysics*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 467–489. DOI:10.5800/GT-2015-6-4-0190.

15. Mats V. D. Vozrast i geodinamicheskaya priroda osadochnogo vypolneniya Baykal'skogo rifta [Age and geodynamic nature of the sedimentary filling of the Baikal Rift]. *Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 9, pp. 1219–1244.

16. Kontorovich A. E., Kashirtsev V. A., Moskvina V. I. et al. Neftegazonosnost' otlozheniy ozera Baykal [Oil and gas potential of Lake Baikal sediments]. *Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 12, pp. 1346–1356.

17. Adamenko O. M., Adamenko R. S., Belova V. A. et al. O vozraste molassovykh tolshch Baykal'skoy riftovoy zony po faune melkikh mlekopitayushchikh [On the age of the molasse sequences of the Baikal rift zone according to the fauna of small mammals]. *Environment and life at the boundaries of the Cenozoic eras in Siberia and the Far East*. Novosibirsk, Nauka, 1984, pp. 189–193.

18. Khatchinson D. R., Gol'mshok A. Yu., Zonenshain L. P. et al. Osobennosti stroeniya osadochnoy tolshchi oz. Baykal po rezul'tatam mnogokanal'noy seismicheskoy s'emki (1989 g.) [Features of the structure of the sedimentary strata of the lake. Baikal according to the results of multichannel seismic survey (1989)]. *Geology and Geophysics*, 1993, vol. 34, no. 10–11, pp. 25–36.

19. Rasskazov S. V., Lyamina N. A., Luzina I. V. et al. Otlozheniya Tankhoyskogo tretichnogo polya, Yuzhnoy baykal'skaya vpadina: stratigrafiya, korrelyatsiya i strukturnyye perestroyki v Baykal'skom regione [Deposits of the Tankhoi tertiary field, South Baikal depression: stratigraphy, correlation and structural changes in the Baikal region]. *Geodynamics and geotectonics*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 993–1032.

20. Gol'mshok A. Ya., Duchkov A. D., Khatchinson D. R. et al. Otsenki teplovogo potoka na ozere Baykal po seismicheskim dannym o nizhney granitse sloya gazovykh

gidratov [Estimates of the heat flow at Lake Baikal based on seismic data on the lower boundary of the gas hydrate layer]. *Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 10, pp. 1677–1691.

21. Makarov M. M., Lopatkin D. A., Granin N. G. et al. Puzыр'-kovye vykhody gaza iz donnykh otlozheniy [Bubble outcrops of gas from bottom sediments]. *Ecological Atlas of Lake Baikal Basin*, 2014, URL: <http://bic.iwlearn.org/ru/atlas/atlas/138-puzыrkovyey-vyhody-gaza-iz-donnykh-otlozheniy-map> (18.04.2023).

22. Putsillo V. G., Mironov S. I. Nefti, bitumy i bituminoznye porody rayona oz. Baykal [Oil, bitumen and bituminous rocks of the lake area. Baikal]. *Oils and Bitumens of Siberia*. Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR, 1958, pp. 7–53.

23. Seminskiy K. Zh., Cheremnykh A. V., Khlystov O. M. et al. Razlomnye zony i polya napryazheniy v osadkakh ozera Baykal: tektonofizicheskaya interpretatsiya gidroakusticheskikh i geofizicheskikh dannykh [Fault zones and stress fields in Lake Baikal sediments: tectonophysical interpretation of hydroacoustic and geophysical data]. *Geology and Geophysics*, 2022, no. 7, pp. 1016–1034.

24. Samsonov V. V. Proiskhozhdenie baykal'skoy nefti i problemy neftegazonosnosti Buryatii [Origin of Baikal oil and problems of oil and gas potential in Buryatia]. *Problems of Siberian oil*. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO AN SSSR, 1963, pp. 127–150.

25. Levi K. G., Zadonina N. V., Yazev S. A. et al. Sovremennaya geodinamika i geliogeodinamika: ucheb. posobie [Modern geodynamics and heliogeodynamics: proc. allowance]. Irkutsk, IGU publishing house, 2012, 539 p.

26. Suvorov V. D., Mishen'kina Z. R. Struktura osadochnykh otlozheniy i fundamenta pod yuzhnoy kotlovinoy ozera Baykal po dannym KMPV [The structure of sedimentary deposits and the basement under the southern basin of Lake Baikal according to the data of the KMPV]. *Geology and Geophysics*, 2005, vol. 46, no. 11, pp. 1159–1167.

27. Manakov A. Yu., Khlystov O. M., Khachikubo A. et al. Fiziko-khimicheskaya model' obrazovaniya gazovykh gidratov

s razlichnym strukturnym tipom na gryazevom vulkane K-2 (Kukuyskiy kan'on, ozero Baykal) [Physico-chemical model of the formation of gas hydrates with different structural types on the K-2 mud volcano (Kukui Canyon, Lake Baikal)]. *Geology and Geophysics*, 2013, no. 4, pp. 615–626.

28. Khlystov O. M. Novye nakhodki skopleniy gazovykh gidratov ozera Baykal [New finds of accumulations of gas hydrates in Lake Baikal]. *The Fourth Vereshchagin Baikal Conference*. Irkutsk, publishing house LIN SO RAN, 2005, pp. 208–209.

29. Hutchinson R. D., Golmshtok A. J., Scholz C. A. et al. Bottom simulating reflector in Lake Baikal. *EOS*, 1991, vol. 72, p. 307.

30. Brink U. S., Taylor M. H. Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting. *Journal of Geophysical Research*, 2002, vol. 107, no. B7, pp. 2–15.

31. Hutchinson D. R., Golmshtok A. J., Zonenshain L. P. et al. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data [Electronic resource]. *Geology*, 1992, vol. 20, iss. 7, pp. 589–592, DOI: 10.1130/0091-7613(1992)020<0589:DATFOT>2.3.CO;2.

32. Khlystov O. M., Khabuev A. V., Minami H. et al. Gas hydrates in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology*, 2018, no. 1, pp. 66–70, DOI: 10.31951/2658-3518-2018-A-1-66 (70556).

33. Kiselev A. I. Volcanism of the Baikal rift zone. *Tectonophysics*, 1987, vol. 143, pp. 235–244.

34. Mats V. D. Late cretaceous and cenozoic stratigraphy of the Baikal Rift sediments. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2013, vol. 21, iss. 6, pp. 637–651.

35. Mats V. D. The structure and development of the Baikal rift depression. *Earth-Science Reviews*, 1993, vol. 34, iss. 2, pp. 81–118.

36. Moore Jr. T. C., Klitgord K. D., Golmshtok A. J. et al. Sedimentation and subsidence patterns in the central and north basins of Lake Baikal from seismic stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 1997, vol. 109, no. 6, pp. 746–766.

Петров Олег Владимирович – чл.-корр. РАН, доктор геол.-минерал. наук, доктор экон. наук, ген. директор, ВСЕГЕИ¹. <OPetrov@vsegei.ru>

Ларичев Андрей Иванович – канд. геол.-минерал. наук, зам. ген. директора, ВСЕГЕИ¹. <Andrey_Larichev@vsegei.ru>

Шахвердов Вадим Азимович – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹.

<Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>

Брылина Анастасия Владимировна – канд. геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ¹.

<Anastasiya_Brilina@vsegei.ru>

Кропачев Юрий Петрович – вед. инженер, ВСЕГЕИ¹. <Yuri_Kropachev@vsegei.ru>

Дронь Олег Владимирович – инженер 1-й категории, ВСЕГЕИ¹. <Oleg_Dron@vsegei.ru>

Исаев Виктор Петрович – доктор геол.-минерал. наук, гл. геолог, ООО «Байкальский центр»². <isaevvp@yandex.ru>

Кичигин Андрей Геннадьевич – инженер, ООО «Байкальский центр»². <kag38rus@gmail.com>

Лыгин Алексей Михайлович – начальник отдела, Гидроспецгеология³. <info@specgeo.ru>

Petrov Oleg Vladimirovich – Corresponding Member of RAS, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Doctor Economic Sciences, Director General, VSEGEI¹. <OPetrov@vsegei.ru>

Larichev Andrey Ivanovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy General Director, VSEGEI¹.

<Andrey_Larichev@vsegei.ru>

Shakhverdov Vadim Azimovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, VSEGEI¹.

<Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>

Brylina Anastasiya Vladimirovna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI¹.

<Anastasiya_Brilina@vsegei.ru>

Kropachev Yuriy Petrovich – Leading Engineer, VSEGEI¹. <Yuri_Kropachev@vsegei.ru>

Dron Oleg Vladimirovich – Engineer, VSEGEI¹. <Oleg_Dron@vsegei.ru>

Isaev Viktor Petrovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Geologist, Baikal Center LLC².

<isaevvp@yandex.ru>

Kichigin Andrey Gennadevich – Engineer, Baikal Center LLC². <kag38rus@gmail.com>

Lygin Aleksey Mikhaylovich – Head of Department, Gidrospetsgeologiya³. <info@specgeo.ru>

- ¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.
A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.
- ² ООО «Байкальский центр». Ул. Декабрьских Событий, 29, Иркутск, Россия, 664007.
Baikal Center LLC. 29 Ul. Dekabr'skikh Sobytiy, Irkutsk, Russia, 664007.
- ³ Гидроспецгеология. Ул. Маршала Рыбалко, 4, Москва, Россия, 123060.
Gidrospetsgeologiya. 4 Ul. Marshala Rybalko, Moscow, Russia, 123060.

УДК 551.312.4.051(282.256.341)
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_29-47

Д. В. Рябчук, О. А. Ковалева, Д. В. Прищепенко,
А. Ю. Сергеев, Е. Н. Нестерова (ВСЕГЕИ)

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОВЕРХНОСТНЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА БАЙКАЛ И СОВРЕМЕННЫЕ СЕДИМЕНТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

По результатам анализа материалов ранее выполнявшихся исследований и ежегодных полевых геолого-геофизических работ и комплекса лабораторных исследований ФГБУ «ВСЕГЕИ» (2015–2020 гг.), впервые для дна котловины озера Байкал составлена литологическая карта дна акватории масштаба 1 : 500 000. В статье рассмотрена генетическая типизация и закономерности распределения поверхностных донных отложений, охарактеризованы современные седиментационные процессы озерной котловины.

Ключевые слова: осадконакопление, гранулометрический состав, донные отложения.

D. V. Ryabchuk, O. A. Kovaleva, D. V. Prishchepenko,
A. Yu. Sergeev, E. N. Nesterova (VSEGEI)

CHARACTERISTICS OF BOTTOM SURFACE SEDIMENTS OF LAKE BAIKAL AND RECENT SEDIMENTATION PROCESSES

The lithological map of the Lake Baikal water area bottom at a scale of 1 : 500 000 was first compiled based on results of analysis of materials from previous studies and annual field geological and geophysical surveys, and a set of laboratory studies made at VSEGEI (2015–2020). The paper discusses the genetic typification and patterns of distribution of bottom surface sediments, describes recent sedimentation processes of the lake basin.

Keywords: sedimentation, granulometric composition, bottom sediments.

Для цитирования: Рябчук Д. В. Характеристика поверхностных донных отложений озера Байкал и современные седиментационные процессы / Д. В. Рябчук, О. А. Ковалева, Д. В. Прищепенко, А. Ю. Сергеев, Е. Н. Нестерова // Региональная геология и металлогения. – № 94. – 2023. – С. 29–47. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_29-47.

Введение. Озеро Байкал представляет собой уникальный природный объект мирового значения. Одним из важнейших процессов, характеризующих функционирование озера как водной геосистемы (лимносистемы), является седиментация – геологический процесс осаждения и накопления аллохтонных и автохтонных осадков, происходящий на фоне колебаний климата, тектонических проявлений, изменения характера растительности и ландшафтов водосбора и техногенных факторов [23].

Различные аспекты геологии, геоморфологии, седиментологии и экологической геологии дна озера Байкал привлекают к себе пристальное внимание исследователей, и к настоящему времени накопился значительный объем информации. Впечатляющая база публикаций представлена в частности на сайте Лимнологического института Сибирского отделения РАН [http://lin.irk.ru/bibl/]. Следует отметить, что среди опубликованных материалов представлено значительное количество схем донных отложений, однако литологические карты поверхности дна масштаба 1 : 1 000 000 и крупнее, до настоящего времени не составлялись.

Целенаправленное изучение донных отложений Байкала началось в 1940-х годах. На первых этапах отбор проб производился с использованием дночерпателей различных конструкций (верхний слой осадков), грунтовых трубок (1–2 м), поршневых вакуумных трубок (10–12 м) [6]. В 1950-е годы поверхностные отложения Байкала исследовались Л. М. Князевой [20; 21].

К 1980-м годам были получены достаточно полные сведения о распределении и составе грунтов поверхностного слоя (до 1 м), позволившие составить первую схему распределения поверхностных донных отложений и сделать обобщения и выводы о строении верхней толщ отложений [28]. При составлении схемы была использована десятичная гранулометрическая классификация Н. М. Страхова [31].

Дальнейшие исследования донных отложений были в основном сфокусированы на получении длинных колонок донных отложений, характеризующих верхнюю часть геологического разреза (до 10–12 м), с целью изучения седиментационных процессов и реконструкции обстановок седиментации, а также палеоклиматических исследований, для которых мощные седиментационные

последовательности дна акватории озера представляют уникальные возможности [9; 19; 22; 25; 29; 30; 41 и др.]. Другим важным направлением исследований донных отложений было геохимическое [34; 41; 44 и др.].

Основной массив информации был получен в ходе международного проекта «Байкал-Бурение» в 1989–1999 гг., включавшего комплексное исследование осадочной толщи сейсмоакустическими методами, в том числе методом отраженных волн (МОВ ОГТ), а также детальное опробование осадочной толщи в различных районах озера поршневыми и ударными трубками. Сейсмические работы позволили получить информацию о геологическом строении котловины озера, мощностях и строении его осадочных образований [13; 39]. В 1995–1996 гг. Бельгийско-Российской экспедицией проведено одноканальное непрерывное сейсмопрофилирование высокого разрешения [32].

В результате глубоководного бурения были получены образцы донных отложений Байкала с глубины до 670 м [15]. Во время отбора проб осадков грунтовыми трубками также проводились сейсмоакустические работы [42]. Для корреляции результатов пробоотбора [19] использовался также массив сейсмических данных, полученных на раннем этапе геофизических исследований дна озера во время работ Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН и МГУ им. М. В. Ломоносова [14; 33].

Визуальные данные о площадном распределении донных отложений, особенностях микрорельефа дна, а также распределении и характере зон подводных выходов газов были получены также при глубоководных погружениях на подводных обитаемых аппаратах «Пайсис», проводившихся в 1977 г. и 1990–1991 гг. [7; 13].

Результаты исследований потоков поступления осадочного вещества в бассейн седиментации, его вдольберегового перемещения, а также закономерностей переноса из прибрежных участков в глубоководные приводятся в Атласе «Байкал» [4], а также в многочисленных работах Б. П. Агафонова [1–3].

Основной массив данных, характеризующих поверхностные донные отложения, приводится в работах Е. Г. Володиной [9; 25; 27; 29] и Е. Б. Карбанова [18; 19] с соавторами.

Исследования поверхностных донных отложений, выполняемые специалистами ВСЕГЕИ в акватории озера Байкал в ежегодном режиме с 2015 г., позволили существенно пополнить банк данных о поверхностных осадках, составить, а впоследствии дополнить, детализировать и актуализировать литологическую карту дна акватории.

Закономерности современных седиментационных процессов. Озеро Байкал является ярким примером водоема с широко проявленной турбидитовой седиментацией, которой способствуют геоморфологические особенности склонов и дна озерной котловины и прилегающих участков суши, механизмы поступления в акваторию осадочного материала, а также сейсмичность и неотектоническая активность региона [9; 16; 18; 25].

По данным Б. П. Агафонова [3], за год в Байкал в среднем поступает около 15,1 млн т вещества. Величина выноса вещества р. Ангара составляет около 6 млн т/год и, таким образом, в озере аккумулируется около 9 млн т/год.

На основании изучения состава и распределения голоценовых осадков в озере Байкал выделяются пять типов участков, отличающихся условиями осадконакопления: 1) глубоководные равнины; 2) литоральные зоны; 3) подводные поднятия (перемычки и хребты); 4) авандельты и участки дна вблизи устьев больших рек; 5) пролив Малое Море [9]. Общие закономерности современного осадконакопления обусловлены геоморфологическим строением дна озера Байкал, а также пространственным распределением источников поступления осадочного материала.

Морфологически озеро Байкал разделено на три котловины: Северную, Центральную и Южную с максимальными глубинами 900, 1637 и 1461 м соответственно [26]. Котловины имеют длину около 200 км каждая и разделены двумя поднятиями, достигающими глубин около 300 м. Важнейшей с точки зрения закономерностей седиментации особенностью морфологии котловин является их асимметричное строение, обусловленное геологическим строением (полуграбены с очень крутым, ограниченным разломом западного борта и пологим, разбитым серией разломов восточным бортом) [18].

Для верхнего современного слоя осадков Байкала, как и для большинства крупных озерных бассейнов, в общих чертах соблюдается следующая закономерность: в береговой зоне сосредоточена наиболее крупная фракция отложений, тогда как в глубоководных частях котловин – наиболее мелкая, однако распределение дельт наиболее крупных рек по отношению к основным геоморфологическим элементам, а также асимметричное строение склонов котловин вносит в эти общие закономерности существенные коррективы, что обуславливает указанную выше уникальность седиментационных обстановок Байкала, к которым прежде всего относится преобладание спокойной, нефелоидной седиментации на относительно поднятых участках дна (Бугульдейская перемычка и Академический хребет) и турбидитовое осадконакопление в более глубоководных котловинах.

Подводные склоны озера перекрыты чехлом осадков и прорезаны большим количеством подводных каньонов, по которым осадочный материал из береговой зоны поступает в глубоководные котловины. Уплотненные днища котловин осложнены большим количеством подводных конусов выноса, большинство из которых тяготеют к восточному берегу. Соответственно, асимметричное строение котловин определяет асимметрию дренажного бассейна и асимметрию в распределении седиментационных обстановок и формирующихся в них поверхностных донных отложений [1; 18; 43].

В противоположность западному склону, восточный борт Байкальской котловины более пологий и имеет огромный дренажный бассейн (более 85% дренажного бассейна озера). Длина рек восточного берега во много раз превышает длину рек западного. Практически все основные крупные реки впадают в озеро с восточного берега, вынося около 90% твердого стока и формируя обширные дельты [18].

В глубоководных отложениях озера довольно хорошо выражена ритмичность в строении толщи осадков. В пределах разреза наблюдается чередование нескольких ритмов, каждый из которых начинается наиболее крупным материалом – мелкозернистым песком или крупным алевритом, который постепенно сменяется все более мелким материалом вплоть до пелитового ила. При этом нижняя часть ритма, наименьшая по мощности, имеет тонкую слойчатость, обусловленную дифференциацией минерального состава. Мощность каждого ритма может быть от 1 до 60 см, они могут следовать один за другим или прерываться обычными пелитовыми или диатомовыми илами [16]. Подобная ритмичность осадков широко распространена в пределах дна всех котловин Байкала, но наибольшее их развитие характерно для Северного Байкала.

Описываемая особенность разреза байкальских отложений не является уникальной для подводного осадконакопления, но является уникальной для пресноводного водоема. Подобные ритмы отмечены для донных осадков морских бассейнов зоны континентальных окраин. Обусловлены они развитием мутьевых (суспензионных) потоков; широкому развитию турбидитов способствует целый набор факторов: наличие источников осадочного материала, высокая сейсмичность, активные экзогенные процессы (сели, сухопутные и подводные оползни), котловинный тип озера и его глубоководность, крутые подводные склоны и относительно ровное дно. Принимая во внимание высокую энергию мутьевых потоков, крутые борта подводных бортов котловин Байкала, можно предполагать, что отложения этих потоков могут полностью перекрывать дно впадин.

Наиболее высокими темпами осадконакопления характеризуется Южная котловина оз. Байкал. Глубоководные осадки здесь, подобно другим котловинам Байкала, представлены пелагическими илами и турбидитами. Современная скорость седиментации в Южной котловине составляет 1 мм/год, в Центральной котловине – 0,91 мм/год, в Северной котловине – 0,7 мм/год [37].

Исследования с применением седиментационных ловушек, выполненные в Южной котловине в период с 1999 по 2021 год, показали, что общий поток осадочного вещества по разрезу водной толщи (с глубин от 100 до 1366 м) представлен преимущественно биогенным материалом, состоящим в основном из створок диатомей с незначительной примесью пелита и единичных минеральных зерен алеврита и изменяется в диапазоне от 11,6 г/м² в год (2006 г.) до 208 г/м² в год (2014 г.). В период

с марта 1999 по март 2010 года средний поток осадочного вещества составил 75,1 г/м² в год, а в период с марта 2010 по март 2021 года – 104 г/м² в год [10; 47].

Скважины, пробуренные в пределах Академического хребта, показали, что при формировании осадочной толщи основное значение имело глубоководное озерное осадконакопление, для которого свойственно поступление осадочного материала только из водной толщи без участия вещества, приносимого с берегов. В результате накапливается толща осадков, представленная плотными тонкозернистыми алеврито-пелитовыми илами. Характерным является отсутствие перерывов и несогласий в залегании осадков, а также ритмичность разреза, связанная с чередованием прослоев терригенных глинистых осадков и диатомовых илов. Скорость накопления осадочной толщи в пределах Академического хребта составляет около 0,04 мм/год в верхней 277-метровой толще отложений, увеличиваясь на глубине 480 м почти до 0,14 мм/год. Скорость современного осадконакопления в пределах Академического хребта составляет 0,015–0,025 мм/год [37].

Разрез донных отложений, полученный в результате бурения на Бугульдейской перемычке и дне центральной части Южной котловины озера, характеризуется ярко выраженными процессами лавинного накопления осадков. Так, в скважинах, наряду с глубоководными озерными осадками, в разрезах широко представлены (до 60–80 %) турбидитовые прослои, сложенные гравийно-песчаным материалом. В них четко выражена смена грубозернистого материала в основании прослоя (до 95 % песчаной фракции) к более мелкому в его верхней части (около 3 %), постепенно переходящему в глубоководные озерные отложения (песок – алевропелитовый ил – пелитовый ил). На Бугульдейской перемычке скорость седиментации составляет около 0,2–0,86 мм/год [37].

Несколько иной разрез отложений получен на Посольской банке Байкала [12]. Были выделены три толщи. Верхняя (от 0 до 120 м) представлена биогенно-терригенными илами. Следующая (от 120 до 230 м) выполнена алевритистыми глинами с довольно однородным составом. Нижняя (от 230 до 325 м) сложена алевритистыми глинами со значительной примесью песчаного материала. В некоторых прослоях выражена градационная слоистость. Плотность осадков значительно выше, чем в других районах озера, где проводилось бурение. В данном разрезе впервые была установлена потеря осадков за интервал около 200 тыс. лет, вероятно, обусловленная тектоническими движениями Посольского блока. Этими чертами разрез отличается от других, полученных при бурении. Скорость осадконакопления составляет около 0,16 мм/год в верхней, 126-метровой толще, однако ниже выявлены рекордные для Байкала скорости осадконакопления – до 1,7 мм/год. Скорее всего, это определялось прямым поступлением осадочного материала из р. Селенга в период времени от 0,82 до 1,3 млн лет. В дальнейшем

произошло поднятие восточного крыла Посольской банки, совпадающее по времени с приморской фазой необайкальского этапа развития впадины озера. Рассчитанная скорость поднятия блока составляла около 4,5 мм/год [12].

Материалы и методы исследований. На первоначальном этапе работ в 2015 г. при составлении предварительной литологической карты использовались материалы по 150 колонкам донных осадков из базы данных пробоотбора Института наук о Земле Сибирского отделения РАН, а также другие доступные литературные источники (1996–2014 гг.) [8; 9; 17–19; 25; 27; 29; 45].

Ежегодно с 2015 г. специалистами ВСЕГЕИ выполняются геолого-геофизические исследования озера Байкал. Для актуализации литологической карты используются результаты пробоотбора, подводной видеосъемки и гидролокации бокового обзора (ГЛБО) СМ-2, (С-MAX, Великобритания), а также постоянно обновляющаяся (в том числе по данным многолучевого эхолотирования, выполненного ООО «Байкальский центр» [26]) информация о рельефе дна озерной котловины.

В результате полевых работ 2016 г. были выполнены детальные исследования дна Баргузинского залива, включавшие в себя многолучевое эхолотирование (в режиме площадной съемки), а также осуществлен большой объем пробоотбора и подводной видеосъемки. В 2017 г. литологическая карта уточнена для участков «Голоустное» и «Култук» с использованием в качестве основы результатов многолучевого эхолотирования, позволившего проследить границы форм рельефа, контролирующего расположение литофациальных зон, и, как следствие, распределения типов поверхностных донных отложений. Кроме того, использовались полевые описания и фотографии отобранных образцов и результаты гранулометрического анализа. В 2018 г. выполнены работы в северной части озера Байкал. Кроме того, были составлены две карты-врезки на участки, где выполнялось многолучевое эхолотирование и пробоотбор (участки в заливе Чивыркуй и губе Таланка). Актуализация литологической карты поверхности дна озера Байкал в 2019 г. основывалась на результатах полевых работ методом ГЛБО, поверхностного донного пробоотбора и подводной видеосъемки. Уточнен ряд литологических границ в северной части озера, а также составлены четыре карты-врезки для участков площадной съемки ГЛБО (бухта Большая Зеленевская, бухта Змеиная, бухта Солонцовая, участок Нижнеангарск). В 2020 г. пробоотбор и подводная видеосъемка осуществлены на участках «Посольское», «Таланка», «Баргузинский залив», в бухте Змеиная и в проливе Малое Море.

Пробы донных осадков отбирались специалистами ВСЕГЕИ с помощью бокс-корера и герметичных грунтовых трубок [33]. Общее количество станций проведения литологических исследований и фото- видеонаблюдений составило 337 станций. Также было задокументировано около

130 м керна (рис. 1). Кроме того, для составления литологической карты поверхности дна озера проведена интерпретация, более 950 линейных километров ГЛБО и свыше 4500 линейных километров МЛЭ.

Лабораторная обработка образцов, отобранных ВСЕГЕИ, заключалась в гранулометрическом анализе проб. Гранулометрический анализ образцов алевропелитовых осадков был выполнен в лаборатории ВСЕГЕИ с использованием лазерного анализатора частиц «Микросайзер 201А» (производства «ВА Инстал») методом лазерной дифракции. Метод основан на регистрации интенсивности рассеянного света, угловая зависимость которого определяется размером и оптическими свойствами частиц. Результатом измерений является получение значения среднего диаметра сферы эквивалентного объема для анализируемой несферической частицы. Анализ образцов производится при естественной влажности осадков. Образцы переводятся в суспензию, растираются в чашке Петри в дистиллированной воде.

Ситовой анализ заключается в просеивании пробы песчаного осадка через набор сит аналитической просеивающей машины AS 200 с управлением «g» фирмы Retsch. Машина обеспечена программным управлением, позволяющим задавать временной интервал, амплитуду колебаний и прерывистый режим вибрации. Анализ производится на стандартном наборе плетеных сит, отвечающим требованиям ГОСТ 3584-73. В используемом наборе размеры ячеек соседних сит образуют геометрическую прогрессию и соответствуют десятичной логарифмической шкале гамма В. П. Батурина. Отверстия сит имеют диаметр 2,50, 2,00, 1,60, 1,25, 1,00, 0,80, 0,63, 0,50, 0,40, 0,315, 0,25, 0,20, 0,16, 0,125, 0,10, 0,08, 0,063, 0,05, 0,04 мм. Результатом является разделение осадка на 21 фракцию (включая фракции более 2,5 мм и менее 0,01 мм). Общее количество выполненных гранулометрических анализов составило 417.

Доля биогенной компоненты в составе поверхностных донных отложений оценивалось по данным Е. Г. Володиной [9; 25; 27; 29]. При определении типов осадков использовалась генетическая классификация Л. Б. Рухина. Статистические параметры гранулометрических распределений рассчитаны по данным [40]. К биогенно-терригенным отнесены отложения, содержащие от 25 до 50% биогенного кремнезема, к терригенно-биогенным отложениям – более 50%.

Полученные результаты. Распределение поверхностных донных отложений. В пределах озерной котловины картируются отложения терригенного, биогенно-терригенного и терригенно-биогенного генетических типов (рис. 2). Отдельную проблему при составлении литологической карты дна акватории представляют зоны развития турбидитов, где гранулометрический состав может изменяться во времени. Для отображения этого процесса, оказывающего огромное влияние на

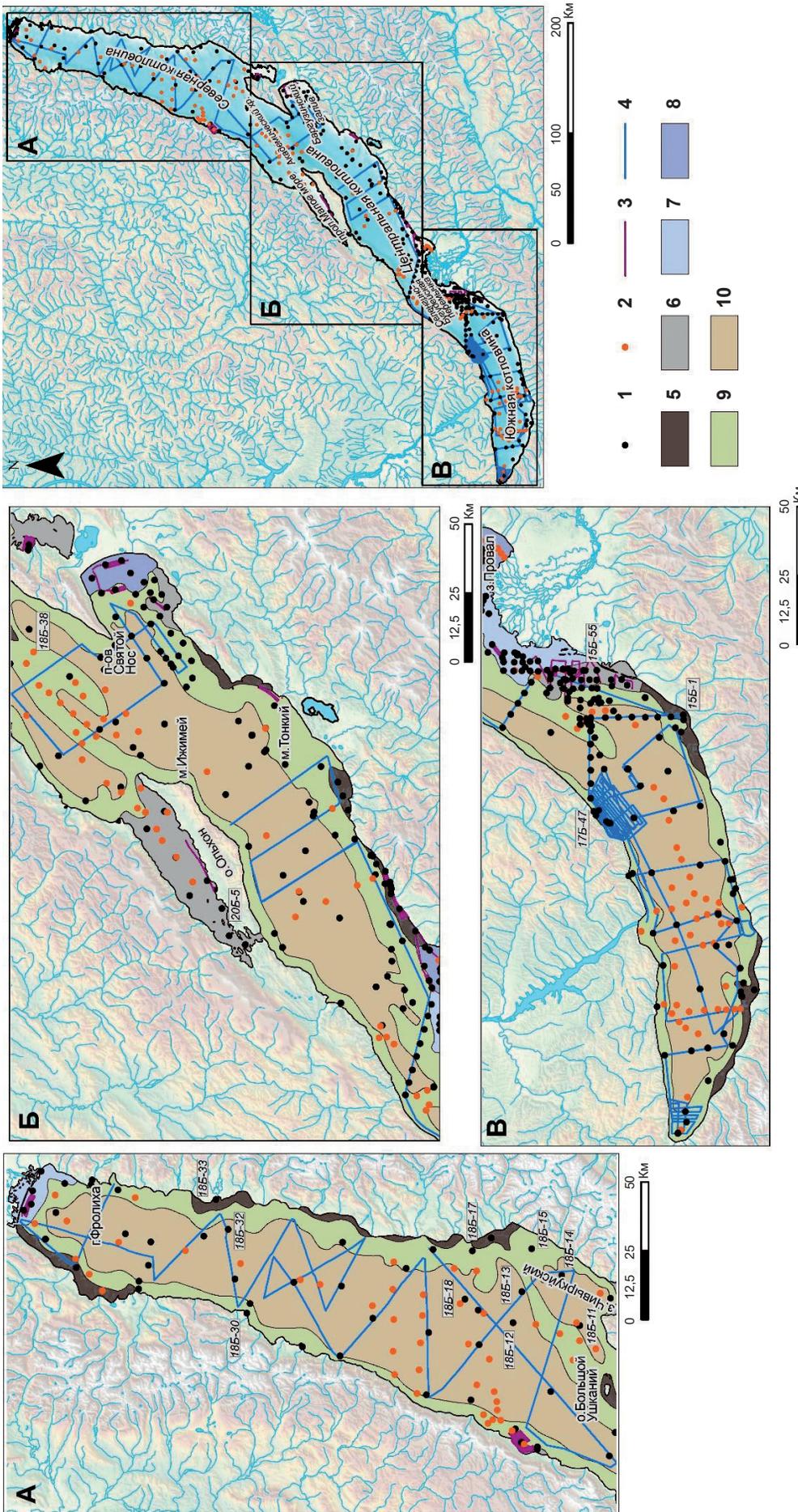


Рис. 1. Карта использованных материалов

Станции донного опробования: 1 – выполненные ФГБУ «ВСЕГЕИ» В 2015–2020 гг., 2 – [8; 9; 25; 27; 29]; геофизические исследования: 3 – гидролокация Бокового обзора, выполненная ФГБУ «ВСЕГЕИ», 4 – многолучевое эхолотирование (МЛЭ), выполненное Иркутским национальным исследовательским университетом; типы рельефа дна [5]: 5 – мелководные абразионные равнины, 6 – мелководные равнины озерной аккумуляции, 7 – подводные дельтовые равнины (авандельты), 8 – мелководные трансгрессивные равнины слабой озерной аккумуляции, 9 – денудационно-аккумулятивные расчлененные склоны впадин и возвышенностей, 10 – глубоководные равнины озерной аккумуляции

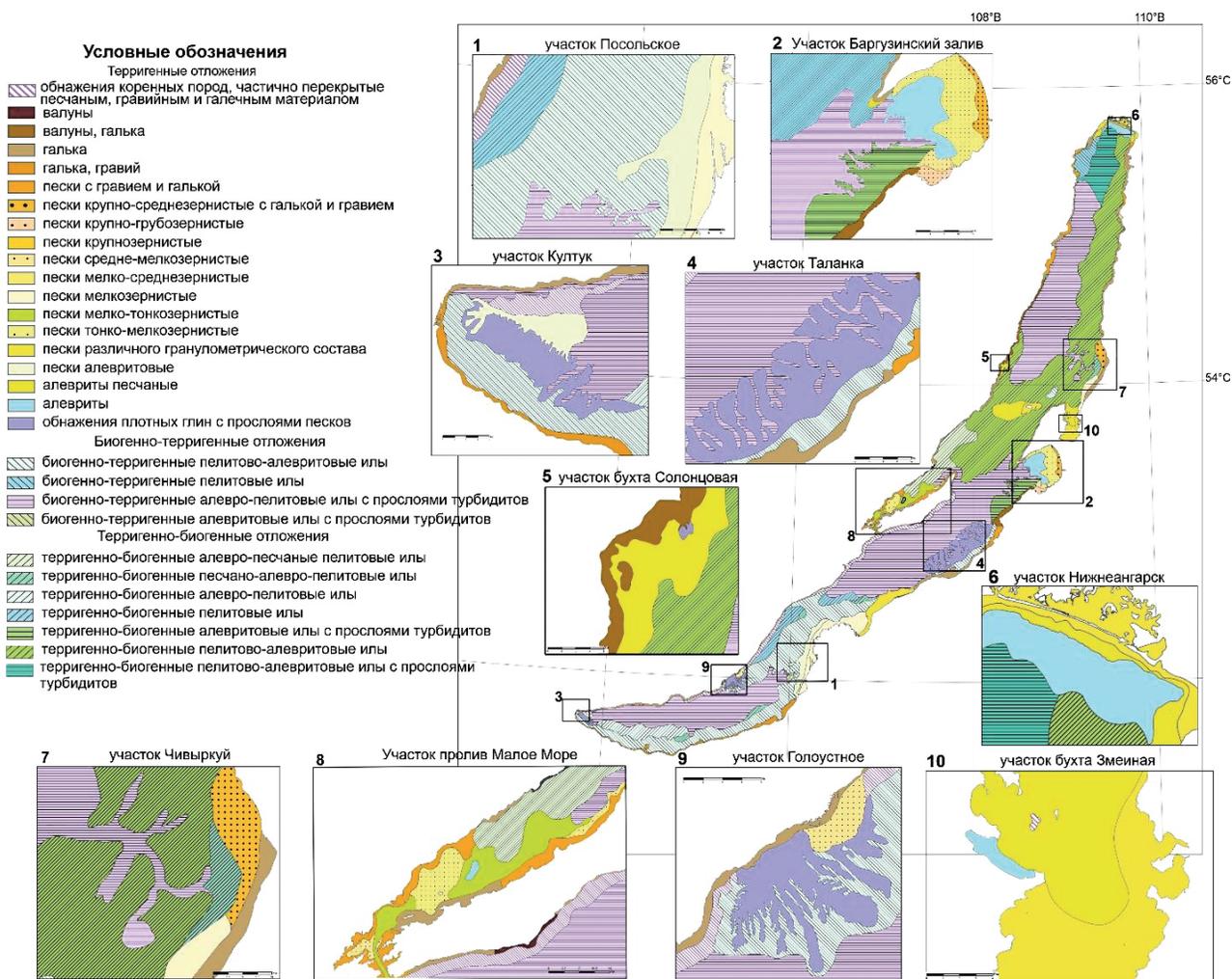


Рис. 2. Литологическая карта поверхности дна озера Байкал с врезками на ключевые участки

особенности осадконакопления, на карте выделены отдельные типы отложений. Кроме того, на крутых склонах в зонах развития подводных каньонов на поверхности дна обнажаются плотные глины с прослоями песков, практически не перекрытые покровом современных осадков.

Терригенные отложения. Отложения терригенного генетического типа представлены широким гранулометрическим спектром и развиты на относительно мелководных участках в верхней части подводного берегового склона, а также в дельте р. Селенга, Баргузинском и Чивыркульском заливах, Малом море, по периферии о. Большой Ушканий в пределах Академического хребта и в северной части акватории озера, в районе истока р. Ангара (рис. 2).

Грубообломочные отложения – крупные валуны, галечные и гравийные осадки, часто в различных пропорциях сочетающиеся с крупнозернистыми песками, развиты вдоль скалистых берегов в зоне активной волновой деятельности. Область отложения грубообломочного материала вдоль крутого западного берега озера достаточно узка

и составляет от 300–500 м в южной котловине до 2–3 км – в северной. У более пологого восточного берега ширина зоны может варьировать от 2,5 до 5 км от берега. Границы полей грубообломочных отложений хорошо прослеживаются по результатам анализа материалов ГЛБО и подводной видеосъемки (рис. 3, 4). На мелководье грубообломочные отложения формируют плотную отмостку, служащую субстратом для водной растительности.

На северо-западном борту впадин расположено значительное количество мелких постоянных и временных водотоков. Практическое отсутствие предгорной и мелководной террас вдоль западного борта приводит к тому, что обломочный материал выносится реками непосредственно в пределы подводного склона. Вследствие значительных уклонов подводного склона впадин и малого объема поступающего с западного берега осадочного материала, чехол современных осадков в их пределах имеет незначительные мощности или полностью отсутствует, обнажая коренные кристаллические породы и древние отложения [18; 19]. Шлейфы грубозернистого материала у подножия

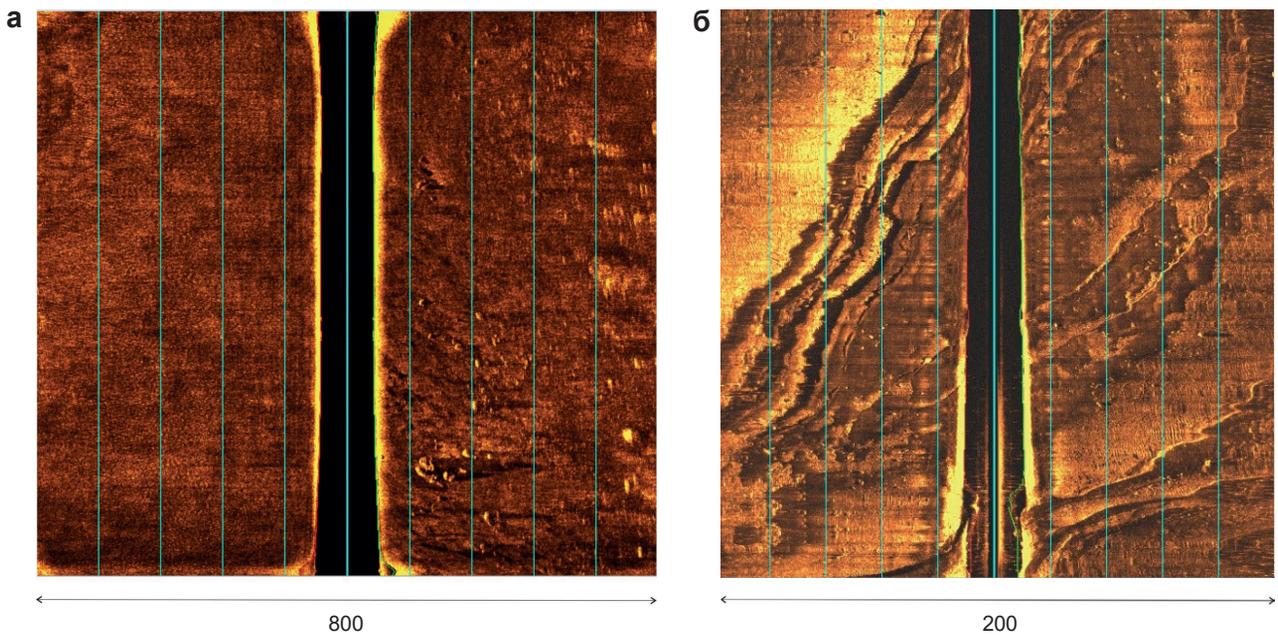


Рис. 3. Граница грубообломочных и песчаных отложений на сонограммах ГЛБО

а – крупные валуны (размером более 10 м, высотой до 6 м) в поле алевритовых песков (бухта Солонцовая); *б* – валунно-галечные отложения с отдельными пятнами песков со знаками на поверхности обнажений коренных пород

склонов западного борта впадин также незначительны либо отсутствуют [46].

Преимущественные глубины распространения грубообломочного материала составляют 20–30 м, реже до 50 м. В отдельных случаях на западном склоне озера и на крутом восточном склоне о. Ольхон грубообломочные отложения представ-

лены очень широко: вплоть до дна озера. Отмечается, что, если в верхней части склонов (до 400 м) еще можно встретить материал, привнесенный из прибрежной зоны, то на больших глубинах распространены продукты местного разрушения скальных стенок. В зависимости от характера коренных пород размер обломков может составлять от 3–4 м

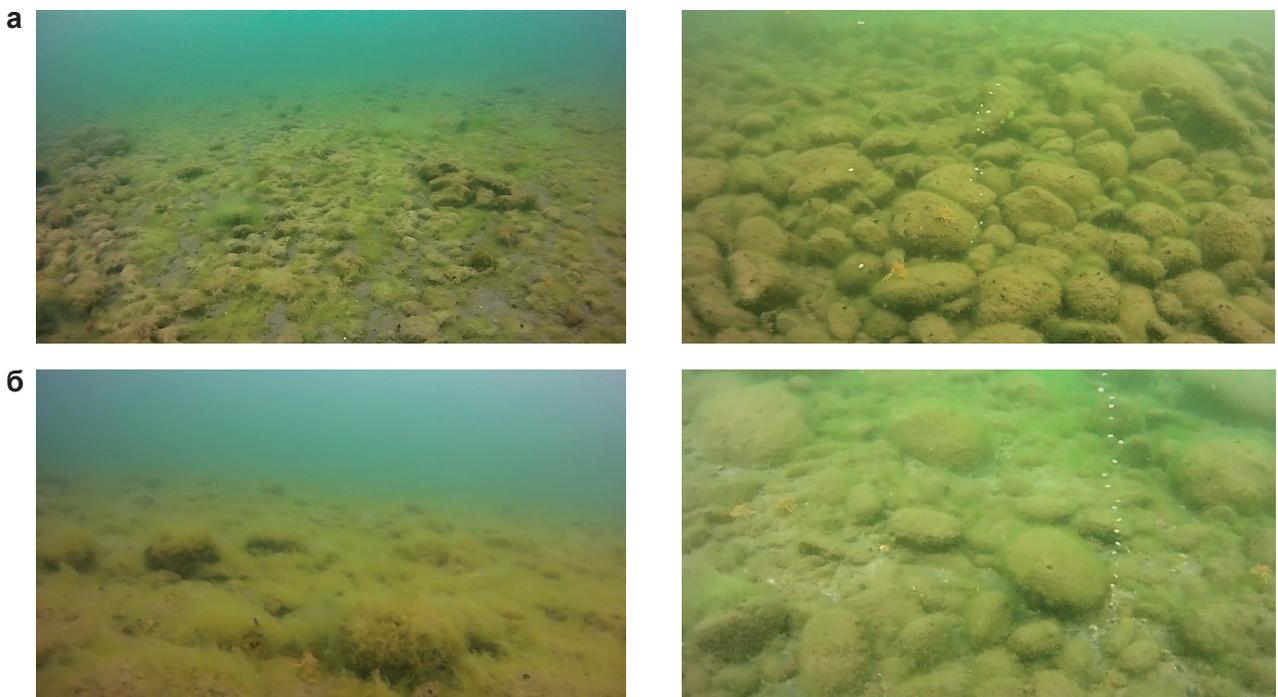


Рис. 4. Грубообломочные отложения по материалам подводной видеосъемки

а – галечные отложения на поверхности дна на подводном береговом склоне в районе устья р. Утулик (станция видеонаблюдения 20Б-5); *б* – мелковалунная отмостка на подводном береговом склоне в районе мыса Тонкий (2020 г.)

для мраморов до 10–30 см для гнейсов. Они очень подвижны и легко смещаются вниз, образуя осыпи у подножия склона, часто перекрытые тонким слоем ила мощностью 5–10 см [7]. Окатанность грубообломочных отложений различна, но в целом отмечается более высокая степень обработки материала, приуроченного к восточному берегу озера.

По мере удаления от берегов и наиболее активной гидродинамической области, а также в придельтовых участках на глубинах 10–15 м широкое распространение получают пески различной размерности. Причем с нарастанием глубин уменьшается их зернистость и увеличивается доля алевритового материала.

Песчаные отложения распространены до глубин 100–150 м, хотя могут встречаться и значительно глубже (например, до 1200 м у мыса Ижимей). Окраска песков может быть серой, темно-серой, коричневой и желто-серой, изредка светло-серой и белой. Чаще всего состав песков полимиктитовый. Велика примесь более мелкого алевритового и пелитового материала, а также растительного детрита – обломков древесины, остатков травяной растительности.

Литоральные отложения западного берега Северного Байкала представлены преимущественно грубообломочными осадками. На станции 18Б-30 (глубина 15 м), по данным подводной видеосъемки, дно покрыто песками, на отдельных участках – со значительной примесью грубообломочного материала (по данным пробоотбора – галька, гравий, тонкозернистый песок, на отдель-

ных участках – скопления валунов и гальки, на поверхности песчаных осадков видны следы воздействия волнения либо течений). Пески, по данным гранулометрического анализа, плохо сортированы (So 2,74), характеризуются значительной примесью гравийных частиц (8,55%), в составе песчаной фракции доминируют тонко-(61%) и мелкозернистые (33%) фракции.

В бухтах восточного берега Северного Байкала также местами формируются поля песчаных отложений (станция 18Б-33, тонкозернистый темно-серый с поверхности буроватый песок).

Поверхностные отложения дна Баргузинского залива в районе устья р. Баргузин представлены крупно-грубозернистыми (Ma 1,13 мм), плохо сортированными (So 5,58) песками с высоким (26%) содержанием гравийных частиц. Кривые распределения полимодальные. Сонограммы и подводная видеосъемка фиксируют крупные асимметричные песчаные рифели (высота валиков ряби около 20 см, расстояние между гребнями около 50 см), характеризующиеся резко неоднородным гранулометрическим составом вершин рифелей и межваловых ложбин (рис. 5). Судя по результатам подводной видеосъемки, грубозернистый песок и гравий концентрируются на склонах и вершинах валиков, в то время как в межваловых ложбинах преобладает более мелкозернистый песок. Характер микрорельефа дна и гранулометрический состав отложений свидетельствуют об интенсивном воздействии течений на формирование поверхностного осадочного покрова.

Далее до глубин около 50 м поверхность дна покрыта тонко-мелкозернистыми песками (Ma 0,14–0,2 мм, среднее 0,17 мм). Сортированность осадка средняя – плохая (So 1,8–2,6), кривые распределения, как правило, бимодальные. Вес модальной фракции (0,1–0,25 мм) колеблется от 51 до 74% (рис. 6). Осадки слегка заилены, содержание частиц $<0,01$ мм – до 2%. Бимодальность распределений свидетельствует о воздействии на формирование осадков нескольких гидродинамических факторов, среди которых может быть названо как дифференциация материала под воздействием волнения и течений, так и влияние твердого стока р. Баргузин.

В южной части Баргузинского залива поверхностные отложения прибрежных мелководий представлены крупно-среднезернистыми песками с единичными зернами гравия и гальки. Пески отмытые (содержание частиц $<0,01$ мм не превышает 0,5%), средней степени сортированности (So 2,2). Распределение поверхностных донных отложений Баргузинского залива глубже изобаты 50 м четко контролируется рельефом дна. На склонах впадины преобладают отложения преимущественно алевритового состава, в наиболее глубоководной части – алевро-пелитового и пелитового. Наличие разветвленной сети подводных каньонов, прорезающих склон и четко фиксируемых съемкой методом многолучевого эхолотирования, обуславливает присутствие в толще осадков турбидитовых прослоев [9; 25; 27].

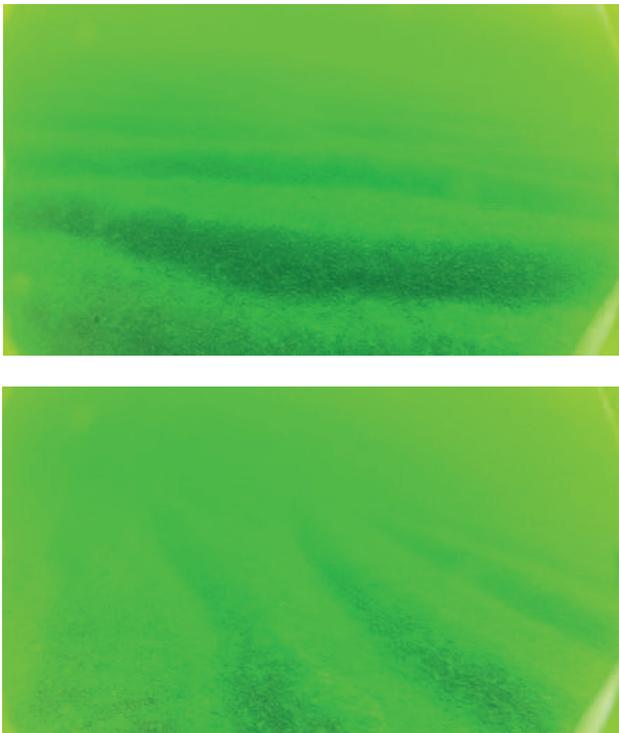


Рис. 5. Песчаные рифели на поверхности дна в районе дельты р. Баргузин

Подводная видеосъемка 2016 г.

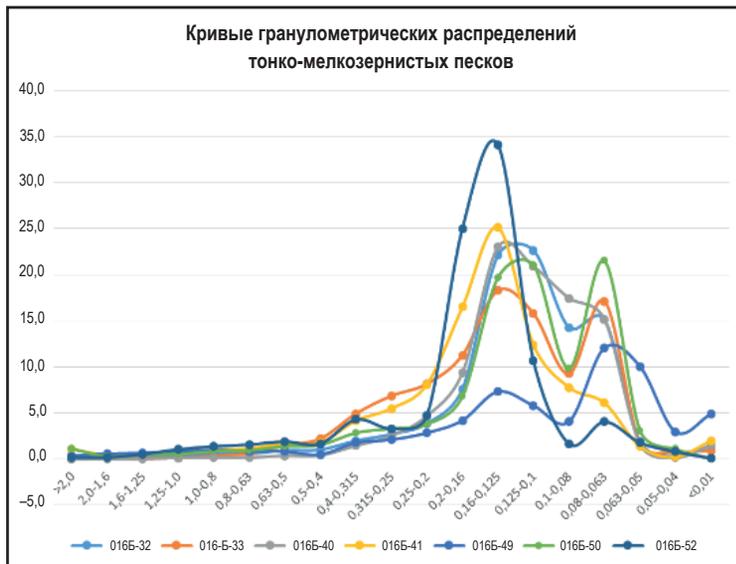


Рис. 6. Гранулометрические распределения тонко-мелкозернистых песков Баргузинского залива

В локальной бухте, расположенной к югу от устья р. Мантуриха, среднезернистые пески перекрывают подводные выходы плотных глинистых пород, образующих ступенчатый рельеф (рис. 7). Аналогичная зона фиксируется профилем ГЛБО bai09. В авандельте р. Селенга пески располагаются обычно до глубин 15–20 м, редко до 30–40 м. Наиболее широко представлены мелкозернистые разности и алевритовые пески (рис. 8).

Песками покрыто дно Чивыркуйского залива и почти половина залива Провал. Зона песчаной аккумуляции расположена между восточным берегом озера и п-овом Святой Нос, представляющим собой томболо. В настоящее время песчаные отложения продолжают накапливаться в Баргузинском и Чивыркульском заливах. В Баргузинском заливе ширина зоны песков составляет до 15–18 км, занимая почти половину залива, далее расположено поле алевритовых песков. В истоке р. Верхняя Ангара ширина зоны песков достигает 4,5 км.

Песчаные отложения широко развиты в прол. Малое Море. В кутовой части залива поверхностные осадки представлены средне-мелкозернистыми песками (вес фракции 0,01–0,25 мм, 68,7%), средней степени сортированности (S_o 2,6), серого цвета, с гравием и мелкой галькой. Доминирующими типами отложений на основной части площади дна Малого моря являются тонко-мелкозернистые и мелко-тонкозернистые пески. Вес тонкозернистой фракции (0,05–0,01 мм) составляет от 33 до 55%, мелкозернистой (0,01–0,25 мм) – от 39 до 55%. Пески характеризуются средней степенью сортированности (S_o 1,9–2,3) (рис. 9,а). Пески полимиктовые, серого цвета, с желтоватым (либо горчичным) оттенком, с большим содержанием слюды, в нижней части в ряде проб – с примесью алевритового материала. Конус выноса отложений современной дельты р. Голоустная, сложенный

преимущественно песчаными осадками, имеет также подводное продолжение в пределах подводного склона (современная авандельта).

В Чивыркуйском заливе, по данным предыдущих исследований [4], вдоль берега в виде широкой полосы протягивается поле грубообломочных осадков. Батиметрически ниже, согласно полученным нами данным, они сменяются хорошо отмытыми (вес фракции <0,01 мм – 0,1%), хорошо сортированными (S_o 1,59) средне-крупнозернистыми песками (вес модальной фракции 0,5–1,0 мм – 58,2%). Севернее расположена палеодельта р. Большой Чивыркуй. Вероятно, механизм ее формирования аналогичен описанным для Южного Байкала [35]. Поверхность дна «палеодельты» покрыта терригенно-биогенными пелитово-алевритовыми илами с высокой примесью песчаных частиц. Содержание доминирующей алевритовой фракции колеблется от 69 до 75%, пелитовой – от 9 до 15%, песчаной – от 13 до 17%. Отложения представлены бурыми флокулированными разжиженными илами, на поверхности отмечается значительное количество скоплений диатомовых водорослей. Мощность верхнего окисленного слоя (светло-бурого цвета) весьма значительна и колеблется от 1 см (станции 18Б-15, 18Б-17) до 4–5 см (станции 18Б-12, 18Б-13, 18Б-14, 18Б-18). На станциях 18Б-15 и 18Б-17 этот слой подстилается серыми мягкопластичными алевропелитами. На остальных станциях мощность окисленного коричневатого слоя алевропелитов – более 10 см. В образцах станций 18Б-18 и 18Б-14 по нижнему контакту окисленной зоны (10 см и 4 см соответственно) встречены корки цементации за счет обогащения окислами и гидроокислами Fe и Mn.

В северной части губы Фролиха на глубинах 20 м выделяется поле крупнозернистых песков. Пески достаточно хорошо сортированы (S_o 1,8),

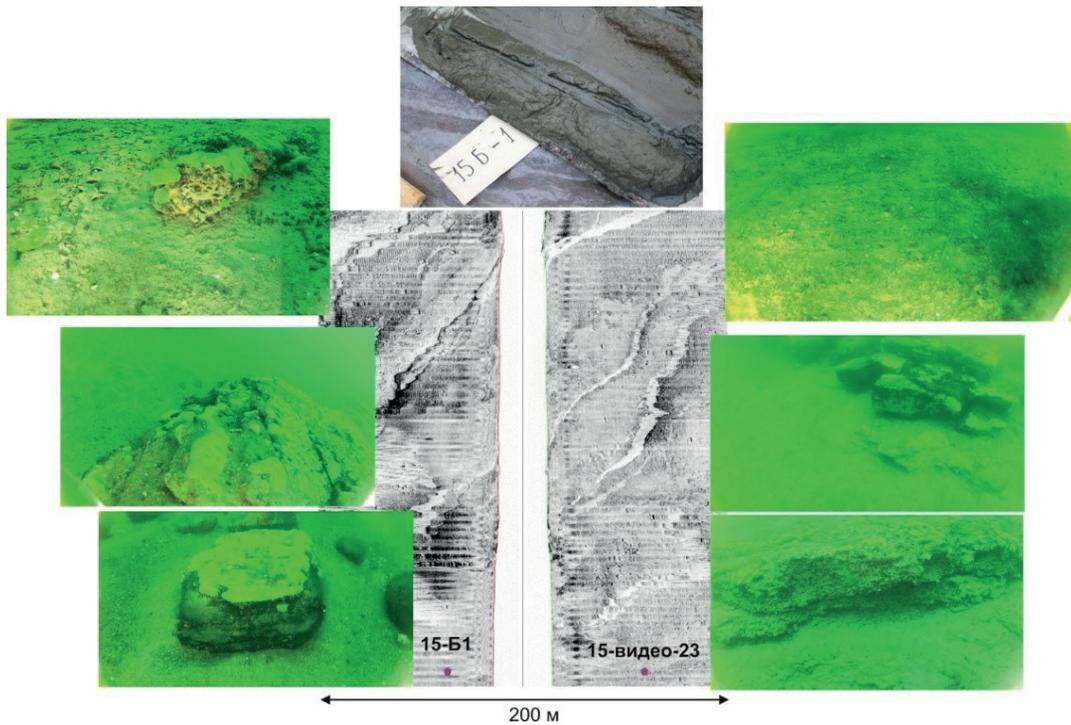


Рис. 7. Среднезернистые пески на поверхности подводных уступов. Фрагмент сонограммы профиля bai2 и подводные фото (2015 г.)

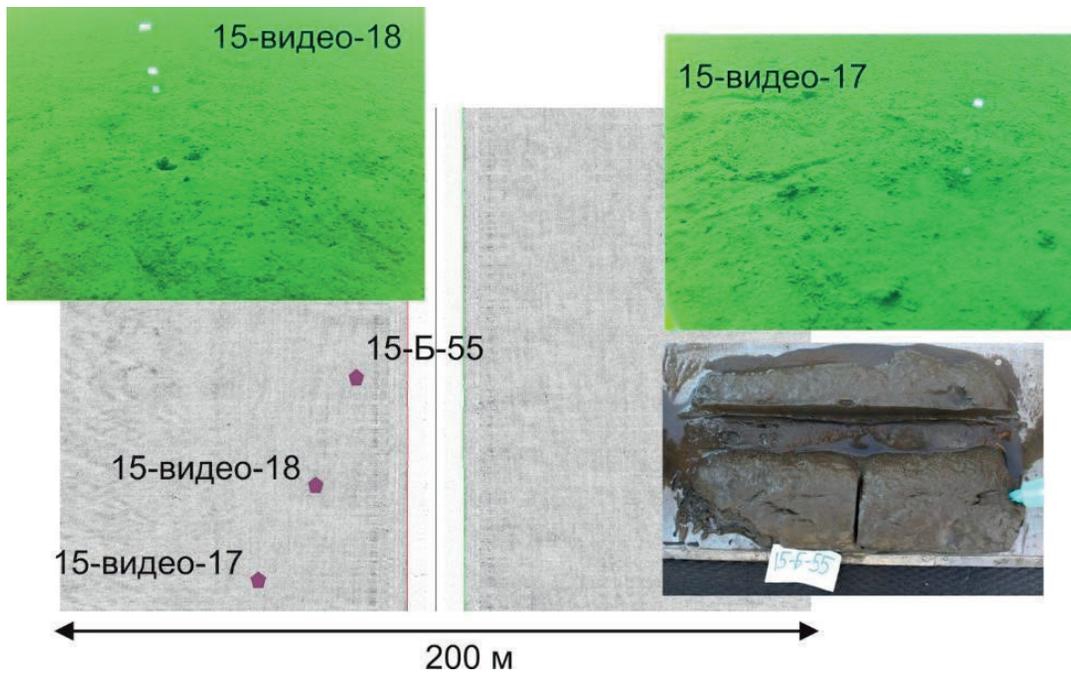


Рис. 8. Фрагмент сонограммы и подводные фото поля песков (профиль bai027) (2015 г.)

пески весом модальной фракции 0,5–1,0 мм составляют 75,9%, количество грубобломочного материала (1,8%) и алевропесчаных фракций (0,12%) незначительно, кривая распределения одномодальная.

Пробоотбор, выполненный на выходе из губы Аяя, выявил наличие на глубинах 110 м вытянутого вдоль изобат поля мелко-среднезернистых песков.

Сортированность осадков плохая ($S_o 3,24$), кривая распределения полимодальная, вес мелкозернистой фракции – 30,4%, среднезернистой – 40,8%. Примесь грубозернистого материала составляет 1,7%, алевропелитовых частиц – 3,4%.

Алевритовые пески и песчаные алевриты образуют протяженные поля по периферии дельты р.Селенга в Чивыркуйском заливе (рис. 10),

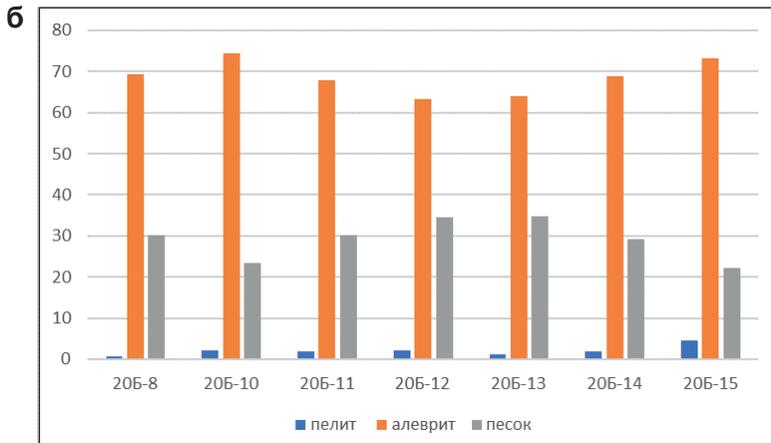
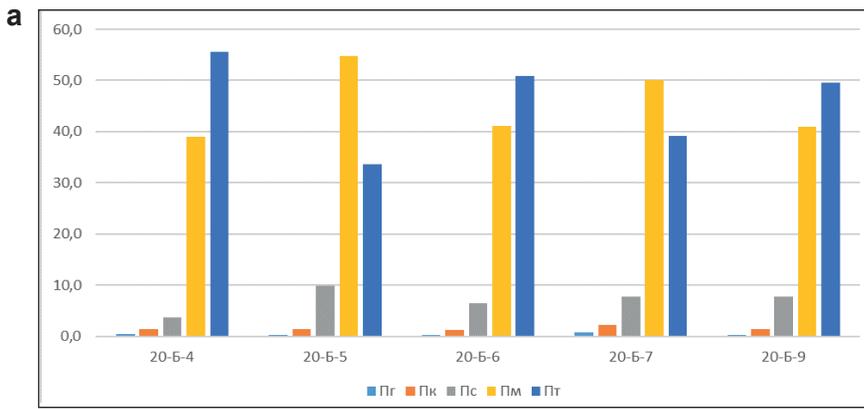


Рис. 9. Гранулометрические распределения песчаных (а) и алевропесчаных (б) отложений пролива Малое море (2020 г.)

Гранулометрические фракции песчаных отложений: Пг – песок грубозернистый (2,0–1,0 мм), Пк – песок крупнозернистый (1,0–0,5 мм), Пс – песок среднезернистый (0,5–0,25 мм), Пм – песок мелкозернистый (0,25–0,1 мм), Пт – песок тонкозернистый (0,1–0,05 мм)

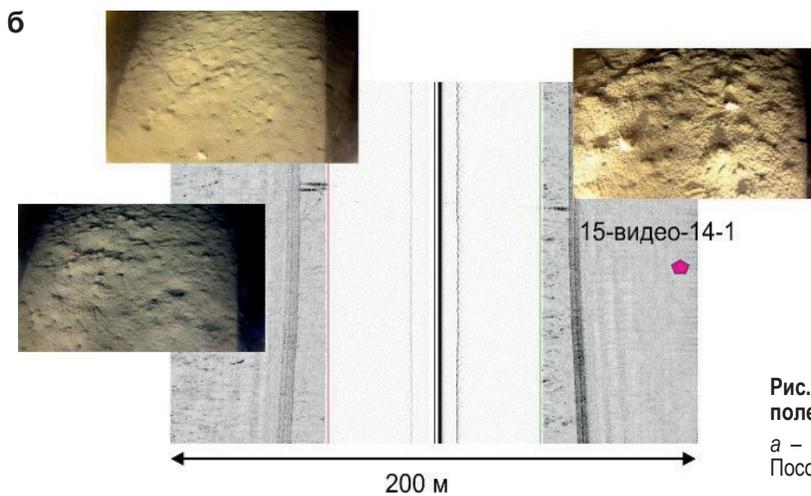
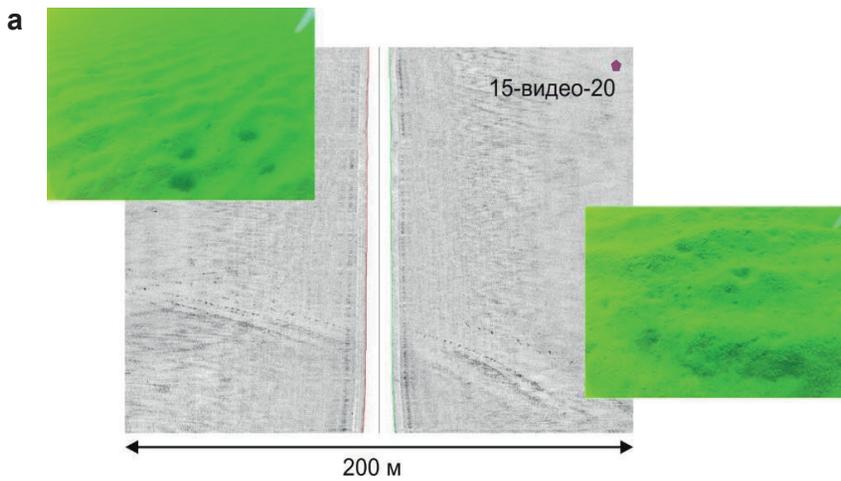


Рис. 10. Фрагменты сонограмм и подводные фото полей алевроитовых песков

а – профиль bai012, б – профиль bai17 в пределах Посольской банки (2015 г.).

к западу от о. Большой Ушканий и в восточной части пролива Малое море. Поверхностные осадки, отобранные на выходе из Малого моря и в прилегающей части дна озера Байкал, представлены алевритовыми и песчано-алевритовыми илами (рис. 9,б) с выраженной мощной зоной окисления, составляющей, по данным пробоотбора с использованием трубки, до 17–18 см.

Цвет осадка коричнево-горчичный, темно-горчичный. На поверхности, как правило, отмечается большое количество диатомовых водорослей. Бурые, отмытые, хорошосортированные алевритовые пески и средне-мелкозернистые пески покрывают поверхность дна у подножия склонов Южной котловины в западной части акватории озера Байкал (глубина от 500 до 1256 м). По данным многолучевого эхолотирования в восточной части поля песков, они образуют на поверхности дна крупные серпообразные формы динамической аккумуляции (мегарифели).

В бух. Змеиная, где ранее, по литературным данным, картировалось поле песков, в 2019 г. выделены зоны развития алевритов и песчаных алевритов. Алевриты характеризуются высоким содержанием фракции 0,005–0,05 мм (78–80%), песчаные фракции составляют 14–17%, пелитовые – 4–5,5%. Обращает на себя внимание, что несмотря на мелководные условия (глубина озера 3–6 м), на поверхности осадков отсутствует зона окисления. В гранулометрическом составе песчаных алевритов доля песчаной фракции возрастает до 43%. На поверхности песчаных алевритов локально выделяются зоны развития знаков ряби, являющиеся индикаторами гидродинамического воздействия на дно. Поле песчаных алевритов прослежено в северном направлении до выхода

из бух. Змеиная, доля алевритовой фракции возрастает здесь до 68%, доля песчаной снижается до 16,4%.

Терригенные алевриты являются преобладающим типом поверхностных отложений на пологонаклонном склоне северо-западной части Баргузинского залива (между п-вом Святой Нос и устьем р. Баргузин).

Биогенно-терригенные отложения. *Отложения подводного поднятия Селенгинско-Бугульдейская Перемычка.* Поднятие Селенгинско-Бугульдейская Перемычка, разделяющее Центральную и Южную котловины, представляет собой тектоническую ступень, наклоненную в сторону южной котловины. С севера на ступень наложена дельта р. Бугульдейка, осадки которой играют важную роль в седиментации района. Подводная часть дельты далеко вдаётся в озеро. Верхние 100 м разреза характеризуются непрерывными субпараллельными отражениями, свидетельствующими о мощной толще гемипелагических осадков. В поверхностных илах, отобранных на Селенгинско-Бугульдейской перемычке, турбидиты отсутствуют [9; 15]. Скорость осадконакопления здесь значительно превышает этот показатель на Академическом хребте. Вне зоны прямого влияния р. Бугульдейка в осадках встречаются только отдельные редкие и маломощные алевритовые турбидиты. Повышенная скорость накопления осадков в этом районе связана с интенсивным поступлением терригенного материала с водами крупнейшего притока Байкала – р. Селенга.

Биогенно-терригенные пелитово-алевритовые илы образуют обширное поле в пределах Селенгинско-Бугульдейской перемычки (включая аквато-

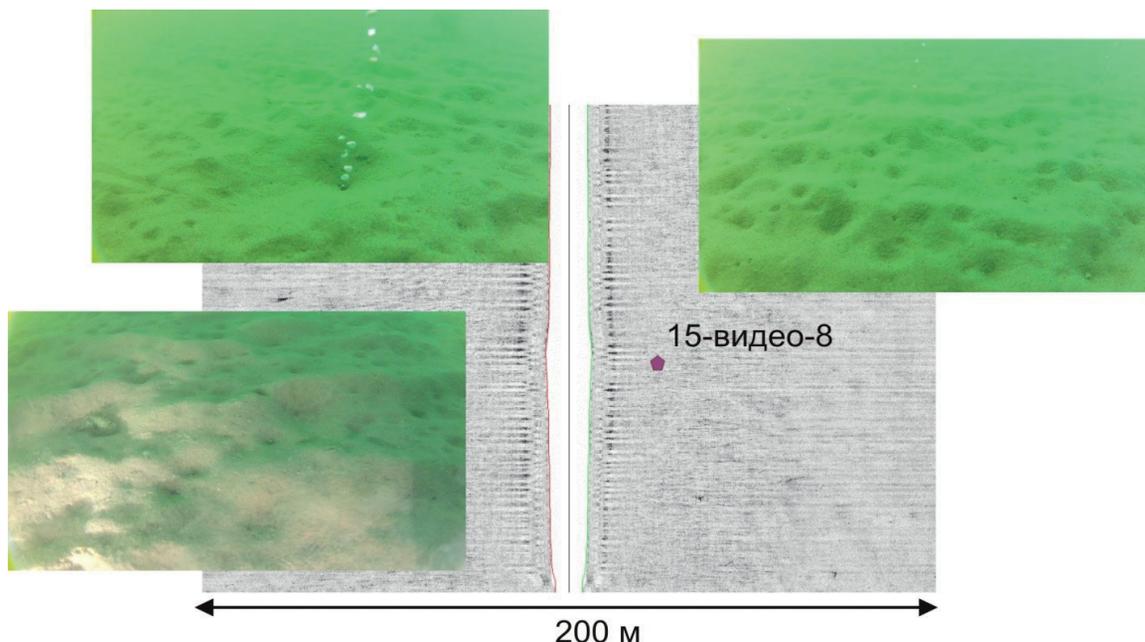


Рис. 11. Фрагмент сонограммы и подводные фото поля пелитово-алевритовых илов в пределах акваториальной периферии Посольской банки (профиль bai19)

риальную периферию Посольской банки), а также протягиваются от нее в западном направлении в виде узкой полосы вдоль южного берега озера Байкал (рис. 11). Биогенно-терригенные илы пелитового состава развиты локально, в северной части озера.

Характерной особенностью отложений глубоководной части озера Байкал является наличие подводных конусов выноса терригенного материала. Конусы выноса тяготеют к бортам озера и имеют веерообразную форму, а размеры достигают 10–20 км. Например, длина конуса выноса Кукуйского подводного каньона, расположенного на северном склоне дельты р. Селенга, составляет более 60 км. По данным сейсмоакустики, тела подводных конусов выноса сложены слоистыми отложениями, в которых отчетливо выделяются отдельные аккумулятивные тела – лобосы, каналы стока суспензионных потоков и прирусловые валы [38; 43]. Размеры лобосов составляют 1–2 км, а мощность – первые сотни метров. Подводные каналы стока, пересекающие поверхность конусов выноса, имеют ширину несколько сот метров при глубине в первые десятки метров [18]. Распределение осадков на конусах очень сложное и зависит от положения лобосов и каналов стока. Опробование донных отложений конусов показало, что в основном они сложены чередующимися слоями тонкозернистых гемипелагических отложений (диатомовых и глинистых илов) и грубозернистых (алеврит, песок, гравий) прослоев. Генезис грубозернистых прослоев связан с турбидитными потоками. Их мощность составляет от долей сантиметра до 20–30 см. Мощность турбидитных слоев и крупность грубозернистых осадков в них убывает по удалению от берегов и от оси конуса выноса. В дистальных частях конусов турбидитные прослойки верхнего слоя осадков утончаются, и частота их встречаемости уменьшается, но они

полностью не исчезают, их очень много в осадках глубоководных равнин. Отложения каналов стока более грубозернистые и представлены песчаными и более грубыми отложениями вплоть до валунов. Во многих районах озера подводные конусы выноса расположены вблизи друг от друга и сливаются, создавая сложную картину наложенных конусов выноса, усложняя и без того сложную фаціальную картину распределения донных отложений [18]. Картирование таких участков дна будет выполнено при дальнейшем продолжении работ на основе заверки данных многолучевого эхолотирования и гидролокации бокового обзора пробоотбором. В районе Посольского каньона наблюдается мозаичная картина распределения поверхностных осадков.

На склонах Южной и Центральной котловин в виде узкой полосы шириной от 300 м до 1,5 км, выделяются биогенно-терригенные пелитово-алевритовые илы. В зависимости от крутизны склонов и скорости смещения материала, илы сочетаются с отложениями более крупной размерности вплоть до крупнозернистых песков, что определяет неоднородность, «пятнистость» зоны. В наибольшей степени это касается западного крутого борта котловин озера. Окраска илов серая, темно-серая, с различными оттенками, чаще бурыми, реже зеленоватыми. По консистенции чаще вязкие, реже полужидкие, иногда уплотненные. Обычно содержат примесь песчаного, мелкоалевритового или пелитового материала, растительных остатков и панцирей диатомей.

В районе устья р. Голоустная расположена подводная возвышенность с достаточно крутыми, расчлененными многочисленными каньонами. Возвышенность интерпретирована ранее [24] как древняя авандельта р. Праголоустная. По данным непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП), в строении отложений четко

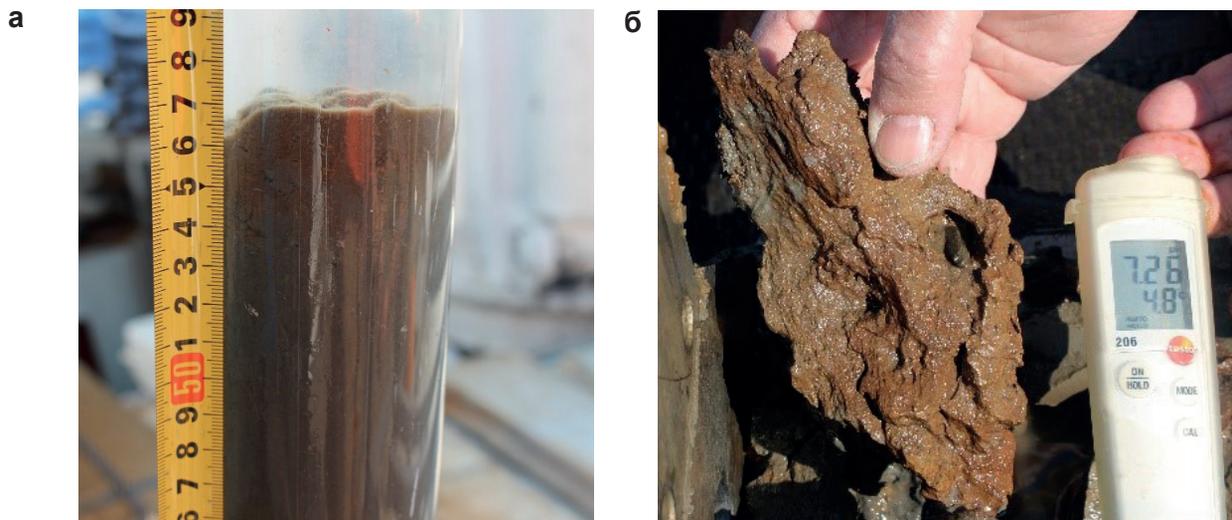


Рис. 12. Поверхностные отложения станции 17Б-47

а – ГГТ с ненарушенным поверхностным слоем пелитового алеврита; б – корка железомарганцевых окислов, цементирующая слой илов (бокс-корер, 2017 г.)



Рис. 13. Биогенно-терригенные алевро-пелитовые илы северной части Северной котловины, 2018 г.

прослеживается слоистое строение (мощность отложений более 500 м) с несогласными внутренними границами. Верхняя часть разреза отложений древней дельты (под слоем современных илов) представлена переслаиванием глин (содержание фракции 0,005–0,05 мм более 80%) и алевритовых глин (содержание фракции 0,005–0,05 мм до 60%), алевро-песчаных и алевритовых (глинистые алевриты, содержание алевритовой фракции 51–63%) отложений. К центральным частям и к верхней части склонов приурочены отложения, включающие прослои газовых гидратов. Поверхностный слой отложений представлен серыми, в ряде случаев с буроватым оттенком, пелитовыми алевритами. В зонах разложения газовых гидратов осадок приобретает характерный «творожистый» облик.

Поверхностный слой осадков, отобранных на склонах палеodelты и у ее подножия, характеризуется наличием железомарганцевых окислов. На ст. 17Б-47 (глубина 380 м) слой плотного пластичного алевропелита насыщен фрагментами бурых железомарганцевых окислов, цементирующий осадок (рис. 12).

Отложения глубоководных котловин. Наиболее глубоководные участки дна Южной, Центральной и Северной котловин покрывают биогенно-терригенные алевро-пелитовые илы с прослоями турбидитов.

В Южной впадине эти отложения располагаются на глубинах более 1300 м. Биогенно-терригенные прослои представлены преимущественно алевритовыми пелитами, реже пелитами (содержание фракции 0,005–0,05 мм – от 47 до 95%), серого цвета, с поверхности перекрытые бурым флокулированным разжиженным наилком зоны окисления. Мощность зоны окисления, по данным исследований 2015–2017 гг., составляет от 2 до 10 см, что совпадает с опубликованными ранее данными [9; 25]. Содержание биогенных силикатов в поверхностных отложениях достигает 20% [36]. Пелагические илы состоят главным образом из автохтонного биогенного и аллохтонного тер-

ригенного материалов (пелита и алеврита). Биогенная часть представлена в основном створками отмерших диатомовых водорослей, терригенная – обломками пород, кластогенными минеральными зёрнами и глинистыми минералами [8; 11]. В отличие от вмещающих пелагических илов турбидиты характеризуются повышенным содержанием песка и алеврита, наличием градационной слоистости, темным цветом и присутствием наземных растительных остатков [11]. Прослои турбидитов установлены также во всех колонках, отобранных в пределах глубоководной части Южной впадины в 2017 г.

По литературным данным [8], в минеральном составе отложений преобладают минералы легкой фракции – полевые шпаты (в основном плагиоклазы), слюды (главным образом биотит) и кварц. Присутствуют слюдисто-глинистые агрегаты, максимальное содержание которых (до 8%) приходится на пелагические илы. Кроме того, в составе легкой фракции наблюдаются диатомеи (до 10,8% в пелагических илах), наземные растительные остатки (до 3,2% в турбидитовых слоях) и спикулы губок. В тяжелой фракции преобладают пироксены (в основном диопсид), амфиболы (главным образом роговая обманка), гранат, ильменит, апатит, эпидот; встречаются сфен, магнетит, циркон, турмалин. Содержание тяжелой фракции изменяется по разрезу: от 2 до 7% [9].

Крутой юго-восточный склон Центральной котловины озера Байкал с перепадами глубин от 250 до 1500 м значительно нарушен эрозионными процессами. Поверхностные донные осадки отличаются более тонким гранулометрическим составом по сравнению с отложениями Северного Байкала и представлены пелитовыми алевритами. Содержание алевритовой фракции (0,005–0,05 мм) составляет от 48 до 67%, пелитовой – от 21 до 38%, примесь песчаных частиц незначительна (от 4 до 6%). Дно Центральной котловины также покрыто биогенно-терригенными алевро-пелитовыми илами.

Донные отложения наиболее глубоководных участков Северной котловины, по данным предыдущих исследований [9; 18; 25; 27; 29], представлены чередованием рыхлых диатомовых илов и плотных, более сухих глин или грубозернистых (алевроитовых и песчаных) турбидитов. Поверхностные отложения северного участка дна Северной котловины, опробованные в ходе работ ВСЕГЕИ 2018 г., представлены алевро-пелитами с очень хорошо выраженной зоной окисления от темно-коричневого цвета («темный шоколад») до светло-ярко-бурого цвета. Вниз по интервалу (0–5 см) цвет осадка закономерно изменяется от светло- до темно-бурого, по нижнему контакту зоны окисления на большинстве станций наблюдаются уплотненные линзовидные прослои темно-коричневого цвета, обогащенный гидроокислами Fe и Mn и представляющие собой, вероятно, начальную стадию образования железомарганцевых корок (рис. 13).

Осадки подножия северного склона Академического хребта (ст. 18Б-35, глубина 890 м) представлены бурым разжиженным пелито-песчано-алевроитовым флоккулированным илом с большим количеством диатомовых водорослей. В гранулометрическом составе повышено содержание песчаных частиц (до 20%).

Отложения восточного склона Северной впадины, по литературным данным [9; 18; 25; 27; 29], были отнесены к терригенно-биогенным пелитовым илам. По результатам гранулометрического анализа образцов, отобранных в 2018 г., установлено, что содержание алевроитовой фракции в поверхностных осадках колеблется от 70 до 78% при близких (10–12% и 10–16%) содержаниях пелитовой и песчаной фракций соответственно. По данным Е. Б. Карабанова [18], содержание створок диатомовых в этих осадках может достигать 60–80%. Описываемое поле было отнесено к типу терригенно-биогенных пелитово-алевроитовых илов.

Отложения склона впадины отличаются по литологическому облику от осадков дна котловины. Во всех образцах также проявлена поверхностная зона окисления, выраженная слоем разжиженного пелитового алевроита (алевроита) бурого цвета мощностью от 5 до 7 см, однако на всех станциях эти осадки с резкой цветовой границей переходят в однородные мягкопластичные алевропелиты. Обогащение окислами и гидроокислами железа по нижней границе отмечено только в отложениях ст. 18Б-32.

Терригенно-биогенные отложения. *Отложения Академического хребта.* Ярким примером района со спокойными условиями осадконакопления является подводный Академический хребет. Поверхностные осадки представлены терригенно-биогенными илами, состоящими из автохтонного биогенного (створки диатомей, реже спикулы губок) и аллохтонного терригенного материала, не содержат турбидитов. Лишь осаждение перенесенного льдом и ветром материала приводит

к формированию единичных линз и рассредоточенных зерен алевроитовой и, реже, песчаной размерности [9]. Донные отложения, вскрытые грунтовыми трубками, представлены голоценовыми илами и подстилающими их позднеэоценовыми глинами.

По данным пробоотбора и гранулометрического анализа, выполненного в 2018 г., доминирующим типом поверхностных отложений Академического хребта являются пелитово-алевроитовые илы (станции 18Б-38, 18Б-11). Содержание алевроитовой фракции колеблется в диапазоне от 61 до 70%, пелитовой – от 14 до 26%, песчаной – от 8 до 13%.

Поверхностные отложения представлены разжиженными илами, в верхней части с большим содержанием диатомовых водорослей. На глубине 4 см в осадке ст. 18Б-38 отмечается большое количество гидроокислов железа и марганца в виде небольших выделений и корок. В осадках ст. 18Б-11 поверхностный слой (2 см) разжиженного бурого ила содержит включения гидроокислов железа в виде отдельных зерен размером до 3 мм, зона ожелезнения проходит по нижнему контакту прослоя. Общий цвет осадка бурый. Как упоминалось выше, по периферии архипелага Ушканьи Острова в литоральной зоне развиты песчаные осадки. По данным пробоотбора 2018 г., песчаными частицами обогащены также илы на глубинах от 610 и 890 м. Отложения представлены бурыми разжиженными флоккулированными илами пелитово-алевроитовыми илами с небольшим количеством диатомовых водорослей.

Отложения глубоководных впадин. Обширные поля глубоководных илов с прослоями турбидитов, по данным Е. Г. Вологиной, развиты во всех трех глубоководных котловинах озера Байкал.

Глубоководные склоны и днище Южной и Центральной котловин покрыты гемипелагическими илами терригенно-биогенного генезиса алевроитово-пелитового и пелитового составов. Доля створок диатомовых в современных илах этого типа колеблется от 10–15 до 50%. Примесь песчаных частиц может достигать 5–7%, более грубые частицы отмечаются редко [18]. Текстуры илов преимущественно тонкослоистые. Слоистость обусловлена, в первую очередь, изменением содержания терригенной и биогенной составляющих. В большинстве кернов, отобранных в пределах плоских глубоководных частей дна котловин озера, были вскрыты турбидиты (отложения суспензионных потоков), переслаивающиеся с пелагическими илами. По данным [9] наряду с описанными выше гранулометрическими и текстурными признаками, отличающими турбидиты от пелагических осадков [25; 27], в описываемом районе дна акватории для них характерны повышенное содержание минералов тяжелой фракции, высокие значения магнитной восприимчивости, пониженная концентрация планктонных диатомей и повышенная доля бентосных форм и древних видов [9].

Помимо большого количества створок диатомовых водорослей, в осадках может присутствовать значительное количество остатков высшей растительности, спикулы губок и цисты золотистых водорослей. При высоком содержании биогенного кремния, содержание $C_{орг.}$ и $N_{общ.}$ достигает 2–3% и 0,1–0,2% соответственно, что обусловлено как высокой продуктивностью озера, так и значительным сносом органического вещества с водосбора [18].

Алеврито-пелитовые илы занимают большую часть дна озера и наиболее широко представлены в Северной и Южной котловинах Байкала, где распространены на глубинах от 250 до 1550 м. По внешнему виду это тонкие илы светло-серые до темно-серых, часто с коричневатым оттенком, иногда почти черные, мягкие, вязкие, реже полужидкие. Обычна и значительна примесь более мелкого пелитового материала и панцирей диатомовых водорослей. Пелитовые (глинистые) илы занимают центральные наиболее глубокие участки дна озера и широко распространены в Центральной котловине озера. Имеют различную по интенсивности окраску, иногда с зеленоватым, голубоватым и буроватым оттенком. Обычно слабобластичны, содержат незначительную примесь алеврита и песка. Часто велика доля остатков диатомей, иногда достигающая до 60%, что переводит такие илы в разряд диатомовых. В то же время опробование донных отложений на глубоководных равнинах показало, что слоистость осадков, отмечаемая на сейсмических профилях, обусловлена чередованием более рыхлых, увлажненных диатомовых илов и плотных, более сухих глин, а также наличием большого количества грубозернистых (алевритовых и песчаных) турбидитов. Турбидитные отложения обнаружены в осадках глубоководных равнин всех трех котловин озера, что хорошо согласуется с сейсмическими данными [38]. Осадочные колонки, лишённые турбидитов, крайне редки в бассейнах озера. Глубоководное бурение на плоском дне Южной котловины (скв. ВDP97) на глубине 1428 м на удалении 15 км от берега также подтвердило наличие песчаных турбидитов на всю глубину вскрытого разреза (225 м). При этом мощность песчаных турбидитов в скв. ВDP97 достигала 50–150 см, а их доля в разрезе составляла 87%, что указывает на огромную мощность турбидитных потоков и их важную роль в седиментационных процессах в котловинах озера [18].

Поверхностные отложения верхней (пологой) части южного склона Южной котловины представлены терригенно-биогенными пелитово-алевритовыми илами. Нижняя (крутая) часть склонов перекрыта пелитово-алевритовыми илами с примесью песка.

Заключение. Таким образом, по результатам комплексного анализа, полученным в 2015–2020 гг., геолого-геофизических данных и лабораторных работ, а также результатов опубликованных исследований донных отложений и седиментаци-

онных процессов озера Байкал впервые составлена литологическая карта дна акватории масштаба 1 : 500 000. Наиболее детальные карты-врезки удалось составить для ключевых участков, для которых была получена качественная геофизическая основа с площадным покрытием дна акватории (многолучевое эхолотирование, гидролокация бокового обзора). Начатые работы необходимо продолжить, так как актуальная информация о распределении поверхностных отложений имеет огромное значение с точки зрения проведения междисциплинарных исследований, а также обеспечения экологической безопасности и охраны окружающей среды озера Байкал.

Авторы выражают огромную благодарность бессменному руководителю морских геологических работ на Байкале с 2015 г., ведущему научному сотруднику ВСЕГЕИ В. А. Шахвердову, начальнику полевой партии О. В. Дроню, а также капитанам и экипажам научно-исследовательских судов за самоотверженный труд, который позволил существенно пополнить имеющуюся базу знаний о поверхностных отложениях озерной котловины. Исследования выполнены в рамках реализации мероприятий ФЦП «Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие Байкальской природной территории на 2012–2020 годы» по объекту «Геологическое изучение опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов Б. П. Асимметричность литопотока в бассейне Среднего Байкала // Докл. РАН. – 2007а. – Т. 412, № 6. – С. 818–821.
2. Агафонов Б. П. Асимметричность литопотока в бассейне Южного Байкала // Известия Русского географического общества. – 2007б. – Т. 139, вып. 6. – С. 64–70.
3. Агафонов Б. П. Экзолитодинамика Байкальской рифтовой зоны. – Новосибирск : Наука, 1990. – 176 с.
4. Атлас «Байкал». – М. : Федеральная служба геодезии и картографии России, 1993. – 160 с.
5. Атлас Иркутской области. – М. ; Иркутск, 1962. – 182 с.
6. Беркин Н. С., Макаров А. А., Русинек О. Т. Байкаловедение: учебное пособие. – Иркутск : Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2009. – 291 с.
7. Бухаров А. А., Фиалков В. А. Геологическое строение дна Байкала. Взгляд из «Пайсиса». – Новосибирск : Наука, 1996. – 118 с.
8. Вологина Е. Г. Минеральный состав поверхностных донных осадков и наносов притоков в районе северного берега Южной котловины озера Байкал // Известия Ирк. гос. ун-та. Серия «Науки о Земле». – 2012. – Т. 5, № 2. – С. 86–95.
9. Вологина Е. Г., Штурм М. Типизация голоценовых отложений и районирование бассейна озера Байкал // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 8. – С. 933–940.
10. Вологина Е. Г., Штурм М., Воробьева С. С. Современное осадконакопление в озере Байкал. Результаты экспериментов с седиментационными ловушками // Осадочная геология Урала и прилегающих регионов: сегодня и завтра. Материалы 12 Уральского литоло-

гического совещания. – Екатеринбург : ИИГ УрО РАН, 2018. – С. 62–63.

11. Вологина Е. Г., Штурм М., Радзиминович Я. Б. Состав донных осадков оз. Байкал, отобранных в районе ст. Шарыжалгай Кругобайкальской железной дороги // Известия Ирк. гос. ун-та. Серия «Науки о Земле». – 2014. – Т. 7. – С. 75–83.

12. Высокорастворимая осадочная запись по керну глубоководного бурения на Посольской банке в озере Байкал (BDP-99) / Е. В. Безрукова, А. А. Бухаров, В. А. Бычинский и др. // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45, № 2. – С. 163–193.

13. Геология дна Байкала, изученная с подводных аппаратов «Пайсис» / Л. П. Зоненшайн, В. Г. Казьмин, М. И. Кузьмин и др. // Докл. РАН. – 1993. – Т. 330, № 1. – С. 84–88.

14. Геолого-геофизические и подводные исследования оз. Байкал. – М. : Ин-т океанологии АН СССР, 1979. – 213 с.

15. Глубоководное бурение на Байкале – основные результаты / М. И. Кузьмин, Е. Б. Карабанов, Т. Каваи и др. // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 1–2. – С. 8–34.

16. Голдырев Г. С. Осадкообразование и четвертичная история котловины Байкала. – Новосибирск : Наука, 1982. – 182 с.

17. Казьмин В. Г., Гольмшток А. Я., Клитгорд К. Строение и развитие района Академического хребта по данным сейсмических и подводных исследований (Байкальский рифт) // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36, № 10. – С. 164–176.

18. Карабанов Е. Б. Геологическое строение осадочной толщи озера Байкал и реконструкции изменений климата Центральной Азии в позднем кайнозое (на основе изучения байкальских осадков) // Дисс. д-ра геол.-минерал. наук. – М., 1999. – 72 с.

19. Карабанов Е. Б., Фиалков В. А. Морфология и литодинамика подводных каньонов // Геолого-геофизические исследования озера Байкал. – М., 1979. – С. 81–86.

20. Князева Л. М. Современные осадки южной части озера Байкал // Тр. Байкальской лимнологической ст. АН СССР. – 1957. – Т. 15. – С. 159–194.

21. Князева Л. М. Осадкообразование в озерах влажной зоны СССР. Южный Байкал // Образование осадков в современных водоемах. – М. : Изд-во АН СССР, 1954. – С. 180–236.

22. Коллектив участников проекта «Байкал-бурение». Непрерывная запись климатических изменений в отложениях озера Байкал за последние 5 миллионов лет // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39, № 2. – С. 139–156.

23. Озера как накопительные информационные системы и индикаторы климата / Д. В. Субетто, Д. В. Севастьянов, Т. В. Сапелко, В. Р. Бойнагрян, И. М. Греков // Астраханский Вестник экологического образования. – 2017. – № 4 (42). – С. 4–14.

24. Опыт картирования кровли приповерхностных газовых гидратов озера Байкал и извлечение газа из них / О. М. Хлыстов, Ш. Нишио, А. Ю. Манаков, Х. Сухияма, А. В. Хабубев, О. В. Белоусов, М. А. Грачев // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 9. – С. 1415–1425.

25. Осадконакопление в заливе Провал (озеро Байкал) после катастрофического затопления прибрежной равнины в 1862 г. / Е. Г. Вологина, И. А. Калугин, Ю. Н. Осуховская, М. Штурм, Н. В. Игнатова, Я. Б. Радзиминович, А. В. Дарьин, М. И. Кузьмин // Докл. РАН. – 2007б. – Т. 417, № 4. – С. 511–516.

26. Основные результаты работ по геологическому изучению процессов. Связанных с миграцией углеводородов в акватории озера Байкал / О. В. Петров, А. И. Ларичев, В. А. Шахвердов, А. В. Брылина, Ю. П. Кропачев, О. В. Дронь, В. П. Исаев, А. Г. Кичигин, А. М. Лыгин // Региональная геология и металлогения. – 2023. – С. 4–28.

27. Особенности осадконакопления в озере Байкал в голоцене / Е. Г. Вологина, М. Штурм, С. С. Воробьева, Л. З. Гранина, С. Ю. Тошаков // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44, № 5. – С. 407–421.

28. Особенности состава и строения верхней части осадочной толщи в котловине Байкала / Г. С. Голдырев, Л. А. Выхристюк, Ф. И. Лазо, М. К. Шимарева // V Всесоюз. симпозиум (Тез. докл.). – Иркутск, 1979. – С. 37–42.

29. Результаты седиментологических исследований голоценовых отложений Южной и Средней котловины озера Байкал (на примере скважины BDP-97 и колонковых трубок) / Е. Г. Вологина, С. А. Кашик, М. Штурм, С. С. Воробьева, Т. К. Ломоносова, И. А. Калашникова, Т. И. Храмцова, С. Ю. Тошаков // Геология и геофизика. – 2007а. – Т. 48, № 4. – С. 401–413.

30. Сигналы палеоклиматов верхнего плейстоцена в осадках озера Байкал / М. А. Грачев, Е. Е. Лихошвай, С. С. Воробьева и др. // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38, № 5. – С. 957–980.

31. Страхов Н. М. Основы теории литогенеза. – М. : Изд-во АН СССР, 1960–1962. – Т. 1–3.

32. Строение и развитие подводного Академического хребта (озеро Байкал) / О. М. Хлыстов, В. Д. Мац, С. С. Воробьева, А. В. Климанский, М. де Батист, С. Черамикола // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 6. – С. 819–824.

33. Строение осадочного чехла озера Байкал / В. Г. Николаев, Л. А. Ванякин, В. В. Калинин и др. // Бюлл. МОИП. Отдел геол. – 1985. – Т. 60, вып. 2. – С. 48–58.

34. Факторы, контролирующие распределение урана, фосфора и микроэлементов в осадках Академического хребта озера Байкал / С. М. Жмодик, И. С. Кириченко, Д. К. Белянин, О. М. Хлыстов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2014. – № 3, ч. 2. – С. 103–106.

35. Хлыстов О. М., Кононов Е. Е., Минами Х. Новые данные о рельефе подводного южного склона Южно-Байкальской котловины // География и природные ресурсы. – 2018. – № 1. – С. 59–65.

36. ³²Si dating of sediments from Lake Baikal / U. Morgenstern, R. G. Ditchburn, E. G. Vologina, M. Sturm // J. Paleolimnol. – 2013. – Vol. 50. – Pp. 345–352.

37. Climate Change in Lake Baikal: Diatom Evidence in an Area of Continuous Sedimentation / M. Bangs, R. W. Battarbee, R. J. Flower, D. Jewson, J. A. Lees, M. Sturm, E. G. Vologina, A. W. Mackay // International Journal of Earth Sciences. – 2000. – Vol. 89. – Pp. 251–259.

38. Colman S. M., Karabanov E. B., Nelson C. H. Quaternary Sedimentation and Subsidence History of Lake Baikal, Siberia, Based on Seismic Stratigraphy and Coring // Journal of Sedimentary Research. – 2003. – Vol. 73, no. 6. – Pp. 941–956.

39. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data / D. R. Hutchinson, A. J. Golmshtok, L. P. Zonenshain, T. C. Moore, C. A. Scholz, K. D. Klitgord // Geology. – 1992. – Vol. 20, no 7. – Pp. 589–592.

40. Folk R. L., Ward W. C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters // Journal of Sedimentary Petrology. – 1954. – Vol. 27. – Pp. 3–26.

41. Granina L. Z., Baryshev V. B., Grachev A. M. Study of the elemental composition of suspended sediments in Lake Baikal and its tributaries by X-ray fluorescent analysis based on synchrotron radiation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1995. – Vol. 359. – Pp. 302–304.

42. Lake Baikal paleoclimate project, South-Eastern Siberia: initial dating and paleoenvironmental results. International Project on Paleolimnology and Late Cenozoic Climate / S. M. Colman, E. B. Karabanov, D. F. Williams, P. P. Hearn, J. W. King, W. H. Orem, J. P. Bradbury, W. C. Shanks, G. A. Jones, S. W. Carter // IPCCCE Newsletter. – 1992. – Vol. 6. – Pp. 30–39.

43. Lake Baikal turbidite system: tectonic, sediment supply and paleoclimatic controls / C. H. Nelson, E. B. Karabanov, C. Escuita, M. De Batist, K. D. Klitgort, S. M. Colman // *Active Tectonic continental basins: interaction between structural and sedimentary processes*. – 1998. – Pp. 27–32.

44. Lukhoshvay A. V., Gravhev M. A. Phosphate anion sorption by the sediments of Lake Baikal // *Chemistry for Sustainable Development*. – 2006. – Vol. 14. – Pp. 75–82.

45. Paleoenvironmental record in Lake Baikal sediments: Environmental changes in the last 160 ky / T. Grygar, J. Kadlec, P. Pruner, G. Swann, P. Bezdicka, D. Hradil, K. Lang, K. Novotna, H. Oberhansli // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2006. – Vol. 237. – Pp. 240–254.

46. Tectonic and sediment supply control of deep rift lake turbidite systems: Lake Baikal, Siberia, Russia / C. H. Nelson, E. B. Karabanov, S. M. Colman, C. Escuita // *Geology*. – 1999. – Vol. 27, no. 2. – Pp. 163–166.

47. Vologina E. G., Sturm M., Budnev N. M. Results of long-term measurements of particulate matter in Lake Baikal // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2022. – Vol. 4. – Pp. 1606–1609.

REFERENCES

1. Agafonov B. P. Asimmetrichnost' litopotoka v bassejne Srednego Baykala. *Doklady Akademii nauk*, 2007a, vol. 412, no. 6, pp. 818–821.

2. Agafonov B. P. Assimetrichnost' litopotoka v bassejne Yuzhnogo Baykala. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2007b, vol. 139, iss. 6, pp. 64–70.

3. Agafonov B. P. Ekzolitodinamika Baykal'skoy riftovoy zony. Novosibirsk, Nauka, 1990, 176 p.

4. Atlas «Baykal». Moscow, Federal'naya sluzhba geodezii i kartografii Rossii, 1993, 160 p.

5. Atlas Irkutskoy oblasti. Moscow, Irkutsk, 1962, 182 p.

6. Berkin N. S., Makarov A. A., Rusinek O. T. Baykalovedenie: uchebnoe posobie. Irkutsk, Izdatel'stvo Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta, 2009, 291 p.

7. Bukharov A. A., Fialkov V. A. Geologicheskoe stroenie dna Baykala. Vzgl'yad iz «Paysisa». Novosibirsk, Nauka, 1996, 118 p.

8. Vologina E. G. Mineral'nyy sostav poverkhnostnykh donnykh osadkov i nanosov pritokov v rayone severnogo brega Yuzhnoy kotloviny ozero Baykal. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»*, 2012, vol. 5, no. 2, pp. 86–95.

9. Vologina E. G., Shturm M. Tipizatsiya golotsenovykh otlozheniy i rayonirovanie bassejna ozero Baykal. *Geologiya i geofizika*, 2009, vol. 50, no. 8, pp. 933–940.

10. Vologina E. G., Shturm M., Vorob'eva S. S. Sovremennoe osadkonakoplenie v ozere Baykal. Rezul'taty eksperimentov s sedimentatsionnymi lovushkami. Osadochnaya geologiya Urala i prilozhashchikh regionov: segodnya i zavtra. *Materialy 12 Ural'skogo litologicheskogo soveshchaniya*. Ekaterinburg, 2018, pp. 62–63.

11. Vologina E. G., Shturm M., Radziminovich Ya. B. Sostav donnykh osadkov oz. Baykal, otobrannykh v rayone st. Sharyzhalgay Krugobaykal'skoy zheleznoy dorogi. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»*, 2014, vol. 7, pp. 75–83.

12. Bezrukova E. V., Bukharov A. A., Bychinskiy V. A. et al. Vysokorazreshayushchaya osadochnaya zapis' po kernu glubokovodnogo bureniya na Posol'skoy banke v ozere Baykal (BDP-99). *Geologiya i geofizika*, 2004, vol. 45, no. 2, pp. 163–193.

13. Zonenshayn L. P., Kaz'min V. G., Kuz'min M. I. et al. Geologiya dna Baykala, izuchennaya s podvodnykh apparatov «Paysis». *Doklady Akademii nauk*, 1993, vol. 330, no 1, pp. 84–88.

14. Geologo-geofizicheskie i podvodnye issledovaniya oz. Baykal. Moscow, Institut okeanologii AN USSR, 1979, 213 p.

15. Kuz'min M. I., Karabanov E. B., Kavay T. et al. Glubokovodnoe burenie na Baykale – osnovnye rezul'taty. *Geologiya i geofizika*, 2001, vol. 42, no. 1–2, pp. 8–34.

16. Goldyrev G. S. Osadkoobrazovanie i chetvertichnaya istoriya kotloviny Baykala. Novosibirsk, Nauka, 1982, 182 p.

17. Kaz'min V. G., Gol'mshtok A. Ya., Klitgort K. Stroenie i razvitie rayona Akademicheskogo khrebtta po dannym seysmicheskikh i podvodnykh issledovaniy (Baykal'skiy rift). *Geologiya i geofizika*, 1995, vol. 36, no. 10, pp. 164–176.

18. Karabanov E. B. Geologicheskoe stroenie osadochnoy tolshchi ozero Baykal i rekonstruktsii izmeneniy klimata Tsentral'noy Azii v pozdnem kaynozoe (na osnove izucheniya baykal'skikh osadkov). Moscow, 1999, 72 p.

19. Karabanov E. B., Fialkov V. A. Morfologiya i litodinamika podvodnykh kan'onov. *Geologo-geofizicheskie issledovaniya ozero Baykal*, Moscow, 1979, pp. 81–86.

20. Knyazeva L. M. Sovremennye osadki yuzhnoy chasti ozero Baykal. *Trudy Baykal'skoy limnologicheskoy stantsii AN USSR*, 1957, vol. 15, pp. 159–194.

21. Knyazeva L. M. Osadkoobrazovanie v ozerakh vlahznoy zony USSR. Yuzhnyy Baykal. Obrazovanie osadkov v sovremennykh vodoemakh. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1954, pp. 180–236.

22. Kollektiv uchastnikov proekta «Baykal-burenie». Nepreryvnaya zapis' klimaticheskikh izmeneniy v otlozheniyakh ozero Baykal za poslednie 5 millionov let. *Geologiya i geofizika*, 1998, vol. 39, no. 2, pp. 139–156.

23. Subetto D. V., Sevast'yanov D. V., Sapelko T. V. et al. Ozero kak nakopitel'nye informatsionnye sistemy i indikatory klimata. *Astrakhanskiy Vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*, 2017, no. 4 (42), pp. 4–14.

24. Khlystov O. M., Nishio Sh., Manakov A. Yu. et al. Opyt kartirovaniya krovli pripoverkhnostnykh gazovykh gidratov ozero Baykal i izvlechenie gaza iz nikh. *Geologiya i geofizika*, 2014, vol. 55, no. 9, pp. 1415–1425.

25. Vologina E. G., Kalugin I. A., Osukhovskaya Yu. N. et al. Osadkonakoplenie v zalive Proval (ozero Baykal) posle katastroficheskogo zatopeniya pribrezhnoy ravniny v 1862 g. *Doklady Akademii nauk*, 2007b, vol. 417, no. 4, pp. 511–516.

26. Petrov O. V., Larichev A. I., Shakhverdov V. A. et al. Osnovnye rezul'taty rabot po geologicheskomu izucheniyu protsessov. Svyazannykh s migratsiyey uglevodorodov v akvatorii ozero Baykal. *Regional Geology and Metallogeny*, 2023, pp. 4–28.

27. Vologina E. G., Shturm M., Vorob'eva S. S. et al. Osobennosti osadkonakopleniya v ozere Baykal v golotsene. *Geologiya i geofizika*, 2003, vol. 44, no. 5, pp. 407–421.

28. Goldyrev G. S., Vykhristyuk L. A., Lazo F. I. et al. Osobennosti sostava i stroeniya verkhney chasti osadochnoy tolshchi v kotlovine Baykala. V *Vsesoyuznyy simpozium*. Irkutsk, 1979, pp. 37–42.

29. Vologina E. G., Kashik S. A., Shturm M. Rezul'taty sedimentologicheskikh issledovaniy golotsenovykh otlozheniy Yuzhnoy i Sredney kotlovin ozero Baykal (na primere skvazhiny BDP-97 i kolonkovykh trubok). *Geologiya i geofizika*, 2007a, vol. 48, no. 4, pp. 401–413.

30. Grachev M. A., Likhoshvay E. E., Vorob'eva S. S. et al. Signaly paleoklimatov verkhnego pleystotsena v osadkakh ozero Baykal. *Geologiya i geofizika*, 1997, vol. 38, no. 5, pp. 957–980.

31. Strakhov N. M. Osnovy teorii litogeneza. Moscow, Izdatel'stvoan USSR, 1960–1962, vol. 1–3.

32. Khlystov O. M., Mats V. D., Vorob'eva S. S. et al. Stroenie i razvitie podvodnogo Akademicheskogo khrebtta (ozero Baykal). *Geologiya i geofizika*, 2000, vol. 41, no. 6, pp. 819–824.

33. Nikolaev V. G., Vanyakin L. A., Kalinin V. V. et al. Stroenie osadochnogo chekhla ozero Baykal. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel geologicheskiiy*, 1985, vol. 60, iss. 2, pp. 48–58.

34. Zhmodik S. M., Kirichenko I. S., Belyanin D. K. Faktory, kontroliruyushchie raspredelenie urana, fosfora

- i mikroelementov v osadkakh Akademicheskogo khrebtu ozera Baykal. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri*, 2014, no. 3, chap. 2, pp. 103–106.
35. Khlystov O. M., Kononov E. E., Minami Kh. Novye dannye o rel'efe podvodnogo yuzhnogo sklona Yuzhno-Baykal'skoy kottlovinoy. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2018, no. 1, pp. 59–65.
36. Morgenstern U., Ditchburn R. G., Vologina E. G. et al. ^{32}Si dating of sediments from Lake Baikal. *J. Paleolimnol*, 2013, vol. 50, pp. 345–352.
37. Bangs M., Battarbee R. W., Flower R. J. et al. Climate Change in Lake Baikal: Diatom Evidence in an Area of Continuous Sedimentation. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, vol. 89, pp. 251–259.
38. Colman S. M., Karabanov E. B., Nelson C. H. Quaternary Sedimentation and Subsidence History of Lake Baikal, Siberia, Based on Seismic Stratigraphy and Coring. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, vol. 73, no. 6, pp. 941–956.
39. Hutchinson D. R., Golmshtok A. J., Zonenshain L. P. et al. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data. *Geology*, 1992, vol. 20, no 7, pp. 589–592.
40. Folk R. L., Ward W. C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1954, vol. 27, pp. 3–26.
41. Granina L. Z., Baryshev V. B., Grachev A. M. Study of the elemental composition of suspended sediments in Lake Baikal and its tributaries by X-ray fluorescent analysis based on synchrotron radiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1995, vol. 359, pp. 302–304.
42. Colman S. M., Karabanov E. B., Williams D. F. et al. Lake Baikal paleoclimate project, South-Eastern Siberia: initial dating and paleoenvironmental results. *International Project on Paleolimnology and Late Cenozoic Climate. IPPCCE Newsletter*, 1992, vol. 6, pp. 30–39.
43. Nelson C. H., Karabanov E. B., Escuita C. Lake Baikal turbidite system: tectonic, sediment supply and paleoclimatic controls. *Active Tectonic continental basins: interaction between structural and sedimentary processes*, 1998, pp. 27–32.
44. Lukhoshvay A. V., Gravhev M. A. Phosphate anion sorption by the sediments of Lake Baikal. *Chemistry for Sustainable Development*, 2006, vol. 14, pp. 75–82.
45. Grygar T., Kadlec J., Pruner P. et al. Paleoenvironmental record in Lake Baikal sediments: Environmental changes in the last 160 ky. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, vol. 237, pp. 240–254.
46. Nelson C. H., Karabanov E. B., Colman S. M. et al. Tectonic and sediment supply control of deep rift lake turbidite systems: Lake Baikal, Siberia, Russia. *Geology*, 1999, vol. 27, no. 2, pp. 163–166.
47. Vologina E. G., Sturm M., Budnev N. M. Results of long-term measurements of particulate matter in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology*, 2022, vol. 4, pp. 1606–1609.

Рябчук Дарья Владимировна – канд. геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ. <Daria_Ryabchuk@vsegei.ru>
 Ковалева Ольга Анатольевна – науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Olga_Kovaleva@vsegei.ru>
 Прищепенко Диана Владиславовна – науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Diana_Prichепенко@vsegei.ru>
 Сергеев Александр Юрьевич – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Alexander_Sergeev@vsegei.ru>
 Нестерова Елена Николаевна – вед. специалист, ВСЕГЕИ. <Elena_Nesterova@vsegei.ru>

Ryabchuk Daria Vladimirovna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI. <Daria_Ryabchuk@vsegei.ru>
 Kovaleva Olga Anatolevna – Researcher, VSEGEI. <Olga_Kovaleva@vsegei.ru>
 Prishепенко Diana Vladislavovna – Researcher, VSEGEI. <Diana_Prichепенко@vsegei.ru>
 Sergeev Alexander Yurevich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, VSEGEI. <Alexander_Sergeev@vsegei.ru>
 Nesterova Elena Nikolaevna – Leading Expert, VSEGEI. <Elena_Nesterova@vsegei.ru>

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.

УДК: 553.98(282.256.341-751)
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_48-55

В. А. Шахвердов, М. В. Шахвердова, О. В. Дронь (ВСЕГЕИ)

ПРОЯВЛЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ КАК УНИКАЛЬНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ НА ДНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Проведено комплексное геолого-геофизическое изучение нафтидопроявлений на дне озера Байкал. Установлено, что некоторые из них являются уникальными геологическими объектами. Предлагается рассматривать такие объекты в качестве объектов геологического наследия с приданием им официального охранного статуса.

Ключевые слова: озеро Байкал, геологические памятники, углеводороды.

V. A. Shakhverdov, M. V. Shakhverdova, O. V. Dron (VSEGEI)

HYDROCARBON SHOWS AS UNIQUE GEOLOGICAL TARGETS ON THE LAKE BAIKAL FLOOR

A comprehensive geoscientific study of naphthide occurrences on the bed of Lake Baikal has been carried out. It has been established that some of them are unique geological targets. It is proposed to consider such targets as geological heritage sites and grant them an official conservation status.

Keywords: Lake Baikal, geosites, hydrocarbons.

Для цитирования: Шахвердов В. А., Шахвердова М. В., Дронь О. В. Объекты миграции углеводородов как геологические памятники на дне озера Байкал // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 94. – С. 48–55. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_48-55.

Введение. Геологические памятники являются важнейшей частью природного наследия. Они представляют собой объекты, которые несут в себе разнообразную информацию о состоянии геологической среды и геологических процессах как уникальных, так и типичных. В связи с этим они имеют большое научно-образовательное, культурное и практическое значение и относятся к объектам общенационального достояния. Изучение и сохранение таких памятников природы является актуальной задачей научного сообщества.

Выявление, описание и учет геологических памятников на суше давно стало обязательным условием при проведении работ по геологической съемке различных масштабов. В разных государствах для геологических памятников, расположенных на суше, разрабатываются критерии их выделения и принципы классификации, а также применяются правовые нормативные документы, однако для уникальных объектов на дне морей и озер вообще нет понимания того, являются ли они памятниками. Исследования, которые ФГБУ «ВСЕГЕИ» проводит на озере Байкал, показывают, что на его дне существуют геологические объекты, являющиеся уникальными с точки зрения информации о геологических процессах и истории развития не только самого озера, но и нашей планеты в целом.

Объекты и методы. Центральная экологическая зона Байкальской природной территории приурочена к крупной нефтегазоносной структуре, о чем свидетельствуют многочисленные нафтидопроявления. Углеводородные системы представлены: горючим газом, нефтью, газовыми кристаллогидратами, растворенными в воде углеводородными газами, растворенными в воде донных осадков. Объектами исследований являлись проявления углеводородов на акватории озера Байкал (рис. 1). Практика наших работ на различных акваториях показала, что среди методов исследований есть группа, которая отличается высокой степенью достоверности оценки состояния объектов геологической среды. Оптимальный комплекс, применявшийся нами, включал геофизические методы (непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), гидролокацию бокового обзора (ГЛБО), комплексное гидроакустическое профилирование); геологические методы (лито-геохимическое описание и опробование донного грунта, газо- и гидрогеохимические исследования донного грунта и придонных вод, экспресс-аналитические гидрогеохимические исследования, подводную фото- и телесъемку).

Результаты. Газовые грифоны. Выходы газа со дна озера, так называемые «газовые грифоны», являются наиболее многочисленными

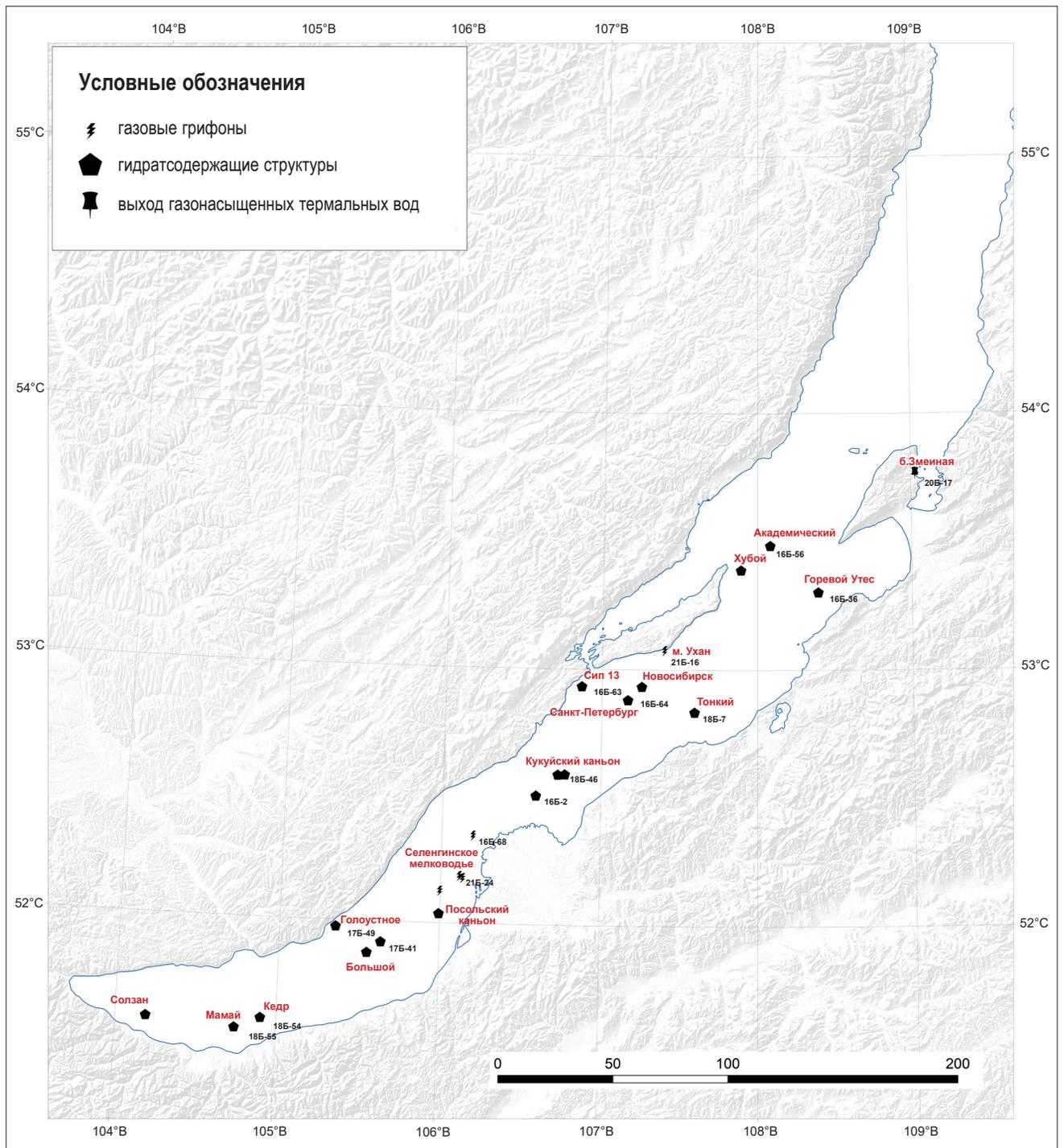


Рис. 1. Схема основных изученных уникальных геологических объектов на дне оз. Байкал

объектами миграции углеводородов [4]. В ходе проведенных комплексных геолого-геофизических работ на озере Байкал только в пределах Селенгинского мелководья было подтверждено и вновь выявлено более 100 газовых грифонов различной степени активности. Газ мигрирует к поверхности по проницаемым зонам, образуя стабильные в пространстве области газовых источников, часто в виде многочисленных газовых струй. Большинство объектов проявлены в толще воды в виде

акустических аномалий, которые фиксируются как в процессе проведения различных видов эхолотирования, так и гидролокации бокового обзора (рис. 2, 3). Рельеф поверхности дна в районе газовых грифонов осложнен уступами и воронками кратероподобной формы, размер которых может достигать 100 м при перепаде глубин до 20 м (рис. 3). Свободный газ характеризуется разнообразием состава. При среднем содержании метана в 53,6 об.% его концентрации

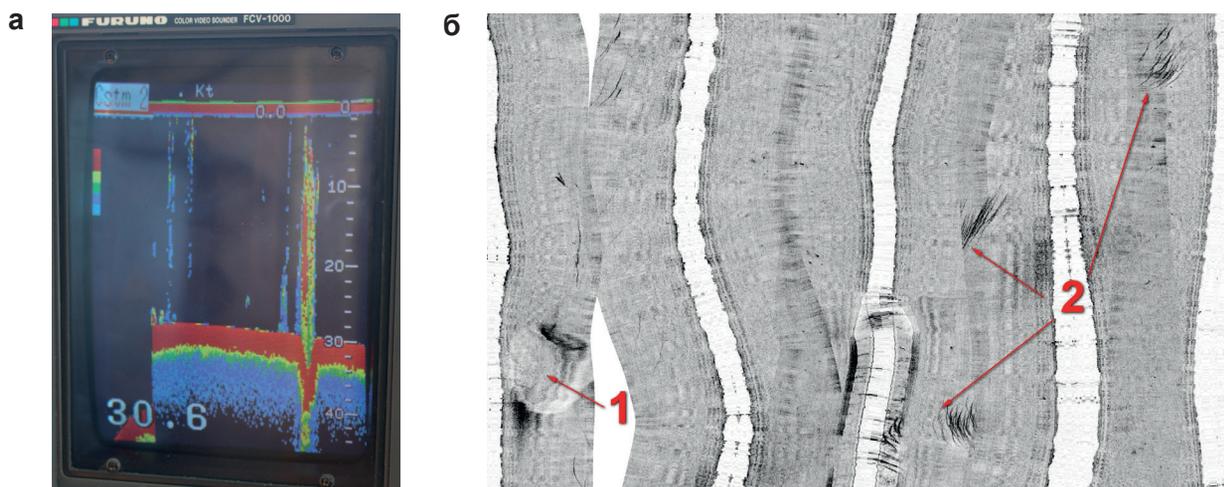


Рис. 2. Проявление выхода газа на судовом эхолоте (а) и фрагменте «мозаики» дна (б): участок Чаячий-1 (ГЛБО)
1 – воронка кратероподобной формы; 2 – следы газовых струй в водной толще

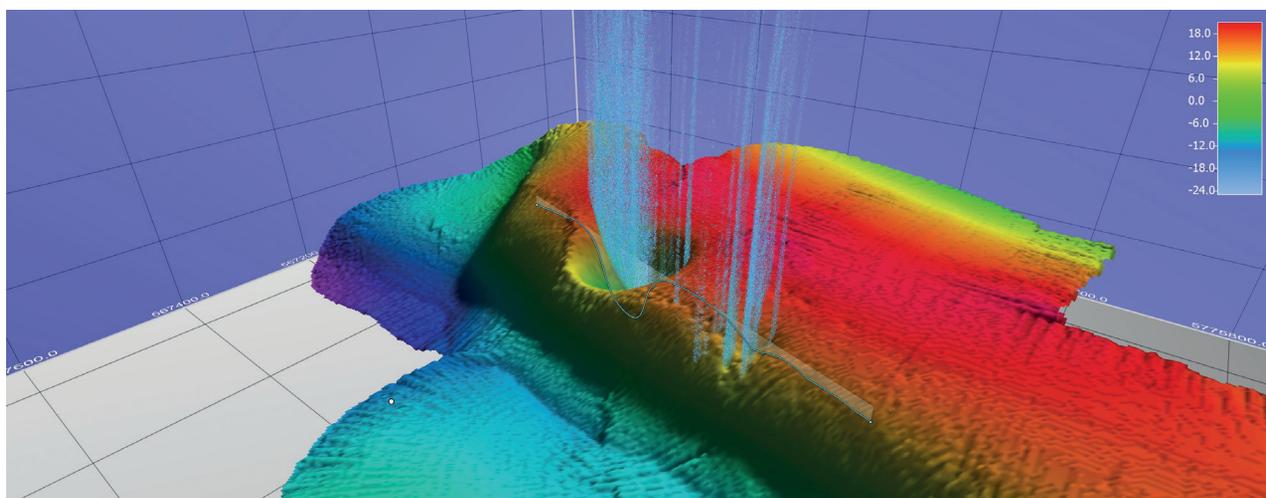


Рис. 3. Объемная модель рельефа поверхности дна и газового факела по данным многолучевого эхолотирования (Селенгинское мелководье)

колеблются от 0,1 до 95,1 об.%. При отсутствии метана основным газом в пробах является азот (до 98,4 об.%).

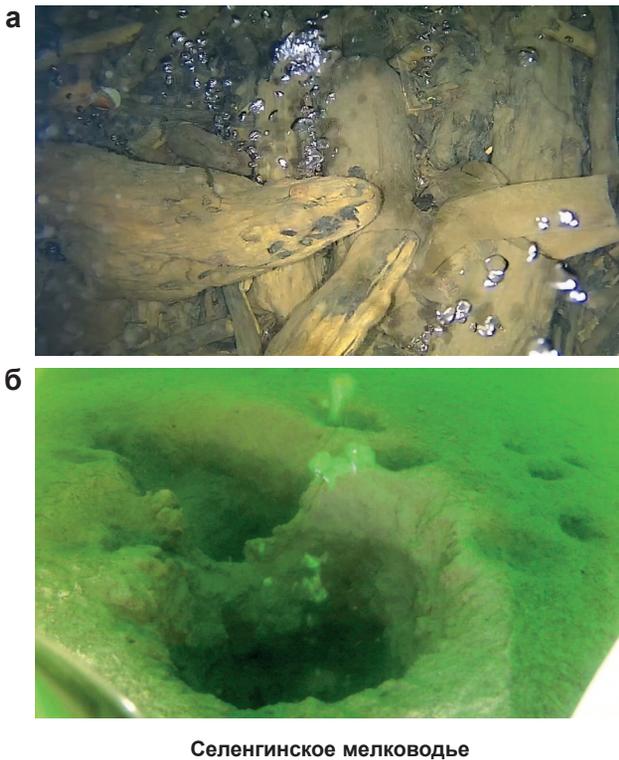
Для некоторых, наиболее активных и уникальных грифонов на глубинах, доступных для аппаратуры, проведена подводная фото- и видеосъемка, которая позволяет судить об интенсивности, характере этих объектов миграции углеводородов и особенностях донного ландшафта вблизи них.

При работах в 2015 г. на Селенгинском мелководье, на ст. 15Б-V10 были получены снимки грифона, самого активного из выходящих на поверхность воды. В месте наиболее активного выделения газа наблюдается обширная область «кипения» воды, которая сопровождается большим количеством более мелких выходов. На протяжении всех лет наблюдений (2015–2020 гг.) грифон сохраняет высокую активность. Струи газа на дне приурочены к обширной воронке, в которой

скапливается большое количество разнообразных обломков стволов и веток деревьев (рис. 4,а).

Из большого количества выходов газа, встреченных в пределах Селенгинского мелководья, следует отметить объект (ст. 16Б-68), на котором в 2016 г. была проведена видеосъемка струй газа, выходящих из зияющих кратероподобных воронок (рис. 4,б). При этом вокруг основного «кратера» присутствует большое количество более мелких «спящих» воронок, из которых газ в момент проведения съемки не выделялся. Подобные объекты также фиксировались и в 2015 г. В целом акваторию Селенгинского мелководья следует рассматривать как уникальную с точки зрения количества и активности газовых грифонов.

Интересные выходы газа встречены и в других частях озера. В Центральной котловине озера в районе мыса Ухан, у побережья о. Ольхон на небольших глубинах неоднократно наблюдались активные выходы газа (рис. 5,б). Там же в 2018 г.



Селенгинское мелководье

Рис. 4. Видеохарактеристика выходов газа и дна в районах проведения подводной фото- и видеосъемки

а – станция 21Б-24, глубина 40 м; б – станция 16Б-68, глубина 27 м

на глубинах около 100 м при выполнении эхолотирования судовым эхолотом зафиксирован мощный газовый грифон, практически выходящий на поверхность воды (рис. 5,а). Позднее, в результате проведения видеосъемки, выходы газа были прослежены от берега до глубины более 40 м (рис. 5,б). Часто они имеют пульсирующий характер с нерегулярной периодичностью пульсаций. Съемка показала, что выходы газа и грифон, вероятно, приурочены к единой зоне тектонических нарушений прослеживающихся от о. Ольхон на глубину.

В Северной котловине в бух. Змеиная Чивыркуйского залива (ст. 19Б-5, глубина 3 м) зафиксированы выходы газонасыщенных термальных вод (рис. 6). Характер источников пульсирующий. На дне наблюдается бурное развитие макрофитов различных видов. Вблизи выходов термальных вод на водорослях отмечается белесый налет, вероятно, связанный с их минерализацией. Исследования, проведенные в 2020 г. (ст. 20Б-17), показали аномальное значение температуры донного грунта, которая составляет на контакте дно-вода – 41,4 °С. При измеренной нами за период наблюдений средней температуре донных осадков на озере Байкал – 4,4 °С. При этом к забюю температура керна увеличивается и на глубине 43 см достигает 48,9 °С. Температура придонной воды здесь составила 18,4 °С. В то время как

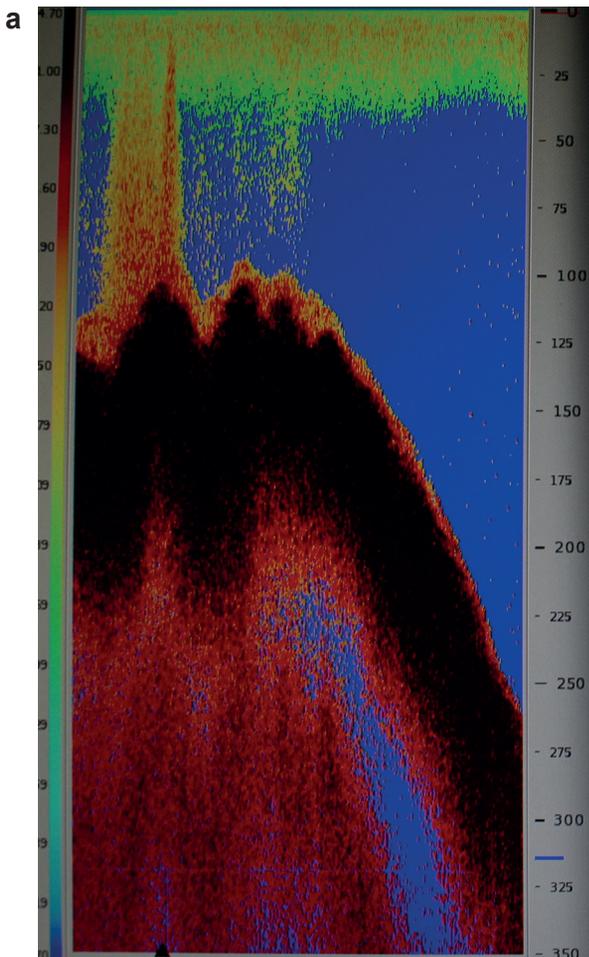


Рис. 5. Выходы газа в районе мыса Ухан

а – вид на судовом эхолоте; б – видеохарактеристика выходов газа со дна в районе ст. 21Б-16 на глубине 3 м; в – на глубине около 20 м

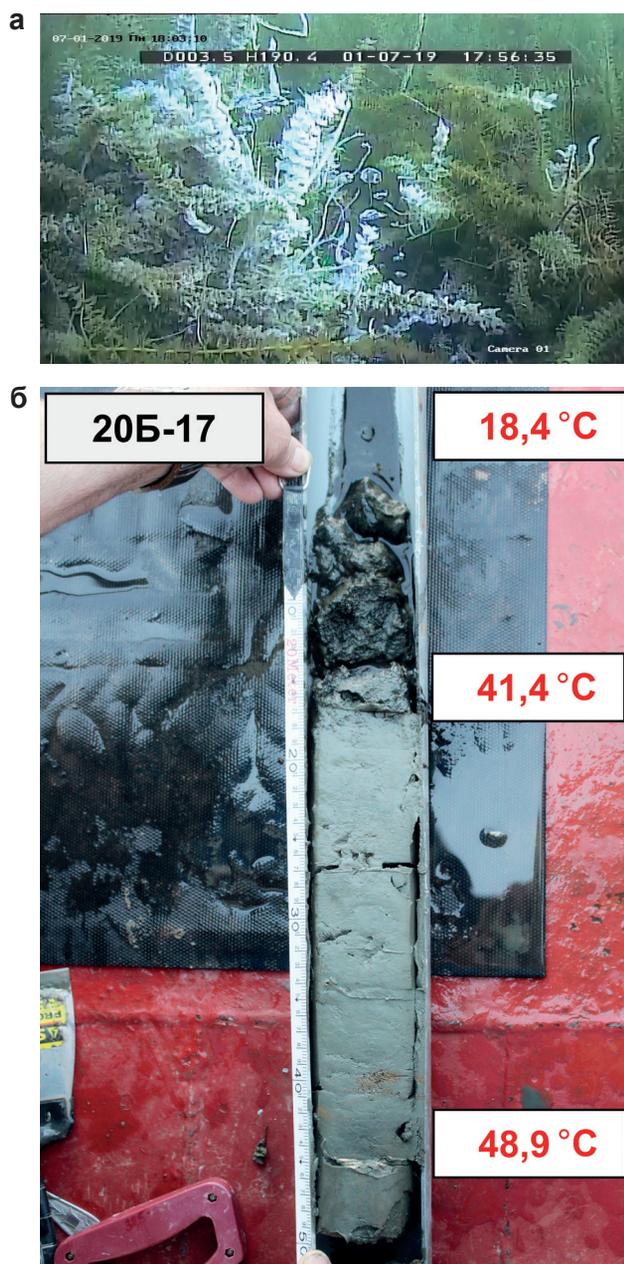


Рис. 6. Характеристика выходов термальных газонасыщенных вод в бух. Змеиная

а – видеохарактеристика (ст. 19Б-5); б – данные по измерениям температуры придонной воды и грунта (ст. 20Б-17) в бентосной трубке

измеренная нами средняя температура придонной воды – около 5,3 °С.

Наблюдения показали аномальные значения и других физико-химических показателей: окислительно-восстановительный потенциал (Eh) и щелочно-кислотные свойства (pH) придонных вод, а также грунта. Придонные воды характеризуются средней, восстановительной по отношению к железу (Eh = 33 mv) и щелочными свойствами (pH = 8,57). Грунт также характеризуется высокой щелочностью (pH = 9,13), в то время как обычно водородный показатель грунта имеет слабокислый или нейтральный характер (в среднем – 7,25 единицы).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что выходящие на дне термальные газонасыщенные воды имеют щелочные и восстановительные (глеевые) по отношению к железу свойства. В газовом составе преобладают азот и метан.

Газовые кристаллогидраты. Байкал является единственным в мире пресноводным озером, в котором встречены газовые кристаллогидраты. Они впервые были обнаружены в 1998 г. при проведении глубоководного бурения по проекту «Байкал-бурение» [3]. К настоящему времени открыто более 50 проявлений газовых гидратов [8]. Скопления газовых гидратов в донных отложениях имеют различную морфологию. Встречаются как массивные выделения (рис. 7,а) и прожилки, так и вкрапленные формы (рис. 7,б). При этом образования разной формы могут быть встречены в керне совместно. Как показали исследования газовых гидратов, выявленных в районе Кукуйского каньона [6], различные по форме их образования имеют и разный тип структуры кристаллического каркаса.

В ходе экспедиций 2016–2020 гг. нами были изучены проявления газовых кристаллогидратов, расположенные в Южной и Центральной котловинах озера Байкал (рис. 1). Их геологическая позиция позволяет предполагать наличие трех типов проявлений. В пределах районов юго-восточного склона

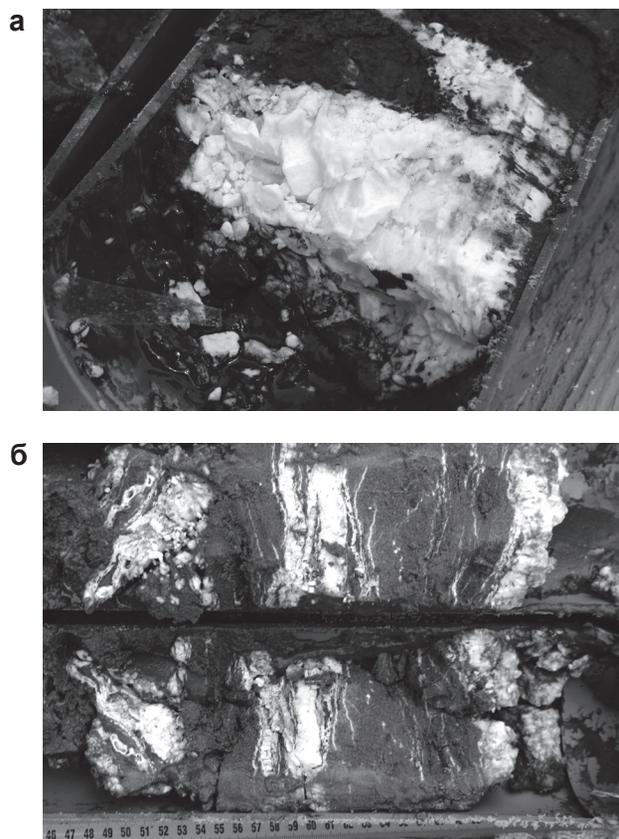


Рис. 7. Примеры различных морфологических форм выделения газовых гидратов (выделения белого цвета)

а – массивные выделения, Кукуйский каньон; б – прожилки и вкрапленные формы, проявление «Санкт-Петербург»

озера («Солзан», «Посольский каньон» и др.) основными являются эрозионные процессы, которые сопровождают формирование каньонов. На Академическом хребте выходы гидратов на поверхности дна («Хубой», «Академический хребет») связаны с тектоническими процессами в сочетании с эрозионными склоновыми процессами. Во впадинах в пределах абиссальных равнин («Санкт-Петербург», «Новосибирск», «Большой» и др.) ведущими являются тектонические процессы.

На 14 проявлениях были отобраны образцы гидратов, разные по морфологическим особенностям: массивные выделения, прожилковые и вкрапленные формы. Газохроматографический анализ газовой составляющей гидратов показал, что основным в ее составе является метан. Его доля в среднем составляет 90,7 об.% и достигает 96 об.%. В относительно небольшом количестве выявлена примесь этана, которая в среднем составляет 0,26 об.% (таблица, гидратный газ – тип 1). В то же время в пробах газа, взятых в районе нефтепроявления «Горевой Утес» и гидратопроявлений «Кедр» и «Мамай», концентрация этана существенна и достигает 4,5 об.% (таблица, гидратный газ – тип 2). Пробы газа, полученные в результате дегазации донного осадка, содержат меньшую концентрацию метана: от 5 до 46 об.%. Большую долю в них составляют азот, кислород и углекислый газ.

По данным публикаций [2], по соотношению стабильных изотопов углерода метана ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) на Байкале встречаются три его генетических типа: эндогенный, термогенный и биогенный. Биогенный (или бактериальный) метан имеет легкий изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C} < -60\text{‰}$), в то время как эндогенный (или мантийный) – тяжелый ($\delta^{13}\text{C} > -30\text{‰}$). Термогенный метан занимает промежуточное положение между биогенным и эндогенным. В то же время, если предположить, что источником метана в гидратах является метан, образовавшийся в результате катогенетических преобразований органического вещества, захороненного в многокилометровой толще подбайкальских осадков, то весь метан должен быть термогенным и отличаться по изотопному составу от биогенного. Однако газ с низким содержанием этана, выделенный из гидратов (тип 1) и полученный в результате дегазации донных осадков (ТВД), а также свободный газ в пределах акватории озера, по изотопному составу существенно не

отличается от биогенного (таблица). Изотопный состав углерода метана, полученный в результате анализа образцов газового гидрата гидратопроявлений «Кедр» и «Мамай» (тип 2), характеризуется более тяжелым изотопным составом углерода метана ($\delta^{13}\text{C}$ до $-44,2\text{‰}$) по сравнению с биогенным метаном.

Анализируя полученные данные изотопных исследований углерода метана из гидратов (тип 1), можно предположить, что в результате образования газового гидрата, а в дальнейшем его разрушения с образованием свободного газа осуществляется фракционирование изотопов углерода. В результате этого процесса метан, как имеющий меньшую теплоту образования (энтальпию плавления) относительно этана, высвобождающийся из газового гидрата, приобретает облегченный, близкий к бактериальному, изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ (от $-61,6$ до $-67,2\text{‰}$). В то время как в тех же образцах изотопный состав углерода в этане, как менее летучем гомологе, смещается в более тяжелую область и составляет $\delta^{13}\text{C}$ (от $-25,3$ до $-37,0\text{‰}$). Аналогичным образом можно объяснить механизм формирования гидратов кубической структуры II при распаде гидратов кубической структуры I и их одновременное присутствие в керне донных отложений на грязевом вулкане К-2 [6]. Таким образом, объяснение авторов этой публикации причин одновременного нахождения двух разных генетических типов углерода в одном объекте является весьма спорным, так же как и обсуждение механизма образования гидратов с разным типом структур, при котором «исходная газовая смесь постепенно обедняется тяжелыми углеводородами» [7; 9].

Выявление объектов, где изотопный состав углерода метана указывает на термогенное его происхождение (таблица, гидратный газ, тип 2), может свидетельствовать в пользу необходимости выделения двух генетических типов проявлений газовых кристаллогидратов. Важным является и то, что кроме метана в них в существенных концентрациях присутствуют и другие его гомологи (этан, пропан, бутан и др.), что, по нашему мнению, может быть связано с большей глубиной источника компонентов гидратов этого типа.

Выходы нефти. Исследования нефтегазоносности озера проводились еще в начале XIX в. экспедицией Петербургской академии наук (И. Г. Гмелин, 1833 г.), в ходе которой впервые были описаны выходы нефти вдоль восточного берега озера

Таблица

Характеристика газов по содержанию в них метана и этана, изотопному составу углерода

Тип газа	Концентрация метана, об. %		Средняя концентрация этана, об. %	CH_4 $\delta^{13}\text{C}$, ‰, PDB, min/max	C_2H_6 $\delta^{13}\text{C}$, ‰, PDB, min/max
	средняя	min/max			
Гидратный, тип 1	90,7	61,9/96,0	0,26	-61,6/-67,2	-25,3/-37,0
Гидратный, тип 2	90,2	88,1/95,7	2,32	-44,2/-51,4	-25,9/-29,6
После ТВД	22,9	5,0/46,1	0,05	-63,0/-63,2	-30,2
Свободный газ	53,6	0,1/95,1	0,06	10,7/-77,8	н/о

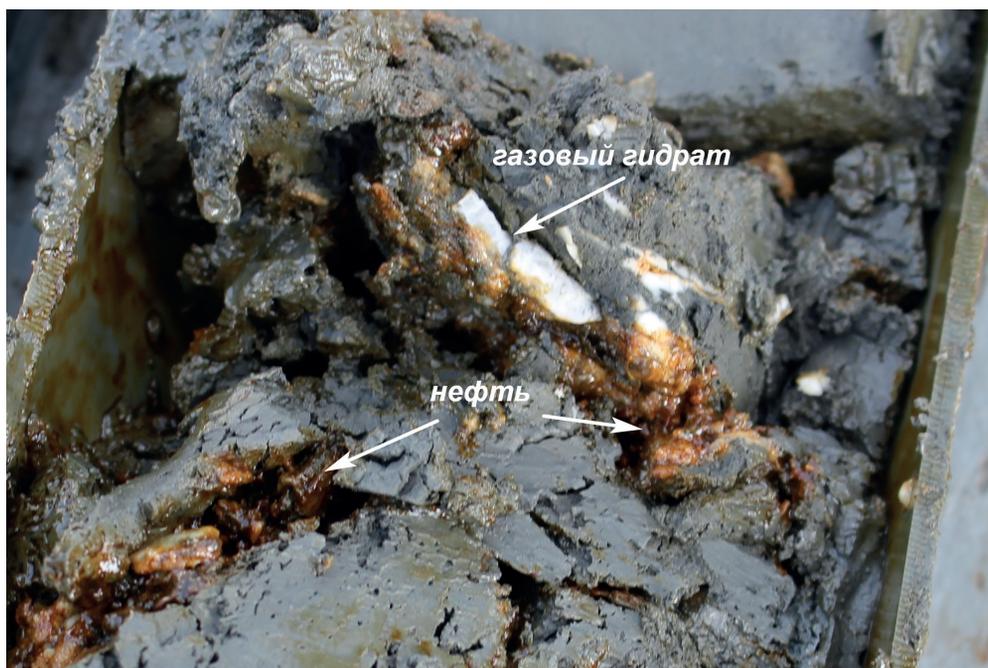


Рис. 8. Совместное нахождение газового гидрата и нефти в керне, ст. 16Б-36 (Горевой Утес)

Байкал. В настоящее время на открытой части акватории нефть фиксируется в виде пленок на поверхности воды, а в зимнее время скапливается подо льдом. В районе мыса Горевой Утес при погружении подводных аппаратов «Мир» (в сезоны 2008–2010 гг.) наблюдались битумные постройки, из которых высачивалась нефть [5].

Летом 2016 г. в ходе экспедиционных работ ФГБУ «ВСЕГЕИ» на НИС «Г. Ю. Верещагин» (ЛИН СО РАН) в районе мыса Горевой Утес с глубины 895 м был поднят донный грунт с нефтью (рис. 8). Проведенные хромато-масс-спектрометрические исследования образцов нефти показали глубокую степень ее биodeградации. Примечательно и очень важно, что при проведении донного опробования с помощью гравитационной трубы в керне, кроме нефти, были обнаружены и газовые гидраты (рис. 8). В составе газа гидратов, кроме метана, в значительных количествах присутствуют его гомологи: этан, пропан и бутан. Отмечено также присутствие алкенов и ароматических углеводородов, что существенно отличает данные газовые гидраты от газовых гидратов других проявлений, в которых нефть отсутствует. Изотопный состав углерода метана газовых гидратов из проявления Горевой Утес ($\delta^{13}\text{C} -44,3\text{‰}$) свидетельствует о глубинном его источнике.

Заключение. Одним из важнейших критериев для выявления объектов геологического наследия является их научная значимость. Под этим М. С. Вдовец [1] подразумевает в том числе уникальность или типичность объекта, активное протекание современных геологических процессов и их масштабность. Всем этим критериям описанные объекты проявления углеводородов на Бай-

кале отвечают в полной мере. На этом основании их отнесение к геологическим памятникам было бы вполне обоснованным и, мы уверены, целесообразным решением. В связи с этим закономерно может быть поставлен вопрос о выявлении, описании, учете и сохранении геологических памятников на дне озера, а также включении их в список объектов геологического наследия и придании им официального охранного статуса. К таковым, кроме уже описанных выше объектов, могут быть отнесены уникальные и типовые подводные ландшафты, геоморфологические, седиментационные, фациально-литологические обстановки и другие геологические объекты на дне озера. Работы должны быть продолжены с целью разработки структуры и составления базы выявленных геологических памятников на дне озера Байкал, для чего необходимо проведение отдельных тематических исследований (с дальнейшим оформлением созданной базы как объекта интеллектуальной собственности). В результате этих работ необходимо также разработать предложения по определению статуса, зон охраны и возможностей рекреационного использования уникальных геологических объектов на дне озер и морей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вдовец М. С. Современное состояние изучения и охраны геологического наследия. Проблемы изучения и охраны объектов геологического наследия России // Материалы Рабочего совещания Российской группы ProGEO. – Миасс, 2007. – С. 12–16.
2. Генетические типы метана озера Байкал / Г. В. Калмычков, А. В. Егоров, М. И. Кузьмин, О. М. Хлыстов // Докл. РАН. – 2006. – Т. 411, № 5. – С. 672–675.

3. Первая находка газогидратов в осадочной толще озера Байкал / М. И. Кузьмин, Г. В. Калмычков, В. Ф. Гелетий и др. // Докл. РАН. – 1998. – Т. 362, № 4. – С. 541–543.
4. Пузырьковые выходы газа из донных отложений / М. М. Макаров, Д. А. Лопаткин, Н. Г. Гранин и др. // Экологический атлас бассейна оз. Байкал. – 2014.
5. Тулохонов А. К. «Миры» байкальских глубин: итоги и размышления / отв. ред. Н. А. Грачев // Байкальский институт природопользования СО РАН. – Улан-Удэ : ЭКОС, 2010. – 80 с.
6. Физико-химическая модель образования газовых гидратов с различным структурным типом на грязевом вулкане К-2 (Кукуйский каньон, озеро Байкал) / А. Ю. Манакон, О. М. Хлыстов, А. Хачикубо, А. Г. Огиенко // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 4. – С. 615–625.
7. Dual hydrate structures SI and SII at the Chapopote Knoll, southern Gulf of Mexico / S. A. Klapp, M. M. Murshed, T. Pape, G. Bohrmann, P. G. Brewer, W. F. Kuhs // Proceedings of the 7-th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011). – Edinburgh, Scotland, United Kingdom. – 2011.
8. Gas hydrates in Lake Baikal / O. M. Khlystov, A. V. Khabuev, H. Minami, A. Hachikubo, A. A. Krylov // Limnology and Freshwater Biology. – 2018. – No. 1. – Pp. 66–70.
9. Mixed gas hydrate structures at the Chapopote Knoll, southern Gulf of Mexico / S. A. Klapp, M. M. Murshed, T. Pape, H. Klein, G. P. Bohrmann, G. Brewer, W. F. Kuhs // Earth and Planetary Science Letters. – 2010. – Vol. 299, no. 1–2. – Pp. 207–217.
- ya i okhrany ob'ektov geologicheskogo naslediya Rossii. *Materialy Rabocheho soveshchaniya Rossiyskoy gruppy ProGEO*, Miass, 2007, pp. 12–16.
2. Kalmychkov G. V., Egorov A. V., Kuz'min M. I. et al. Geneticheskie tipy metana ozera Baykal. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 2006, vol. 411, no. 5, pp. 672–675.
3. Kuz'min M. I., Kalmychkov G. V., Geletiy V. F. et al. Pervaya nakhodka gazogidratov v osadochnoy tolshche ozera Baykal. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 1998, vol. 362, no. 4, pp. 541–543.
4. Makarov M. M., Lopatkin D. A., Granin N. G. et al. Puzyr'kovye vykhody gaza iz donnykh otlozheniy. *Ekologicheskii atlas basseyna oz. Baykal*, 2014.
5. Tulokhonov A. K. «Miry» baykal'skikh glubin: itogi i razmyshleniya. Ed.: N. A. Grachev. *Baykal'skiy institut prirodopol'zovaniya SO RAN*. Ulan-Ude, EKOS, 2010, 80 p.
6. Manakov A. Yu., Khlystov O. M., Khachikubo A. et al. Fiziko-khimicheskaya model' obrazovaniya gazovykh gidratov s razlichnym strukturnym tipom na gryazevom vulkane K-2 (Kukuyskiy kan'on, ozero Baykal). *Geologiya i geofizika*, 2013, vol. 54, no. 4, pp. 615–625.
7. Klapp S. A., Murshed M. M., Pape T. et al. Dual hydrate structures SI and SII at the Chapopote Knoll, southern Gulf of Mexico. *Proceedings of the 7-th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011)*. Edinburgh, Scotland, United Kingdom, 2011.
8. Khlystov O. M., Khabuev A. V., Minami H. et al. Gas hydrates in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology*, 2018, no. 1, pp. 66–70.
9. Klapp S. A., Murshed M. M., Pape T. et al. Mixed gas hydrate structures at the Chapopote Knoll, southern Gulf of Mexico. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, vol. 299, no. 1–2, pp. 207–217.

REFERENCES

1. Vdovets M. S. Sovremennoe sostoyanie izucheniya i okhrany geologicheskogo naslediya. Problemy izucheni-

Шахвердов Вадим Азимович – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ.

<Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>

Шахвердова Марина Васильевна – инженер 2-й категории, ВСЕГЕИ. <Marina_Shakhverdova@vsegei.ru>

Дронь Олег Владимирович – инженер 1-й категории, ВСЕГЕИ. <Oleg_Dron@vsegei.ru>

Shakhverdov Vadim Azimovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, VSEGEI.

<Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>

Shakhverdova Marina Vasilevna – Engineer, VSEGEI. <Marina_Shakhverdova@vsegei.ru>

Dron Oleg Vladimirovich – Engineer, VSEGEI. <Oleg_Dron@vsegei.ru>

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.

УДК: 550.42:546.22:551.312.4(282.256.341)
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_56-67

В. А. Шахвердов, В. Ф. Сапега (ВСЕГЕИ)

О ПЕРВОЙ НАХОДКЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕРЫ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКАХ ГИДРАТСОДЕРЖАЩЕЙ СТРУКТУРЫ P-2 («ПЕСЧАНКА») ОЗЕРА БАЙКАЛ

Представлены результаты изучения аутигенных конкреций из поверхностных донных осадков Южной котловины озера Байкал. В гидратсодержащей структуре P-2 («Песчанка») в них впервые обнаружены выделения элементной серы. Предполагается, что ее образование в конкрециях является следствием неполного биогенного окисления сероводорода кислородом.

Ключевые слова: озеро Байкал, аутигенные конкреции, элементная сера.

V. A. Shakhverdov, V. F. Sapega (VSEGEI)

ON THE FIRST FINDING OF ELEMENTAL SULPHUR IN NEAR-SURFACE SEDIMENTS OF P-2 HYDRATE-BEARING STRUCTURE («PESCHANKA») LAKE BAIKAL

Results of studying authigenic nodules from the surface bottom sediments in the Southern Basin of Lake Baikal are given. In the P-2 hydrate-bearing structure («Peschanka»), elemental sulphur was found in them for the first time. It is assumed that its formation in nodules is a consequence of incomplete biogenic oxidation of hydrogen sulphide by oxygen.

Keywords: Lake Baikal, authigenic nodules, elemental sulphur.

Для цитирования: Шахвердов В. А., Сапега В. Ф. О первой находке элементной серы в приповерхностных осадках гидратсодержащей структуры P-2 («Песчанка») озера Байкал // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 94. – С. 56–67. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_56-67.

Введение. В изучении минералогии донных отложений озера Байкал выделяются три основных направления. Первое связано с уникальностью озера, которая определяется его древним возрастом и непрерывностью геологического разреза. Такие особенности позволяют по составу минералов-индикаторов в разрезе осадков проследить глобальные палеоклиматические изменения в четвертичном периоде практически для всего северного полушария Земли. Наиболее информативными в этом отношении являются данные бурения в рамках проекта «Байкал-бурение» (1993–1999 гг.) [12; 17].

Второе направление минералогических исследований донных осадков озера Байкал заключается в определении источников сноса терригенного материала, стратиграфической корреляции и реконструкции условий седиментации [1; 11; 14; 15].

Третье направление – это изучение процессов диагенеза, с которыми связано широкое распространение в отложениях окисленной зоны аутигенных минералов, таких как лимонит, гидрогетит, псиломелан и др. В восстановительной зоне встречаются гидротроилит, мельниковит, конкреции пирита (марказита) и вивианита [5]. Преимущественно с процессами диагенеза в отложениях озер опре-

деляется и широкое распространение аутигенных сидерита и родохрозита [16], а также и образование железомарганцевых конкреций [6; 20].

В то же время ряд исследователей приходят к выводу о возможной связи образования аутигенных минералов железа и марганца в донных осадках с гидротермальными процессами и выходами углеводородов [9]. Также авторы предполагают, что выходы метана могут сопровождаться подтоком сероводорода, признаком чего является присутствие в современных осадках пирита вблизи метановых сипов. Именно поэтому в последние годы наиболее детальные минералогические исследования посвящены изучению аутигенного минералообразования в современных осадках и роли в нем процессов природной миграции углеводородов. Так, в работах А. А. Крылова [13; 16; 20] показано, что образование карбонатов железа и марганца (сидерита и родохрозита) в приповерхностных отложениях может быть генетически связано с газогидратсодержащими структурами, такими как K-2, Маленький и Санкт-Петербург-2. При этом исследователями отмечается существенная роль бактериальной деятельности в минералообразовании [9; 13]. Этими обстоятельствами объясняется и наш интерес к изучению аутигенных конкреционных образований в поверхностных донных осадках озера Байкал.

Материалы и методы. Образцы аутигенных конкреций получены на трех станциях, расположенных в Южной котловине озера Байкал в результате исследований в 2017 и 2018 годах (рис. 1). Всего было отобрано шесть конкреций различной морфологии.

Станция 17Б-50 расположена вблизи газовых сипов, которые сопровождают проявление газовых гидратов Голоустное. Отбор керна произведен бентосной трубкой с глубины 500 м. Конкреции размером до 5 мм имеют форму отдельных зерен и сростков и расположены в 36 см от поверхности при общей длине керна 59 см. Отложения, из которых они выделены, представлены светло-серыми однородными пластичными глинами. На них с несогласием залегают серые алевропелиты мощностью около 25 см, с жидким бурым наилком на поверхности.

Станция 18Б-1 расположена в пределах гидратсодержащей структуры Р-2 («Песчанка»). Отбор керна произведен 3-метровой гравитационной

трубой с глубины 820 м. Общая длина поднятого керна составила 2,9 м. Отложения имеют преимущественно алевропелитовый состав. Цвет серый, до темно-серого. Распределение окраски пятнистое. Практически по всему разрезу встречаются включения гидротроилита в разной степени концентрации. Участки осадка, обогащенные гидротроилитом, имеют цвет от темно-серого до черного. Аутигенные конкреции отобраны из четырех интервалов от 43 до 84 см (18Б-1ТБ-1), 145 см (18Б-1ТБ-2), 200 см (18Б-1ТБ-3), 210 см (18Б-1ТБ-4). В первом интервале они представлены в виде мелких (до 1 мм) включений, в то время, как в двух следующих случаях могут достигать 2–3 см и имеют форму двух типов: пластинчатую и веретенообразную. В последнем интервале конкреции имеют вид сростков неправильной формы, до 5 мм.

Станция 18Б-54 расположена в пределах гидратсодержащей структуры «Кедровая». Отбор донного грунта произведен с помощью ковша

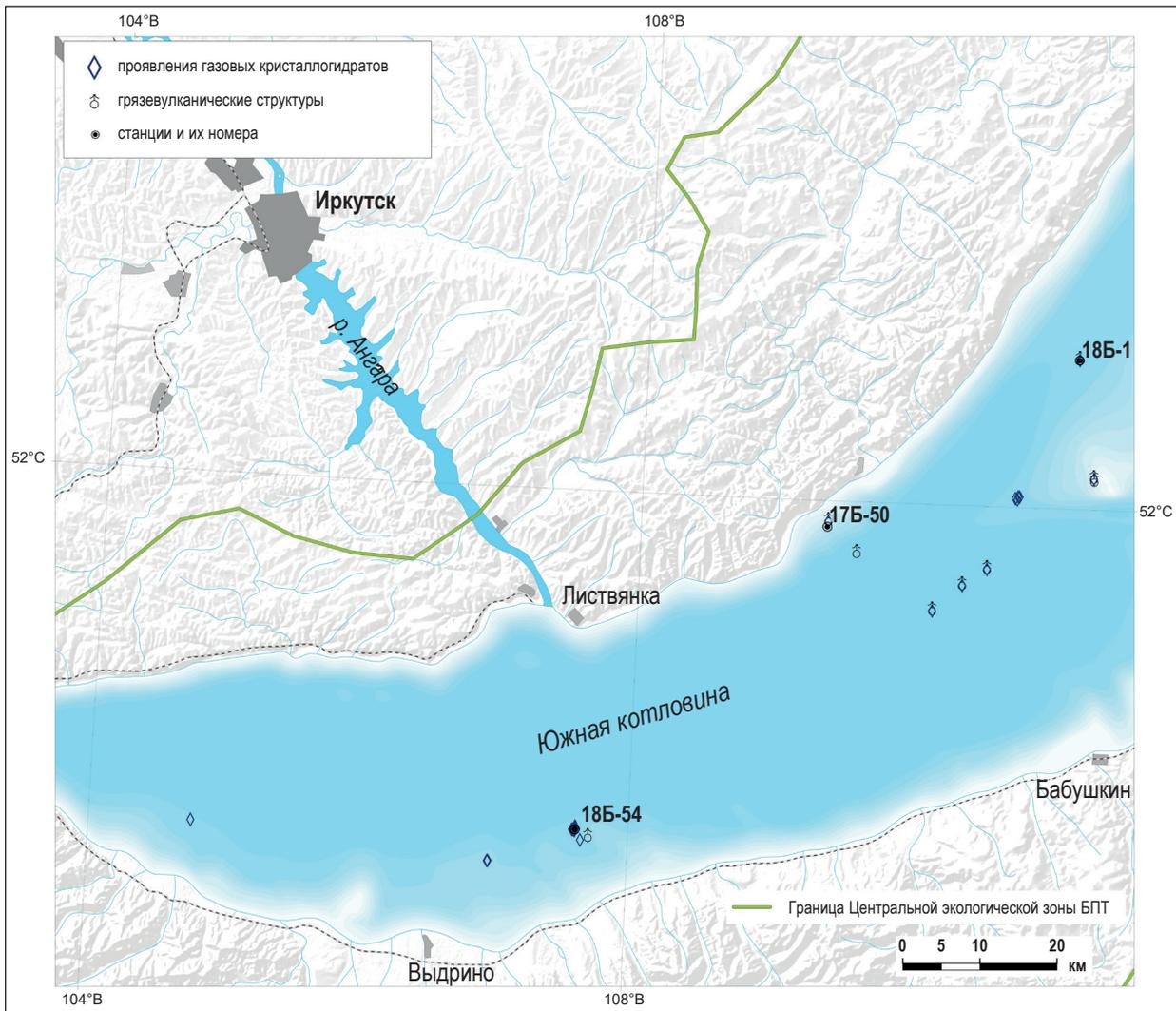


Рис. 1. Схема станций отбора конкреций

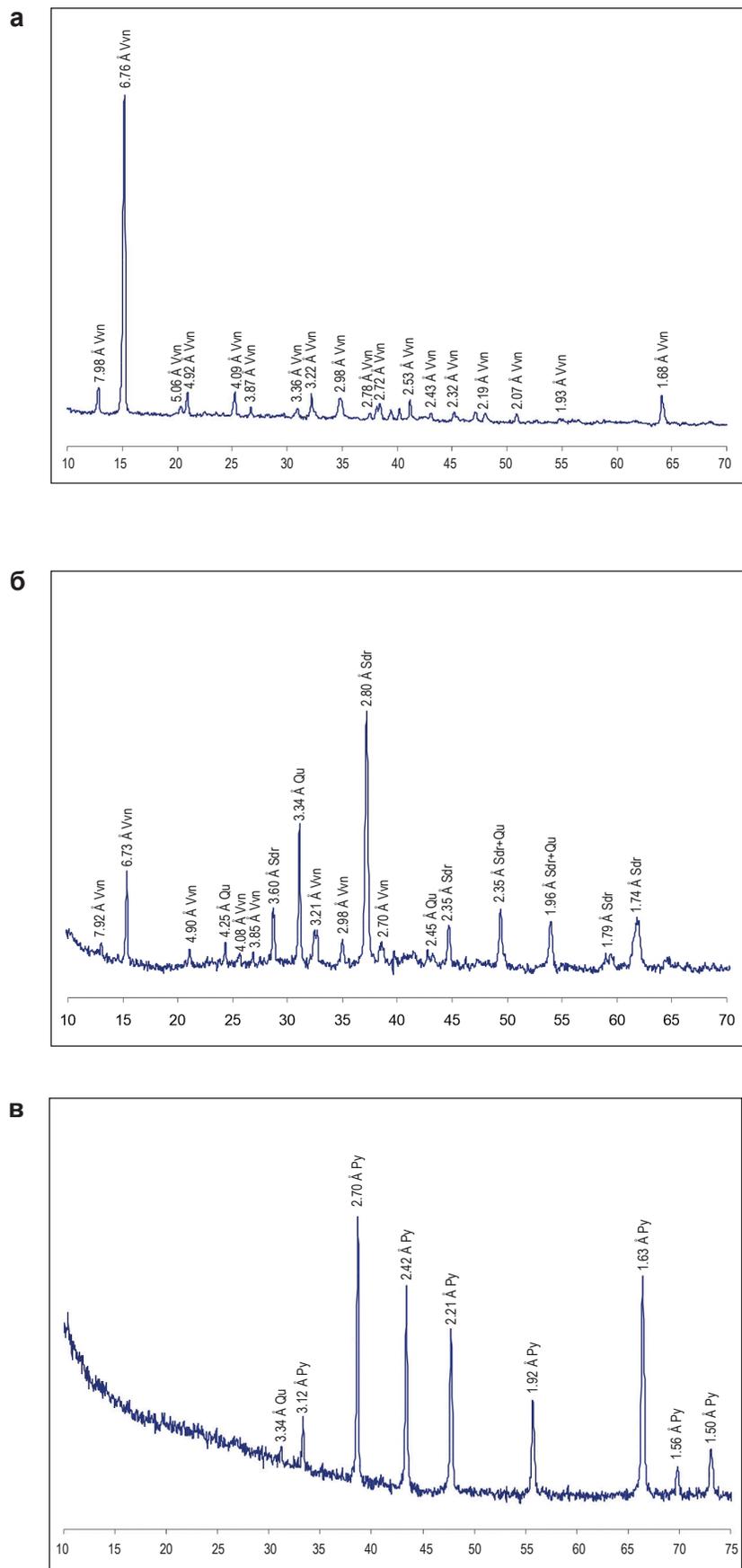


Рис. 2. Диффрактограммы образцов:
 а – 18Б-1ТБ2; б – 18Б-54; в – 17Б-50ТБ
 Условные обозначения: Qu – кварц, Sdr – сидерит, Vvn – вивианит

бокскорера и 3-метровой гравитационной трубы с глубины 600 м. В ковше осадок представлен серым текучепластичным газонасыщенным алевропелитом с высоким содержанием песчаного материала и включениями гидротроилита. Конкреции размером около $1 \times 0,3 \times 0,3$ см расположены в нижней части разреза, вскрытого ковшем (13 см). В трубе грунт представлен серым алевропелитом с включениями гидротроилита. Грунт характеризуется обилием мелких разрывов, что связано с его высокой газонасыщенностью. В интервале 100–110 см и на забое, при общей длине поднятого керна 175 см, осадок содержит газовый гидрат зернистой и массивной текстуры. Конкреции размером до 8 мм отобраны из интервала 120–140 см.

Для определения минерального состава конкреций применялся метод рентгенофазового анализа, который был выполнен в лаборатории минералогических методов анализа (ЛММА) ФГБУ «ВСЕГЕИ». Материал исходных проб готовился в виде дезориентированных порошковых препаратов на стеклянной подложке. Съемка производилась на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-6», оснащенный рентгеновской трубкой с кобальтовым анодом с длиной волны $\lambda \approx 1,78892 \text{ \AA}$ при напряжении $U = 35 \text{ kV}$ и силе тока $I = 25 \text{ mA}$. Обработка дифрактограмм производилась при помощи программного пакета PDWin-4 и международной картотеки JCPDS.

Для локального химического анализа применялись методы электронной микроскопии и микрозондовый анализ. Для этого изготавливались препараты проб на проводящем скотче, с последующим напылением углеродом.

Анализ производился на электронном микроскопе VEGA-3 производства фирмы «Tescan» (Чехия), оснащенный современным ЭДС детектором Ultimmax 100 фирмы «Oxford instruments» (Великобритания), обладающим высоким разрешением (до 10 нм) и позволяющим с высокой

точностью определить химический состав минералов в заданных участках минеральных зерен и их сростков.

Результаты. Рентгенофазовый анализ, который выполнялся с целью установления вещественного состава конкреций показал, что они являются преимущественно мономинеральными.

Основная масса образцов с номерами 18Б-1ТБ-2, 18Б-1ТБ-3, 18Б-1ТБ-4, 18Б-54, 18Б-54ТБ представлена вивианитом – $(\text{Fe}^{2+})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. В качестве примера может быть приведена наиболее типичная дифрактограмма образца 18Б-1ТБ-2 (рис. 2, а). В то же время, на дифрактограмме образца, отобранного из ковша на ст. 18Б-54, фиксируются пики, указывающие на присутствие в пробе сидерита и кварца (рис. 2, б).

Конкреции, выделенные из глин на станции под номером 17Б-50, представлены пиритом (рис. 2, в).

Более разнообразная информация по минеральному составу конкреций была получена в результате электронно-микроскопического и микрозондового анализов.

Конкреция (образец 17Б-50ТБ) представляет собой сростание неправильной формы многочисленных разноразмерных (до 150 мкм) сферических образований пирита (рис. 3, а, б). В свою очередь, отдельные крупные сферы (рис. 3, б), являются конгломератом более мелких объектов – сростков кристаллов октаэдрической формы, что отражается в рельефе в виде бугров и «почек» разной высоты (рис. 3, б, в).

Микрозондовый анализ показал, что как сферические образования, так и отдельные кристаллы по химическому составу соответствуют стехиометрической формуле пирита (рис. 3; табл. 1, метки 1, 3, 5). В составе вмещающей породы основным компонентом, по-видимому, являются глинистые минералы группы иллита (рис. 3; табл. 1, метки 3, 5).

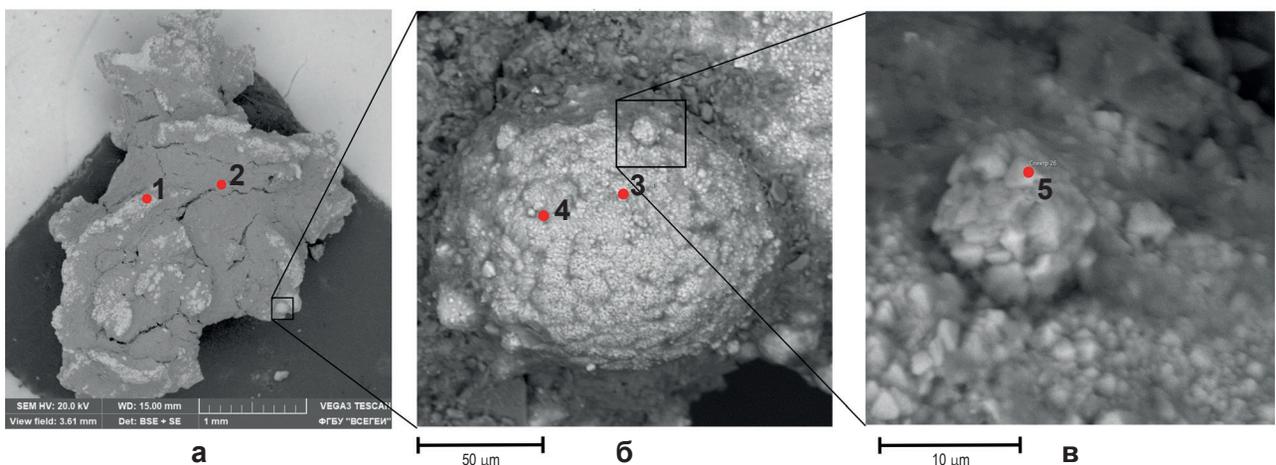


Рис. 3. Морфологические особенности конкреции и результаты микрозондового анализа образца 17Б-50ТБ

а – общий вид; б – отдельное крупное сферическое образование – увеличение в 1250 раз; в – «почка» на поверхности сферы – увеличение в 7170 раз (цифрами указаны метки определения химического состава, табл. 1)

Химический состав конкреции по данным микрозондового анализа, образец 17Б-50ТБ

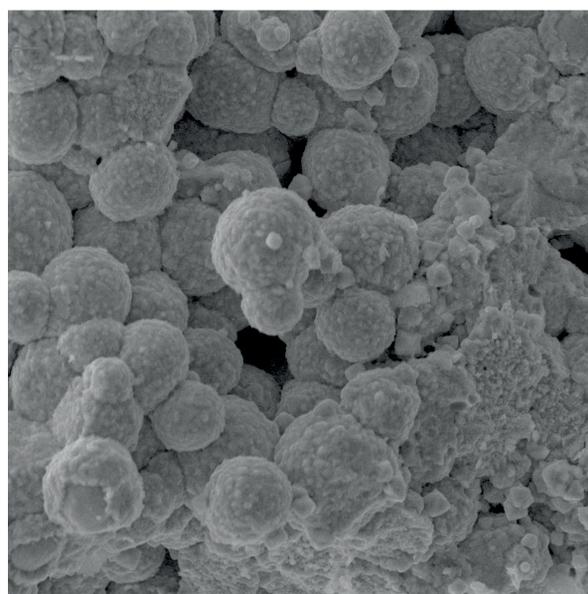
Метка	Атомные%											
	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe
1							67,2					32,8
2	65,09	0,28	0,83	4,73	19,54		4,36	1	0,31	0,19		3,68
3							65,24					34,76
4	64,41		0,55	3,74	27,3			0,7	0,19			3,1
5							67,35					32,65

Изучение поперечного скола образца показало, что конкреция представляет собой полифрамбонидный агрегат пирита (рис. 4,а). Размер отдельных сферических фрамбонидов составляет от 10 до 25 мкм. В местах их слияния наблюдается деформация правильной сферической формы. Сами фрамбониды образованы плотно упакованными, в разной степени упорядоченными скоплениями микрокристаллов пирита, размер которых не превышает 1 мкм (рис. 4,б).

Наиболее интересные данные были получены в результате электронно-микроскопических исследований конкреций со станции 18Б-1ТБ, которые проводились с целью получения более точной характеристики их химического и минералогического состава. Если анализ образцов конкреций под номерами 18Б-1ТБ-3 и 18Б-1ТБ-4 подтвердил их вивианитовый состав и только в отдельных точках были определены минералы группы гидрослюд и кварц, то для образца 18Б-1ТБ-2 были получены

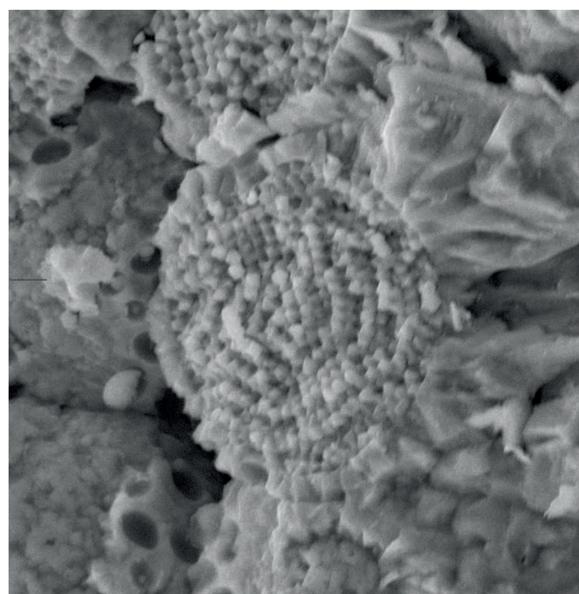
иные результаты. Как уже было отмечено выше, конкреции, встреченные в гравитационной трубе на глубине 145 см, по данным рентгенофазового анализа, имеют вивианитовый состав и представлены двумя морфологическими формами: пластинчатой и веретенообразной (рис. 5).

Анализ конкреции уплощенной пластинчатой формы показал, что ее поверхностный слой состоит из таблитчатых кристаллов вивианита (рис. 6,в) размером до 0,5 мкм, имеющих в поперечном сечении форму неправильного ромба (рис. 6,б). На кристаллах отчетливо видны мелкие трещины и сколы по спаянности (рис. 6,в). Промежуточное пространство между зернами заполнено однородной массой серого цвета. Микрозондовый анализ кристаллов подтвердил (рис. 6; табл. 2, метка 1), что их химический состав наиболее близок к вивианиту. Серая масса (рис. 6; табл. 2, метка 2), которая, видимо, является вмещающим конкрецию осадком, представляет собой тонко-



20 μm

а



10 μm

б

Рис. 4. Строение сферических образований из образца 17Б-50ТБ

а – увеличение в 1870 раз; б – увеличение в 5070 раз

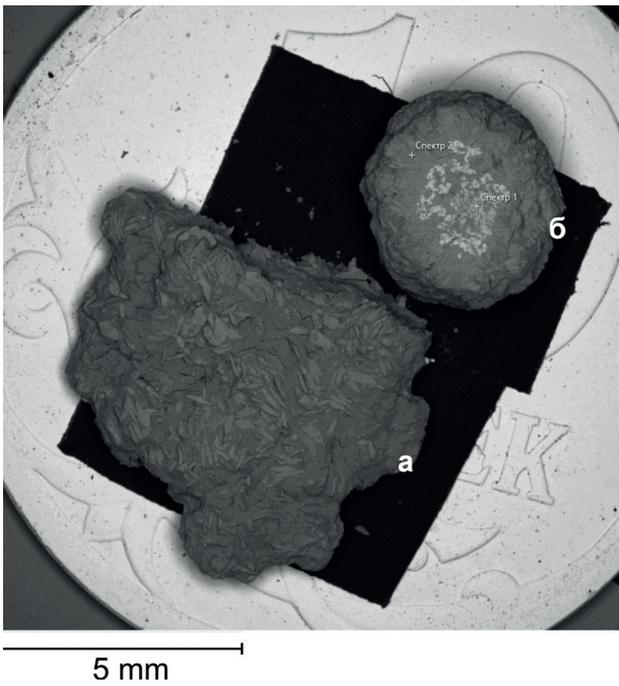


Рис. 5. Морфология конкреций образца 18Б-1ТБ-2
а – плоская; б – веретенообразная (поперечное сечение)

дисперсные образования глинистых минералов группы иллита.

Существенно иную картину мы наблюдаем при анализе поперечного сечения конкреции веретенообразной формы. Если при рассмотрении его в мелком масштабе в краевой части определяется вивианит (рис. 7,а; табл. 3, метка 2), в катионной части которого, возможно, происходит частичное замещение железа другими катионами, то в центральной микрзондовом анализе показывает наличие гидратированного фосфата железа (рис. 7,а; табл. 3, метка 1). Сложного по химическому составу минерала, наиболее близкого к диадохиту – $(\text{Fe}^{3+})_2(\text{PO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, являющемуся продуктом бактериального окисления дисульфида железа и фосфатов, на что указывает наличие в спектре как фосфора, так и серы (рис. 7; табл. 3, метка 1). На детальном участке из центральной части образца хорошо видны кристаллы вивианита таблитчатой формы (рис. 7,б; табл. 3, метка 5), которые образуют радиально лучистые агрегаты. Кроме того, в образце присутствуют хлопьевидные образования белесого цвета. Полученный в результате анализа химический состав этих образований позволяет предполагать, что это могут быть гидратированные

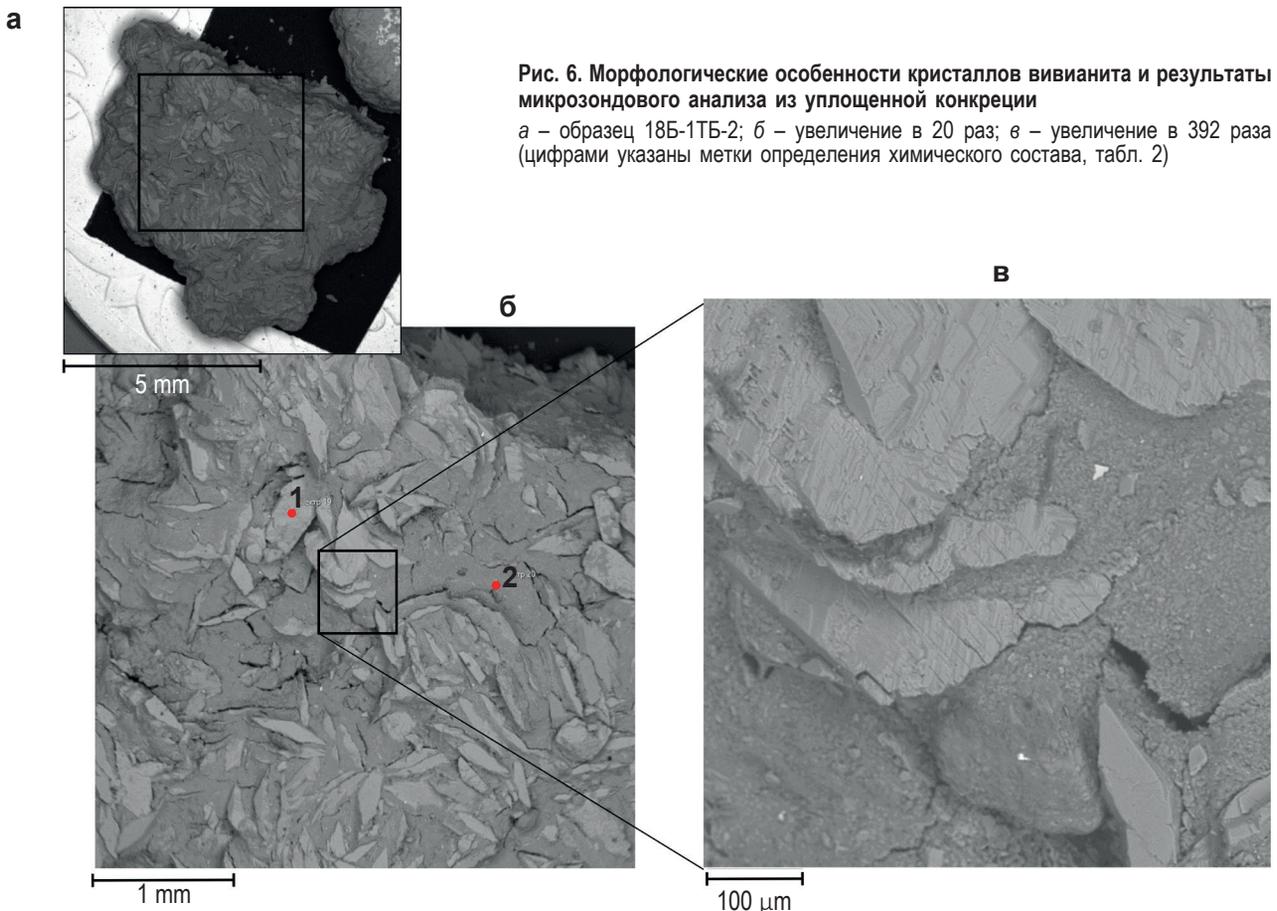


Рис. 6. Морфологические особенности кристаллов вивианита и результаты микрзондового анализа из уплощенной конкреции
а – образец 18Б-1ТБ-2; б – увеличение в 20 раз; в – увеличение в 392 раза (цифрами указаны метки определения химического состава, табл. 2)

Таблица 2

Химический состав уплотненной конкреции образца 18Б-1ТБ-2 по данным микрозондового анализа

Атомные%												
Метка	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Всего
1	61,63		0,37	0,71	0,99	9,9	0,07	0,11		3,51	22,71	100
2	60,44	1,04	1,6	9,01	20,76	0,12	2,48	0,46	0,3	0,07	3,71	100

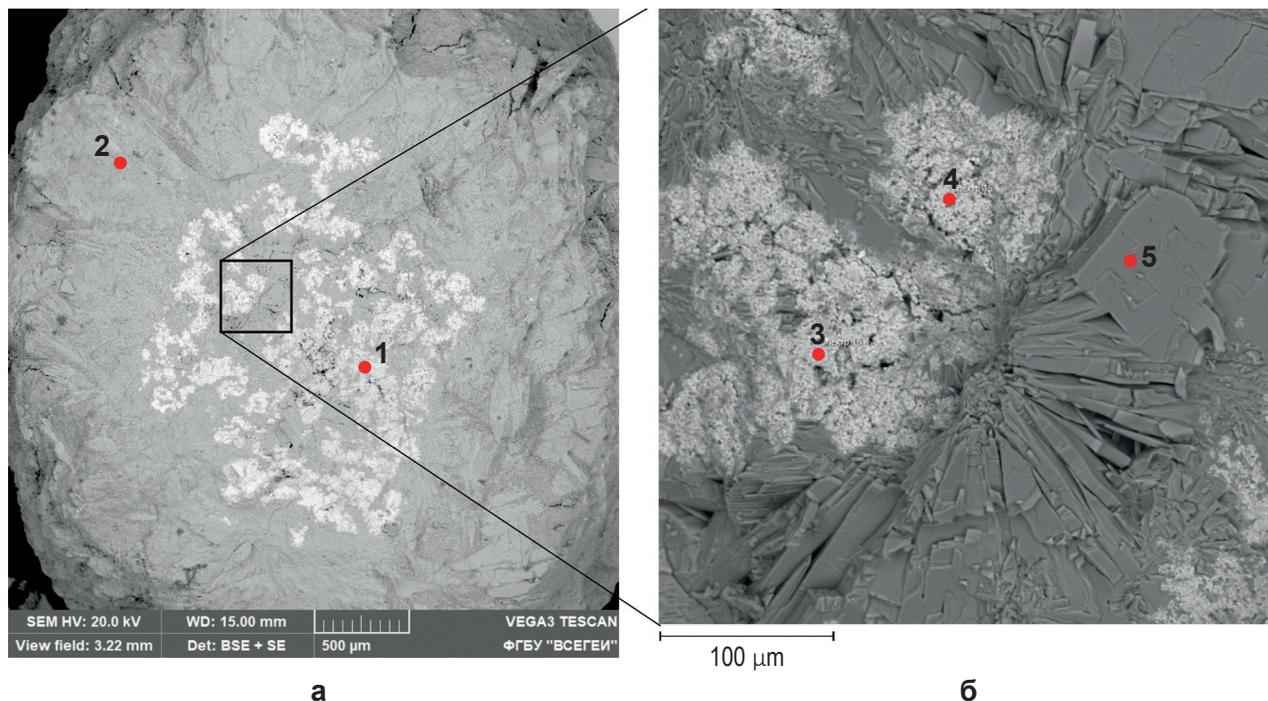


Рис. 7. Морфологические особенности и результаты микрозондового анализа минеральных образований из веретенообразной конкреции

а – образец 18Б-1ТБ-2; б – увеличение в 580 раз (цифрами указаны метки определения химического состава, табл. 3)

Таблица 3

Химический состав веретенообразной конкреции образца 18Б-1ТБ-2 по данным микрозондового анализа

Атомные %													
Метка	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Всего
1	64,06			0,35		5,38	11,24				1,01	17,96	100
2	70,83	0,91	0,85	3,45	5,93	6,72		0,42	0,21	0,1	1,26	9,32	100
3	67,1			0,15			17,06				0,06	15,62	100
4	65,31			0,24			15,25					19,21	100
5	66,34					12,25			0,08		3,81	17,52	100

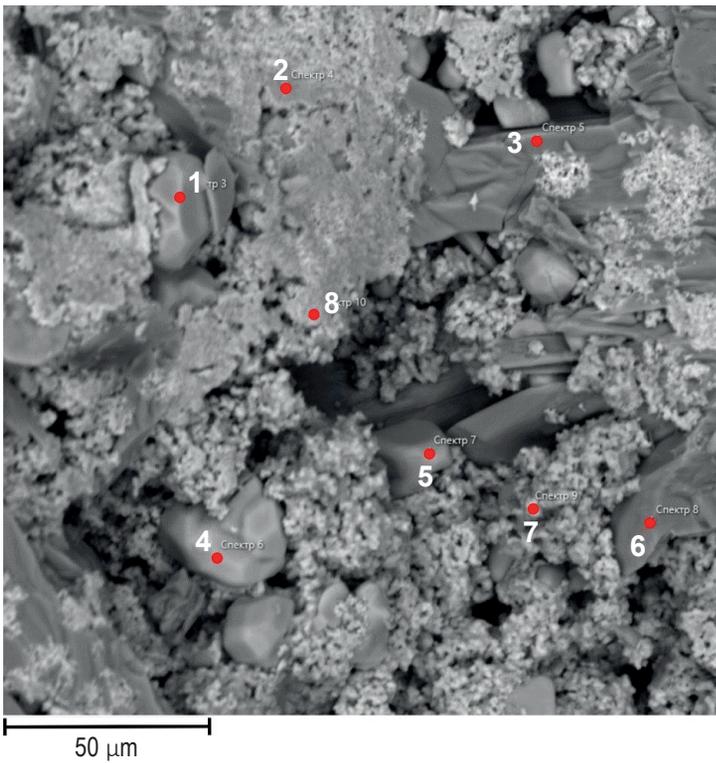


Рис. 8. Морфологические особенности и результаты микрозондового анализа минеральных образований из веретенообразной конкреции образца 18Б-1ТБ-2, увеличение в 1120 раз (цифрами указаны метки определения химического состава, табл. 4)

сульфаты железа (рис. 7,б; табл. 3, метки 3, 4). Наиболее близки по составу микасаит – $(Fe^{3+}, Al^{3+})_2(SO_4)_3$ и его гидратированная форма кокимбит $(Fe^{3+})_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$.

При значительном увеличении (в 1120 раз), помимо вивианита и сульфатов железа (рис. 8), уже идентифицированных на ранее изученных фрагментах конкреции, отмечаются изометрические, округлые, без резких ребер минеральные зерна светло-серого цвета. На данном фрагменте размер этих зерен колеблется от 10 до 15 мкм. Для трех из них (рис. 8; табл. 4, метки 1, 4, 5) выполнен микрозондовый анализ, который показал, что данные минеральные зерна представляют собой элементную серу.

Еще одной особенностью изученного образца оказалось присутствие в краевой части центрального ядра сферического образования диаметром около 30 мкм (рис. 9,б), инкрустированное мине-

ральными зернами. Они имеют форму октаэдра с несколько размытыми округлыми очертаниями и размер около 2 мкм. Результаты микрозондового анализа показали, что эти зерна являются микрокристаллами пирита (рис. 9; табл. 5, метка 1). Вероятно, данное сферическое образование является поперечным сечением фрамбоида, сформировавшегося в результате фоссилизации клетки сульфатредуцирующей бактерии.

Обсуждение результатов. В результате проведенных исследований в поверхностных осадках вблизи границы смены окислительных и восстановительных сред в конкрециях была обнаружена элементная сера. Наиболее вероятным механизмом появления серы в аутигенных конкрециях является её генерация в результате внутриклеточного окисления сероводорода до элементарной серы бесцветными серными бактериями. Такими

Таблица 4

Химический состав веретенообразной конкреции образца 18Б-1ТБ-2 по данным микрозондового анализа

Атомные %														
Метка	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Tl	Всего
1							96,36				0,27	3,37		100
2	65,97			0,35	0,25	0,39	6,96				0,15	25,94		100
3	75,96					9,2	0,95		0,04		1,3	12,55		100
4							98,61					1,39		100
5	9,9			0,21			86,65					2,21	1,02	100
6	58,09					11,93	1,33		0,07		3,03	25,55		100
7	64,98					0,31	11,29				0,07	23,35		100
8	51,33			0,39	0,19	0,37	12,05				0,07	35,6		100

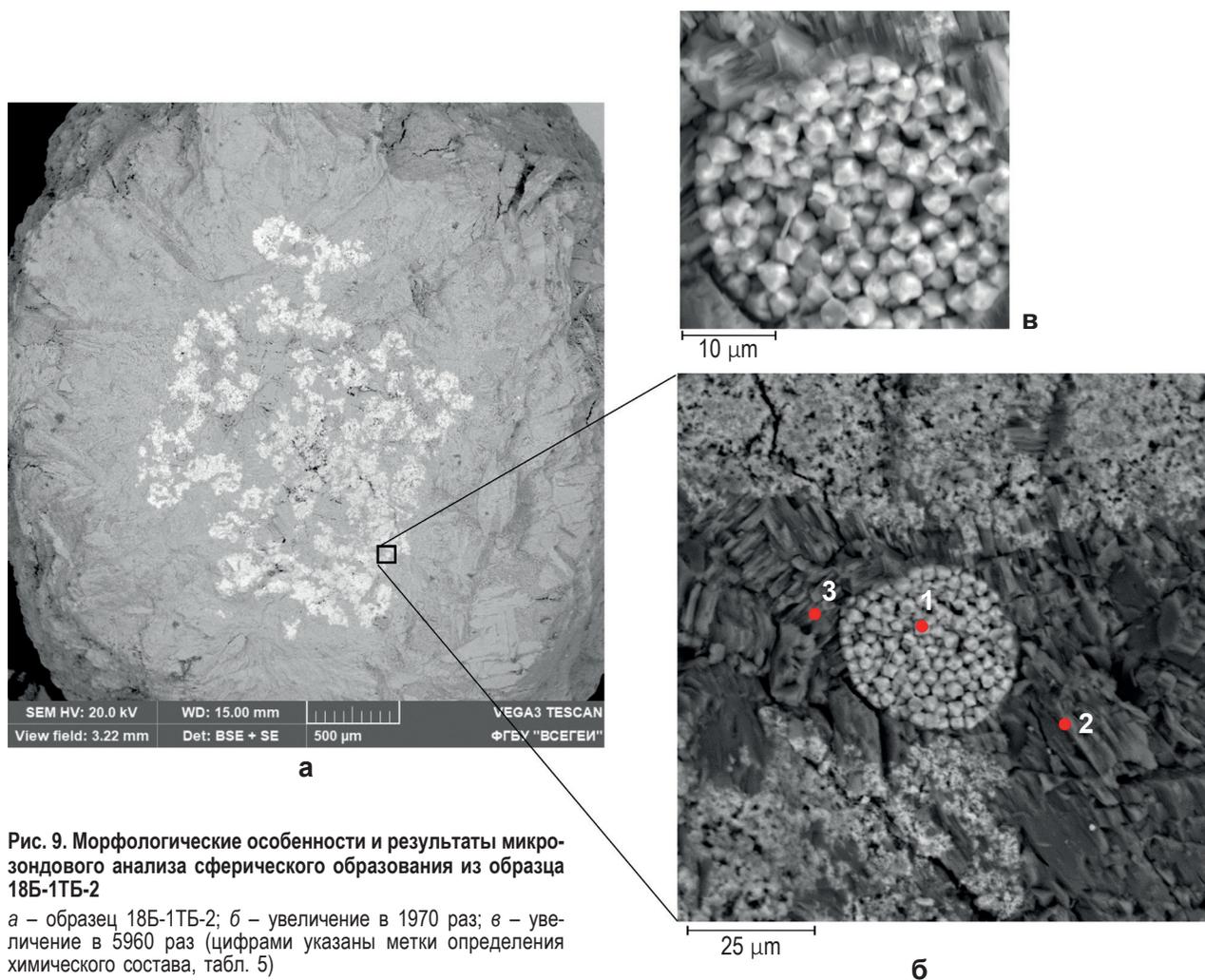


Рис. 9. Морфологические особенности и результаты микрозондового анализа сферического образования из образца 18Б-1ТБ-2

а – образец 18Б-1ТБ-2; б – увеличение в 1970 раз; в – увеличение в 5960 раз (цифрами указаны метки определения химического состава, табл. 5)

бактериями могут быть пресноводные многоклеточные (ниточные) бактерии, относящиеся к родам *Beggiatoa* и *Thioploca*. Они способны к внутриклеточному накоплению серы в своей периплазме [4; 8; 10]. Образование внутриклеточных серных включений было открыто С. Н. Виноградским в 1887 г. Сера образуется в результате окисления сероводорода кислородом по следующей схеме: $2H_2S + O_2 = 2H_2O + S_2$. Конечным продуктом бактериального окисления соединений серы являются сульфаты: $S_2 + 3O_2 + 2H_2O = 2H_2SO_4$. Однако исследования показывают, что некоторые члены семейства *Beggiatoaceae* не обнаружива-

ют способности к окислению серы [7]. Это дает основания предполагать возможность нахождения элементной серы в минерализованных (минерально-замещенных) клетках бактерий. Кроме того, следует отметить еще один немаловажный факт, а именно накопление в клетке бактерии полифосфатов, что, на наш взгляд, объясняет совместное нахождение серы и вивианита в изученных конкрециях.

Как известно, представители семейства *Beggiatoaceae* обитают в местах выхода гидротермальных вод, бактериальных матах, активных илах на границе аэробных и анаэробных сред

Таблица 5

Химический состав веретенообразной конкреции образца 18Б-1ТБ-2 по данным микрозондового анализа

Метка	Атомные %									
	O	Mg	Al	Si	P	S	K	Mn	Fe	Всего
1						51,9		0,27	47,82	100
2	43,22	1,87	4,46	5,9	9,32	4,0	0,37	2,69	28,18	100
3	38,72				14,9	0,38		6,87	39,94	100

и могут встречаться на глубинах до 3000 м. Многими отмечается их существенная роль в циклах миграции углерода, серы, азота и фосфора. Установлены симбиозы серных бактерий с трубчатými червями. В результате исследований, проводимых на озере Байкал специалистами ЛИН СО РАН, представители этого семейства неоднократно фиксировались в различных частях озера [3; 18; 19], что подтверждает высказанную нами точку зрения о возможном участии бактерий данного семейства в образовании серы. Приуроченность ареалов распространения серных бактерий к придонным выходам углеводородов (проявлениям газовых гидратов, метановым сипам, выходам нефти) и появление здесь элементной серы может быть объяснена тем, что активность всех микробиологических процессов резко возрастает в этих районах. В результате ряда биохимических преобразований (микробного метаноокисления и активизации сульфатредуцирующих бактерий) появляются восстановленные соединения серы, которые и служат питательной средой для развития серных бактерий.

Заключение. Элементарная сера в конкреционных образованиях на озере Байкал обнаружена впервые. Её накопление в конкрециях может являться следствием неполного биогенного окисления сероводорода кислородом. Сера откладывается в виде гранул в протоплазме клеток серных бактерий, которые участвуют в этих процессах. Роль в них объектов миграции углеводородов или генетическая связь серы с ними в настоящее время недостаточно ясна, так как элементарная сера в конкрециях обнаружена на озере Байкал только в единственной гидратсодержащей структуре Р-2 («Песчанка»).

В результате проведения электронно-микроскопических исследований конкреций в них обнаружены фромбоидальные выделения пирита. Причем не только в собственно пиритовых конкрециях, но и в конкрециях вивианитового состава. Фромбоидальный пирит в осадках озера Байкал, по-видимому, имеет бактериальную природу, на что указывают фрагменты оболочки клеток, которые наблюдаются на поверхности сферических выделений пирита. Биологическое происхождение подобных структур подтверждено и лабораторными исследованиями, так как при температурах ниже 25 °С фромбоиды пирита в ходе проведения эксперимента не образовывались [2].

Характер внутренней структуры фромбоидов указывает на сравнительную молодость и раннюю стадию процессов диагенеза донных осадков, вмещающих конкреции.

Полученные данные подтверждают предположение о том, что некоторые виды сульфатредуцирующих бактерий могут проявлять азотолерантные свойства и обитать в условиях наличия кислорода. Это позволяет одновременно сосуществовать в поверхностных донных осадках озера Байкал серным и сульфатредуцирующим бактериям и формировать совместные микроколонии

вблизи выходов углеводородов на дне, которые сопровождаются подтоком сероводорода, а также в связи с гидротермальными проявлениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов Н. И., Мащук И. М. Акулова В. В. Плейстоценовые отложения оз. Байкал: вещественный состав и стратиграфическая корреляция // Стратиграфия, геологическая корреляция. – 2015. – Т. 23, № 1. – С. 100–120.
2. Астафьев М. М., Розанов А. Ю., Хувер Р. Фрамбоиды: их структура и происхождение // Палеонтологический журнал. – 2005. – № 5. – С. 1–7.
3. Бесцветные серные бактерии рода *Thioploca* из различных районов озера Байкал / Т. И. Земская, С. М. Черницына, Н. М. Дульцева, В. Н. Сергеева, Т. В. Погодаева, Б. Б. Намсараев // Микробиология. – 2009. – Т. 78, № 1. – С. 134–143.
4. Вольф И. В., Ткаченко Н. И. Химия и микробиология природных и сточных вод: учебное пособие / ред. М. Ф. Максимова. – Изд-во ЛГУ, 1973. – 238 с.
5. Голдырев Г. С. Диагенетические структуры, текстуры и аутигенные минералы донных отложений Байкала // Донные отложения Байкала. – М.: Наука, 1970. – С. 116–121.
6. Гранина Л. З., Мац В. Д., Федорин М. А. Железомарганцевые образования в регионе озера Байкал // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 6. – С. 835–848.
7. Гуреева М. В., Грабович М. Ю. Экология микроорганизмов: учебное пособие. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2021. – 105 с.
8. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.
9. Злобина О. Н., Москвин В. И., Хлыстов О. М. Аутигенное минералообразование в современных осадках оз. Байкал // Литология, петрография, минералогия, геохимия. – 2011. – № 4 (48). – С. 48–56.
10. Золотова Е. Ф., Асс Г. Ю. Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода. – М.: Стройиздат, 1975. – 176 с.
11. Источники сноса и состав донных осадков Южной котловины оз. Байкал (предварительные результаты) / Е. Г. Вологина, С. С. Воробьева, И. А. Калашникова, Т. С. Филева // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2009. – Т. 2, № 2. – С. 53–64.
12. Методы определения минерального состава донных осадков оз. Байкал и расчета их термодинамических параметров как критерия палеоклиматических изменений / А. В. Ощепкова, В. А. Бычинский, К. В. Чудненко, С. А. Сасим // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2019. – Т. 28. – С. 76–88.
13. Механизм формирования аутигенного родохрита в приповерхностных осадках газогидратоносной структуры Санкт-Петербург-2 в центральной котловине озера Байкал [Электронный ресурс] / А. А. Крылов, О. М. Хлыстов, А. Хачикубо, Х. Минами, Т. В. Погодаева, Т. И. Земская, М. Г. Кржижановская, Л. Э. Музафарова, Р. Ж. Атанязов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2017. – Т. 12, № 1. – URL: https://doi.org/10.17353/2070-5379/8_2017 (дата обращения: 12.05.2023).
14. Особенности осадконакопления в озере Байкал в голоцене / Е. Г. Вологина, М. Штурм, С. С. Воробьева, Л. З. Гранина, С. Ю. Тошаков // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44, № 5. – С. 407–421.
15. Реконструкция условий позднплейстоцен-голоценового осадконакопления в озере Байкал (на примере изучения колонки осадков, отобранной на подводной возвышенности в северном Байкале) / Е. Г. Вологина, М. Штурм, С. С. Воробьева, Н. Н. Ухова // Развитие жизни

в процессе абиотических изменений на Земле. – 2014. – № 3. – С. 331–335.

16. Формирование аутигенных карбонатов в грязевых вулканах озера Байкал / А. А. Крылов, О. М. Хлыстов, Т. И. Земская, Х. Минами, А. Хачикубо, Х. Шоджи, М. Кида, Т. П. Погодаева, Л. Наудтс, Д. Поорт // Геохимия. – 2008. – № 10. – С. 1051–1062.

17. Химический состав осадков глубоководных байкальских скважин как основа реконструкции изменений климата и окружающей среды / М. И. Кузьмин, В. А. Бычинский, Е. В. Кербер, А. В. Ощепкова, А. В. Орегляд, Е. В. Иванов // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 1. – С. 3–22.

18. Экофизиологические особенности матообразующих бактерий Thioploca в донных осадках бухты Фролиха, Северный Байкал / Т. И. Земская, Б. Б. Намсараева, Н. М. Дульцева, Т. А. Ханаева, Л. П. Голобокова, Г. А. Дубинина, Л. Е. Дулов, Э. Вада // Микробиология. – 2001. – Т. 70. – С. 191–397.

19. Экспедиция на НИС «Г. Ю. Верещагин» с 22 июня по 01 июля 2021 года [Электронный ресурс] // ЛИИ СО РАН. – URL: <http://lin.irk.ru/expedition/1145-ekspeditsiya-na-nis-g-yu-vereshchagin-s-22-iyunya-po-01-iyulya-2021-goda> (дата обращения: 12.05.2023).

20. Authigenic rhodochrosite from a gas hydrate-bearing structure in Lake Baikal [Electronic resource] / A. A. Krylov, A. Hachikubo, H. Minami, T. V. Pogodaeva, T. I. Zemskaya, M. G. Krzhizhanovskaya, J. Poort, O. M. Khlystov // International Journal of Earth Sciences. – 2018. – Vol. 107. – Pp. 2011–2022. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1584-z> (12.05.2023).

21. New insights into the formation and burial of Fe/Mn accumulations in Lake Baikal sediments / L. M. Och, B. Müller, A. Voegelin, A. Ulrich, J. Göttlicher, R. Steiniger, S. Mangold, E. G. Vologina, M. Sturm // Chemical Geology. – 2012. – Pp. 244–259.

REFERENCES

1. Akulov N. I., Mashchuk I. M. Akulova V. V. Pleystotsenovyе otlozheniya oz. Baykal: veshchestvennyy sostav i stratigraficheskaya korrelyatsiya. *Stratigrafiya, geologicheskaya korrelyatsiya*, 2015, vol. 23, no. 1, pp. 100–120.

2. Astaf'ev M. M., Rozanov A. Yu., Khuver R. Framboidy: ikh struktura i proiskhozhdenie. *Paleontologicheskii zhurnal*, 2005, no. 5, pp. 1–7.

3. Zemskaya T. I., Chernitsyna S. M., Dul'tseva N. M. et al. Bestsvetnye sernye bakterii roda Thioploca iz razlichnykh rayonov озера Байкал. *Mikrobiologiya*, 2009, vol. 78, no. 1, pp. 134–143.

4. Vol'f I. V., Tkachenko N. I. Khimiya i mikrobiologiya prirodnykh i stochnykh vod: uchebnoe posobie. Ed.: M. F. Maksimov. Izdatel'stvo Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta, 1973, 238 p.

5. Goldyrev G. S. Diageneticheskie struktury, tekstury i autigennye mineraly donnykh otlozheniy Baykala. *Donnye otlozheniya Baykala*. Moscow, Nauka, 1970, pp. 116–121.

6. Granina L. Z., Mats V. D., Fedorin M. A. Zhelezomargantsevye obrazovaniya v regione озера Байкал. *Geology and geophysics*, 2010, vol. 51, no. 6, pp. 835–848.

7. Gureeva M. V., Grabovich M. Yu. Ekologiya mikroorganizmov: uchebnoe posobie. Voronezh, Izdatel'skiy dom Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, 2021, 105 p.

8. Zhuk N. P. Kurs teorii korrozii i zashchity metallov. Moscow, Metallurgiya, 1976, 472 p.

9. Zlobina O. N., Moskvin V. I., Khlystov O. M. Autigennoe mineraloobrazovanie v sovremennykh osadkakh озера Байкал. *Litologiya, petrografiya, mineralogiya, geokhimiya*, 2011, no. 4 (48), pp. 48–56.

10. Zolotova E. F., Ass G. Yu. Ochistka vody ot zheleza, margantsa, ftora i serovodoroda. Moscow, Stroyizdat, 1975, 176 p.

11. Vologina E. G., Vorob'eva S. S., Kalashnikova I. A. et al. Istochniki snosa i sostav donnykh osadkov Yuzhnoy kotloviny озера Байкал (predvaritel'nye rezul'taty). *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»*, 2009, vol. 2, no. 2, pp. 53–64.

12. Oshchepkova A. V., Bychinskiy V. A., Chudnenko K. V. et al. Metody opredeleniya mineral'nogo sostava donnykh osadkov озера Байкал i rascheta ikh termodinamicheskikh parametrov kak kriteriya paleoklimaticheskikh izmeneniy. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»*, 2019, vol. 28, pp. 76–88.

13. Krylov A. A., Khlystov O. M., Khachikubo A. et al. Mekhanizm formirovaniya autigenного rodokhrozita v pri-poverkhnostnykh osadkakh gazogidratonosnoy struktury Sankt-Peterburg-2 v tsentral'noy kotlovine озера Байкал [Elektronnyy resurs]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2017, vol. 12, no. 1, URL: https://doi.org/10.17353/2070-5379/8_2017 (12.05.2023).

14. Vologina E. G., Shturm M., Vorob'eva S. S. et al. Osobennosti osadkonakopleniya v озере Байкал v golotsene. *Geology and geophysics*, 2003, vol. 44, no. 5, pp. 407–421.

15. Vologina E. G., Shturm M., Vorob'eva S. S. et al. Rekonstruktsiya usloviy pozdnepleystotsen-golotsenovogo osadkonakopleniya v озере Байкал (na primere izucheniya kolonki osadkov, otobrannoy na podvodnoy vozvyshenosti v severnom Baykale). *Razvitie zhizni v protsesse abioticheskikh izmeneniy na Zemle*, 2014, no. 3, pp. 331–335.

16. Krylov A. A., Khlystov O. M., Zemskaya T. I. et al. Formirovanie autigennykh karbonatov v gryazevykh vulkanakh озера Байкал. *Geochemistry*, 2008, no. 10, pp. 1051–1062.

17. Kuz'min M. I., Bychinskiy V. A., Kerber E. V. et al. Khimicheskii sostav osadkov glubokovodnykh baykal'skikh skvazhin kak osnova rekonstruktsii izmeneniy klimata i okruzhayushchey sredy. *Geology and geophysics*, 2014, vol. 55, no. 1, pp. 3–22.

18. Zemskaya T. I., Namsaraeva B. B., Dul'tseva N. M. et al. Ekofiziologicheskie osobennosti matoobrazuyushchikh bakteriy Thioploca v donnykh osadkakh bukhty Frolikha, Severnyy Байкал. *Mikrobiologiya*, 2001, vol. 70, pp. 191–397.

19. Ekspeditsiya na NIS «G. Yu. Vereshchagin» s 22 iyunya po 01 iyulya 2021 goda [Elektronnyy resurs]. LIN SO RAN, URL: <http://lin.irk.ru/expedition/1145-ekspeditsiya-na-nis-g-yu-vereshchagin-s-22-iyunya-po-01-iyulya-2021-goda> (20.05.2023).

20. Krylov A. A., Hachikubo A., Minami H. et al. Authigenic rhodochrosite from a gas hydrate-bearing structure in Lake Baikal. *International Journal of Earth Sciences*, 2018, vol. 107, pp. 2011–2022, URL: <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1584-z> (12.05.2023).

21. Och L. M., Müller B., Voegelin A. et al. New insights into the formation and burial of Fe/Mn accumulations in Lake Baikal sediments. *Chemical Geology*, 2012, pp. 244–259.

Шахвердов Вадим Азимович – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>

Сапега Владимир Федорович – канд. геол.-минерал. наук, зав. лабораторией, ВСЕГЕИ. <Vladimir_Sapega@vsegei.ru>

Shakhverdov Vadim Azimovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, VSEGEI.
<Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>

Sapega Vladimir Fedorovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Laboratory, VSEGEI.
<Vladimir_Sapega@vsegei.ru>

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74,
Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.

УДК: 004:528:504.4:553.98(282.256.341)
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_68-74

А. Г. Кичигин, Е. В. Кучменко (СО ФГБУ «Росгеолфонд», ООО «Байкальский центр»),
Н. М. Соловьев (СО ФГБУ «Росгеолфонд»)

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРНЕТ-КАРТОГРАФИИ ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ ПО ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ ИЗУЧЕНИЮ ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С МИГРАЦИЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЕ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

Приведены сведения о работах по каталогизации и картографированию опасностей на озере Байкал, связанных с процессами миграции углеводородов. Предложено решение проблемы доступа пользователей к результатам изучения и наблюдений путем создания на основе информационных технологий Интернет-картографии специального Геопортала, обеспечивающего оперативный доступ государственных органов власти, органов местного самоуправления, организаций и граждан к информации о существующих в настоящее время на Байкале опасностях, связанных с процессами миграции углеводородов. Приведены основные критерии выбора технических решений и основной функционал, необходимые при создании Геопортала.

Ключевые слова: Байкал, Байкальская природная территория, углеводороды, опасные геологические процессы, каталогизация, картографирование, информационные технологии, Интернет-картография, Геопортал.

A. G. Kichigin, E. V. Kuchmenko (SB FSBI «Rosgeolfond», Baikal Center LLC),
N. M. Solovjev (SB FSBI «Rosgeolfond»)

USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR INTERNET MAPPING FOR THE ANALYSIS AND PRESENTATION OF RESULTS OF GEOLOGICAL STUDYING HAZARDOUS PROCESSES RELATED TO THE HYDROCARBON MIGRATION IN THE CENTRAL ENVIRONMENTAL ZONE OF THE BAIKAL NATURAL AREA

Information about the cataloging and mapping of hazards on Lake Baikal associated with hydrocarbon migration processes is given. A solution to the problem of user access to results of studies and observations is proposed by developing a special geoportal based on Internet mapping information technologies that provides operational access for state authorities, local governments, organizations and citizens to information on hazards currently existing on Lake Baikal due to hydrocarbon migration processes. Main criteria for choosing technical solutions and the main functionality required for developing the geoportal are given.

Keywords: Baikal, Baikal Natural Area, hydrocarbon, hazardous geological processes, cataloging, mapping, information technology, Internet mapping, Geoportal.

Для цитирования: Кичигин А. Г., Кучменко Е. В., Соловьев Н. М. Применение информационных технологий Интернет-картографии для анализа и представления результатов работ по геологическому изучению опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории // Региональная геология и металлогения. – № 94. – 2023. – С. 68–74. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_68-74.

Введение. Уникальность Байкала и его недр заключается в том, что он одновременно является водным, седиментационным и нефтегазоносным бассейном. В нем присутствуют все признаки нефтегазоносности, присущие другим известным нефтегазоносным бассейнам: наличие терриген-

ных осадков большой мощности (более 10 км), присутствие рассеянного органического вещества в концентрации, достаточной для формирования нефтегазоматеринских толщ. Термобарические условия благоприятны для масштабной генерации газообразных и жидких углеводородов.

Изучение углеводородов (УВ) на Байкале началось около 250 лет назад с исследования естественных проявлений газа, нефти и битумов. Наиболее активно изучение УВ на Байкале проводилось с 1930-х годов преимущественно с целью поиска месторождений. В XXI веке изучение УВ на Байкале выполняется в основном силами научных и геологических организаций с научными целями.

Одним из важных направлений изучения процессов миграции УВ на Байкале в последние годы является обобщение уже накопленных знаний, а также каталогизация и картографирование всех известных проявлений для анализа их влияния на экосистему и минимизации их опасного воздействия на людей.

Геологические особенности. В результате эмиграции из нефтегазоматеринских толщ в водной толще Байкала, на дне озера и по его берегам сформировались следующие углеводородные системы: выходы свободного горючего газа и нефти, накопление залежей нефтяных битумов и газовых кристаллогидратов, углеводородные газы, растворенные в водной толще и донных осадках. Природные процессы миграции углеводородов (УВ) и формы их проявления фиксируются на Байкале преимущественно в акватории озера [1; 3–5].

В местах естественных нефтепроявлений на дне озера образуются отложения тяжелых фракций нефти, в водной толще фиксируются восходящие капли легких фракций нефти, а на поверхности озера – нефтяная пленка на воде или пятна и лужицы нефти на льду.

Естественные выходы УВ газов на Байкале более многочисленны, чем нефтепроявления. На больших глубинах озера (более 800 м) УВ газы, поступающие из осадочной толщи, образуют на дне озера и в донных осадках залежи газовых кристаллогидратов. На меньших глубинах в местах естественных выходов УВ газов на дне озера образуются газовые грифоны, от которых через водную толщу восходят струи УВ газов. На средних глубинах такие струи газов не достигают поверхности озера, полностью растворяясь в воде, а в местах с небольшой глубиной (до 15 м) восходящие потоки пузырей УВ газов достигают водной поверхности [2].

Поисковым признаком выходов УВ газов в зимнее время года являются «пропарины», т. е. полыньи, свободные ото льда. Форма пропарин, как правило, округлая, а размер зависит от дебита газопроявления, глубины воды, а также стадии таяния ледяного покрова – как правило, варьируется от 0,5 до 50 м в диаметре, реже более. Встречаются как одиночные, так и целые поля пропарин, что соответствует участкам с многочисленными выходами УВ газов со дна озера. На рис. 1 приведено изображение струй пузырей УВ газов на экране эхолота и фотография выхода пузырей на поверхность воды в пропарине во льду.

Проводимые наблюдения. В рамках выполнения федеральной целевой программы «Охра-

на озера Байкал и социально-экономическое развитие Байкальской природной территории на 2012–2020 годы» по мероприятию «Геологическое изучение опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории» (ЦЭЗ БПТ) Всероссийским научно-исследовательским геологическим институтом им. А. П. Карпинского (ФГБУ «ВСЕГЕИ», г. Санкт-Петербург) с участием ООО «Байкальский центр» (г. Иркутск) с 2016 г. проводились наблюдения современного состояния и активности опасных процессов, связанных с миграцией УВ. Наблюдения проводились разными методами и средствами, в том числе с использованием комплекса геофизических методов (непрерывное сейсмоакустическое профилирование, георадарное профилирование, эхолотирование рельефа дна и осадочной толщи, профилирование гидрохимико-физических показателей приповерхностного слоя водной толщи), путем отбора проб свободных газов, газов, растворенных в воде и в донных осадках, средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, подводной фото- и видеосъемки, аэрофотосъемки, а также выполнением маршрутных обследований.

На основе анализа результатов, полученных по каждому виду наблюдений, формируются ведомости аномальных значений, которые в дальнейшем каталогизируются и картографируются как признаки форм проявления УВ.

Каталогизация и картографирование проявлений. В результате проводимых наблюдений, а также путем сбора и обобщения информации, полученной другими исследователями, разрабатывается и регулярно актуализируется электронный каталог всех известных в настоящее время на Байкале проявлений процессов миграции УВ (далее каталог), а также атлас цифровых тематических карт, включающий в том числе эколого-геологическую карту расположения проявлений, учтенных в каталоге (далее – Карта).

В каталоге фиксируются проявления процессов миграции УВ, подразделяемые на выходы нефти, УВ газов, битумов и т. п. Кроме непосредственно проявлений в каталоге учитываются также признаки проявлений в трех формах:

1) геоморфологические признаки проявлений: формы рельефа, образуемые на байкальском дне или на поверхности суши в результате выхода или скопления УВ – покмарки, грязевые вулканы, газогидраты;

2) физические признаки в водной среде: утончение льда, круг на льду, пузыри УВ газов в толще льда, пропарина, группа пропарин;

3) химические признаки: аномальные содержания метана, гомологов метана и непредельных УВ в пробах свободного газа, газов, растворенных в воде и в донных осадках, а также аномальные содержания других химических веществ в воде и донных отложениях (гелий, водород и др.), аномалии гидрохимико-физических показателей проб воды – Eh, Ph, электропроводность, t °С.

Одно проявление УВ может быть учтено в каталоге в нескольких формах. Структура каталога содержит поля (столбцы), учитывающие перечисленные формы проявлений процессов миграции УВ, а также методы и средства, которыми они были обнаружены. При пополнении каталога новыми данными его записи подвергаются кластеризации близкорасположенных форм проявлений, выявленных различными методами и в разные периоды наблюдений. Необходимость кластеризации связана с погрешностями при определении местоположения форм проявлений УВ при выполнении наблюдений.

Точность координатной привязки ограничена, во-первых, точностью систем позиционирования (GPS, Глонасс), используемых при навигации, а во-вторых – особенностями самих форм проявления и методов их наблюдения. Например, при определении местоположения выхода струи газа со дна, зафиксированного с движущегося судна, с учетом глубины на данном участке и скорости движения судна погрешность может составлять ±20–25 м. Или при выявлении форм проявления на материалах ДЗЗ из космоса, точность привязки проявления определяется точностью привязки самого космоснимка – ±10–20 м. Поэтому формы проявлений, зафиксированные при наблюдениях на расстоянии друг от друга менее чем 50 м, каталогизируются в настоящее время как одно проявление. При этом при увеличении детальности и точности картографирования и объединении в каталог данных, полученных на разных масштабных уровнях исследований, возникают методические проблемы.

Начиная с 2020 г. проводятся детальные обследования отдельных участков акватории Байкала,

на которых ранее, по данным ДЗЗ, из космоса и при маршрутных обследованиях фиксировались проявления процессов миграции УВ и на которых они могут представлять наибольшую опасность для людей, это – участки акватории вблизи населенных пунктов. На таких участках в ледовый период выполнялись аэрофотосъемка и формирование плановых аэрофотоснимков с пространственным разрешением 5–10 см, что позволяет очень детально картографировать наиболее опасные формы проявления процессов миграции УВ-пропарины. Например, в результате плановой аэрофотосъемки вблизи пос. Мурино на участке прибрежной акватории площадью менее 1 км² зафиксировано и картографировано более 1000 проявлений процессов миграции углеводородов в виде выходов газа из дна и приуроченных к ним пропарин во льду (рис. 2). Аналогичное крупномасштабное картографирование выполнено на участках прибрежной акватории в заливе Провал в районе села Оймур, улуса Дулан, мыса Облом, а также в районе сел Исток и Посольское. Существенное увеличение точности и детальности сведений об учитываемых объектах требует выработки новых методических подходов их каталогизации и картографирования.

Структура каталога позволяет делать выборки по виду проявления, местоположению и средствам обнаружения, а также анализировать изученность проявлений в разных формах и планировать работы по их доизучению.

На цифровой карте на топографической основе показано местоположение учтенных в каталоге проявлений процессов миграции УВ, а также дополнительная картографическая информация – батиметрия, элементы разломной тектоники, пунк-

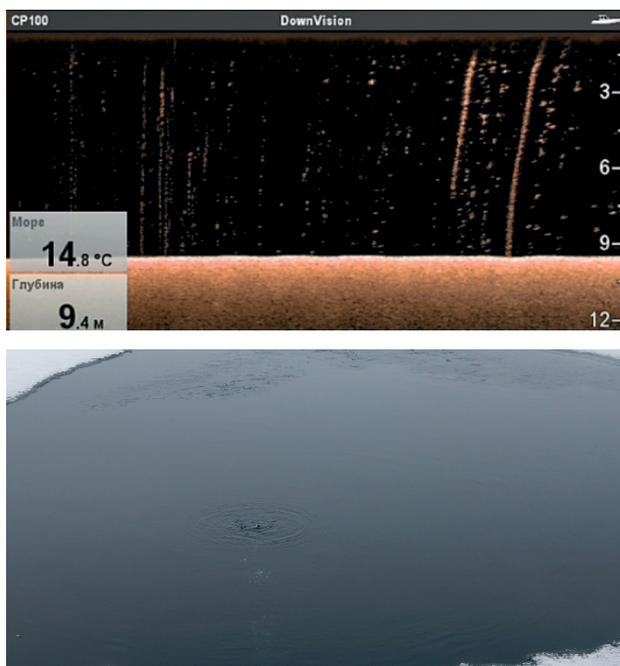


Рис. 1. Струи пузырей УВ газов на экране эхолота и фотография выхода пузырей на поверхность воды в пропарине во льду

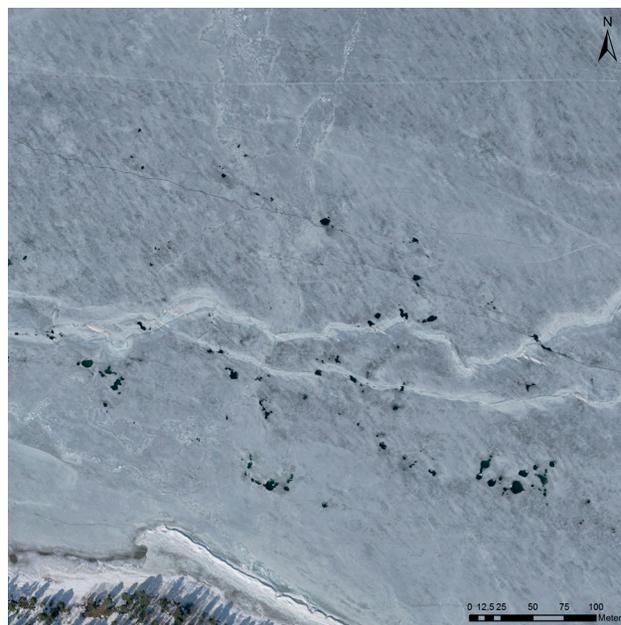


Рис. 2. Аэрофотоснимок многочисленных пропарин во льду у мыса Тонкий вблизи пос. Мурино

ты наблюдений за проявлениями УВ, расположение ледовых дорог, водных путей, популярные места зимней рыбалки. На рис. 3 приведен фрагмент эколого-геологической карты расположения проявлений, учтенных в каталоге.

Всего в каталоге в ходе работ зарегистрировано 2705 проявлений процессов миграции УВ, а также их признаков: геоморфологических, физических, химических (таблица).

Проблема оперативного доступа к результатам наблюдений. В настоящее время электронный каталог оформлен в виде электронной таблицы в формате Microsoft Excel, а цифровая карта – в формате геоинформационной системы ESRI ArcMap. Для оперативного доступа широкого круга пользователей к этим материалам, в том числе, информирования государственных органов власти, органов местного самоуправления, орга-

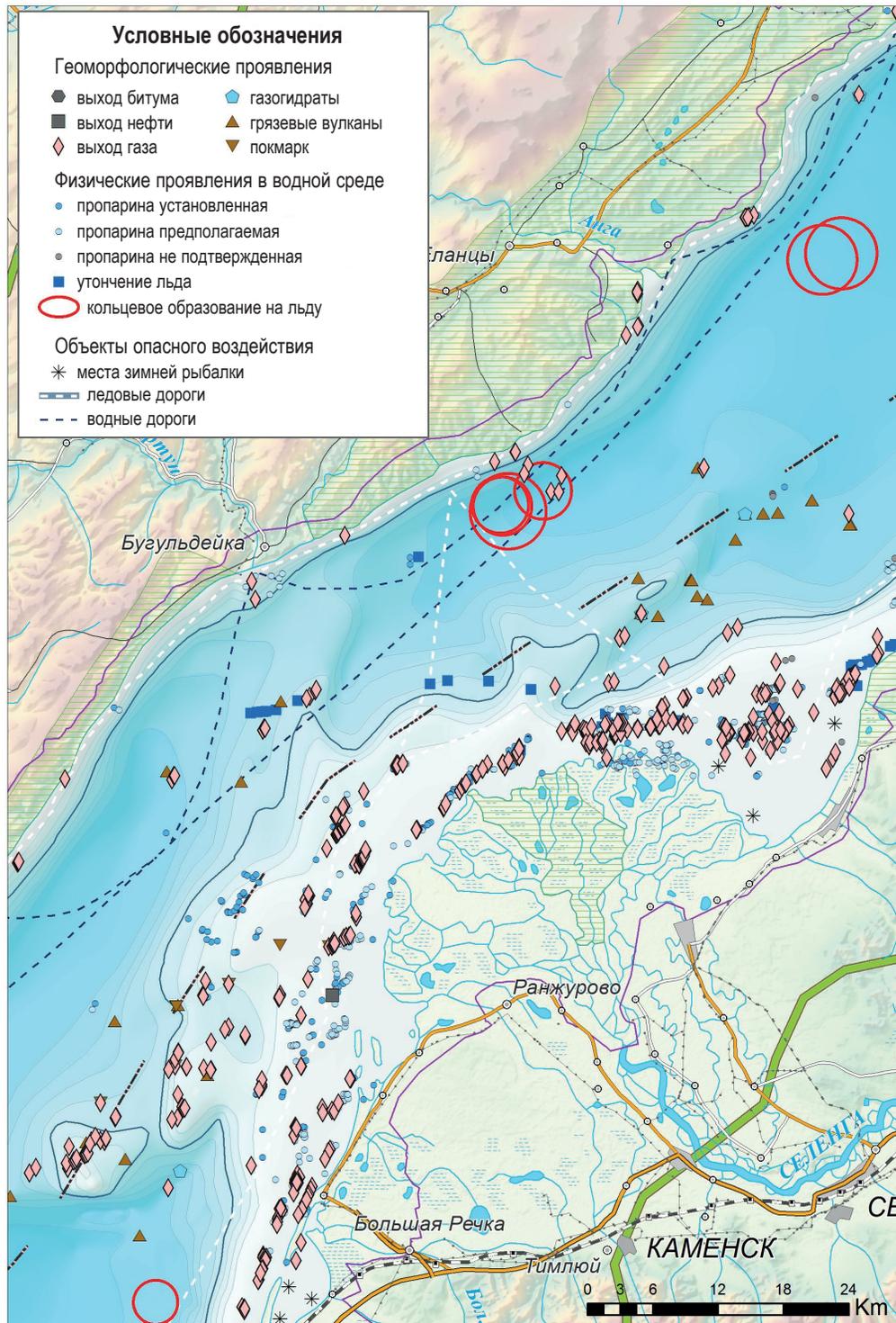


Рис. 3. Фрагмент эколого-геологической карты расположения проявлений УВ, учтенных в каталоге

Общее количество форм проявлений в электронном каталоге

	Выходы УВ	Геоморфологические	Физические	Химические	Всего форм
По литературным данным	165	57	93	75	390
По данным авторов	694	17	1372	232	2315
Всего	859	74	1465	307	2705

низаций и граждан о местах опасного проявления процессов миграции углеводородов, предлагается использование современных информационных технологий Интернет-картографии, которые в настоящее время широко внедряются в сферу деятельности научных, производственных организаций. Предлагается перевести каталог и карту на современную платформу Интернет-картографии, объединив их содержание и функциональные возможности в информационном Интернет-ресурсе – «Геопортал доступа к результирующим материалам работ по геологическому изучению и мониторинга опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в ЦЭЗ БПТ» (далее – Геопортал).

В качестве некоторых примеров близких по содержанию и функционалу аналогов можно привести следующие Интернет-ресурсы: 1) ФГБУ «Гидроспецгеология»: «Геологическое изучение недр и происходящих в них процессов в границах Байкальской природной территории» – <http://geomonitoring.ru:8084> 2) ФГБУ «Росгеолфонд»: «Интернет-каталог геологической изученности» – <http://www.geol.irk.ru/izuch/>, 3) Росгидромета: «Информация о загрязнении окружающей среды в районе озера Байкал» – <http://www.feerc.ru/baikal/ru/monitoring>, 4) Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН: «Сеть пунктов гидрометеорологических наблюдений» – <http://apik.imces.ru>.

Предлагаются следующие основные критерии выбора технических решений при создании Геопортала и его основной функционал.

1. Необходимо использовать современные клиент-серверные технологии, обеспечивающие надежное хранение данных, высокую скорость выполнения запросов к базе данных и работы картографических сервисов, устойчивость к пиковым нагрузкам.

2. Доступ пользователей к информации должен осуществляться в стандартном Интернет-браузере без использования специальных программных средств.

3. Интерфейс Геопортала должен иметь эргономичный современный дизайн, адаптируемый как для монитора компьютера, так и для мобильных устройств.

4. Геопортал должен обеспечивать следующий основной функционал:

– визуализацию местоположения проявлений процессов миграции УВ на карте с функционалом простой геоинформационной системы (условные обозначения, аннотирование, оверлэй и управле-

ние картографическими слоями, масштабирование, сдвиг карты и др.);

– возможность получения информации о проявлениях в текстовом, табличном виде, а также в виде фотографий, аэрофотоснимков или видеосюжетов и др.;

– возможность пользователя производить выборку необходимых сведений по основным характеристикам проявлений, например, по форме проявления, местоположению и др. и далее оперировать только с полученной выборкой;

– возможность экспортировать необходимые пользователю сведения для последующего автономного использования. Например, скачать пространственные данные о местоположении опасных проявлений процессов миграции УВ для их использования при навигации (в виде файлов типа KML) или скачать необходимую информацию о проявлениях в табличной форме (в виде файлов типа CSV).

5. Геопортал должен позволять пользователям, прошедшим регистрацию и получившим права поставщиков информации, загрузить в базу данных Геопортала результаты новых наблюдений с соблюдением установленных стандартов представления информации.

В настоящее время ООО «Байкальский центр», исходя из своих производственных потребностей на основе информационных технологий Интернет-картографии, разработал прототип сервиса загрузки, группировки (кластеризации) данных каталога при добавлении в него новых данных наблюдений. Сервис обеспечивает картографическое отображение в Интернет-браузере содержащейся в каталоге информации, ее предварительную обработку, получение статистических расчетов, интерактивную экспертную корректировку и сохранение результатов для актуализации сведений каталога и карты. На рис. 4 приведен прототип интерфейса сервиса. Хотя интерфейс сервиса пока мало развит и не рассчитан для внешних пользователей, однако оперативная обработка, группировка и визуализация новых данных существенно ускоряют процесс выполнения работ по актуализации каталога и карты и уменьшают вероятность появления ошибок.

Разработанный сервис может являться начальным заданием при создании Геопортала. Создание и поэтапное формирование Геопортала обеспечит оперативный доступ государственных органов власти, органов местного самоуправления, организаций и граждан к информации о существующих

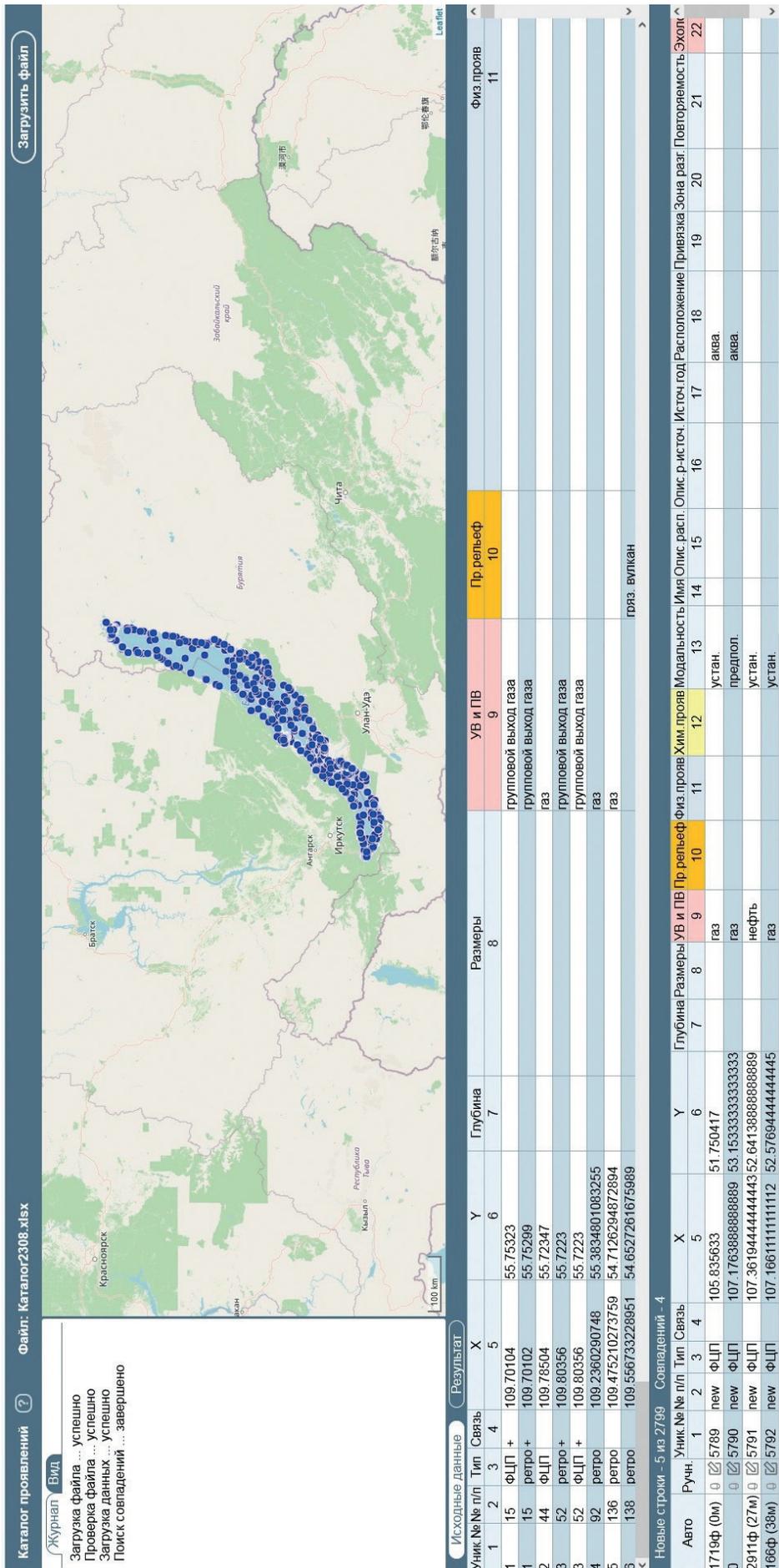


Рис. 4. Прототип сервиса загрузки, группировки (кластеризации) данных каталога при добавлении в него новых данных наблюдений

в настоящее время на Байкале опасностях, связанных с процессами миграции УВ.

Заключение. Применение информационных технологий Интернет-картографии для анализа и представления результатов работ по геологическому изучению опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в ЦЭЗ БПТ, и создание Геопортала обеспечит оперативный доступ государственных органов власти, органов местного самоуправления, организаций и граждан к информации о существующих в настоящее время на Байкале опасностях, связанных с процессами миграции УВ. Это особенно актуально в связи с резким увеличением в последние годы туристического потока на Байкал в зимнее время, когда туристов привлекает чистейший байкальский лед и его красота, а также с учетом того, что именно в зимнее время проявления процессов миграции УВ представляют для людей наибольшую опасность.

Преимуществами предлагаемого подхода является функциональная возможность как обеспечения оперативного доступа пользователей к опубликованной в Геопортале информации, так и использования специальных сервисов актуализации массива данных Геопортала удаленными пользователями и упорядочивания этих работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев В. П. Проблемы седиментогенеза и нефтегазообразования в Байкальской рифтовой зоне // Материалы Международной научной конференции «Рифты литосферы». – Екатеринбург, 2002. – С. 331–332.

риалы Международной научной конференции «Рифты литосферы». – Екатеринбург, 2002. – С. 331–332.

2. Исаев В. П., Коновалова Н. Г., Михеев П. В. Природные газы Байкала // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43, № 7. – С. 638–643.

3. Конторович А. Э., Дробот Д. И., Преснова Р. Н. Геохимия нафтидов и проблема генезиса байкальской нефти // Советская геология. – 1989. – № 2. – С. 21–29.

4. Нефтегазоносность отложений озера Байкал / А. Э. Конторович, В. А. Каширцев, В. И. Москвин, Л. М. Бурштейн, Т. И. Земская, Е. А. Костырева, Г. В. Калмычков, О. М. Хлыстов // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 12. – С. 1346–1356.

5. Пуцилло В. Г., Миронов С. И. Нефти, битумы и битуминозные породы района оз. Байкал // Нефти и битумы Сибири. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – С. 7–53.

REFERENCES

1. Isaev V. P. Problemy sedimentogeneza i neftegazobrazovaniya v Bajkal'skoj riftovoj zone. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Rifty litosfery»*. Ekaterinburg, 2002, pp. 331–332.

2. Isaev V. P., Konovalova N. G., Miheev P. V. Prirodnye gazy Bajkala. *Geology and Geophysics*, 2002, vol. 43, no. 7, pp. 638–643.

3. Kontorovich A. Je., Drobot D. I., Presnova R. N. Geohimija naftidov i problema genезisa bajkal'skoj nefti. *Soviet Geology*, 1989, no. 2, pp. 21–29.

4. Kontorovich A. Je., Kashircev V. A., Moskvina V. I. et al. Neftegazonosnost' otlozhenij ozera Bajkal. *Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 12, pp. 1346–1356.

5. Pucillo V. G., Mironov S. I. Nefti, bitumy i bituminoznye породы rajona оз. Bajkal. *Oil and Bitumen of Siberia*. Moscow, Izdatel'stvo AN USSR, 1958, pp. 7–53.

Кичигин Андрей Геннадьевич – директор, СО ФГБУ «Росгеолфонд»¹; инженер, ООО «Байкальский центр»². <kag38rus@gmail.com>

Кучменко Екатерина Владимировна – зам. директора, СО ФГБУ «Росгеолфонд»¹; геолог 1-й категории, ООО «Байкальский центр»². <takate63@yandex.ru>

Соловьев Николай Михайлович – вед. инженер, СО ФГБУ «Росгеолфонд»¹. <snmbox@mail.ru>

Kichigin Andrey Gennadevich – Director, SB FSBI «Rosgeolfond»¹; Engineer, Baikal Center LLC². <kag38rus@gmail.com>
Kuchmenko Ekaterina Vladimirovna – Deputy Director, SB FSBI «Rosgeolfond»¹; Geologist, Baikal Center LLC². <takate63@yandex.ru>

Solovev Nikolay Mikhaylovich – Leading Engineer, SB FSBI «Rosgeolfond»¹. <snmbox@mail.ru>

¹ Сибирское отделение ФГБУ «Российский федеральный геологический фонд» (СО ФГБУ «Росгеолфонд»). Ул. Декабрьских Событий, 29, Иркутск, Россия, 664007.

Siberian Branch of FSBI «Russian Federal Geological Fund» (SB FSBI «Rosgeolfond»). 29 Ul. Dekabr'skikh Sobytyy, Irkutsk, Russia, 664007.

² ООО «Байкальский центр». Ул. Декабрьских Событий, 29, Иркутск, Россия, 664007. Baikal Center LLC. 29 Ul. Dekabr'skikh Sobytyy, Irkutsk, Russia, 664007.

УДК 553.411'43.074(571.61/.620)
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_75-112

О. В. Петров, В. В. Шатов (ВСЕГЕИ), А. И. Ханчук, В. В. Иванов (ДВГИ ДВО РАН),
Ю. П. Змиевский, В. И. Шпикерман, Е. О. Петров, В. В. Снежко,
А. В. Шманяк, А. В. Молчанов, В. О. Халенев, Н. В. Шатова,
Н. В. Родионов, Б. В. Беляцкий, С. А. Сергеев (ВСЕГЕИ)

О ПЕРСПЕКТИВАХ ОТКРЫТИЯ НОВЫХ ЗОЛОТО-МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МАЛМЫЖСКОГО ТИПА НА ТЕРРИТОРИИ НИЖНЕГО ПРИАМУРЬЯ (ДАЛЬНИЙ ВОСТОК, РОССИЯ)

В статье обсуждаются новые данные, полученные в ходе минералого-петрографического, петрогеохимического, изотопно-геохронологического и изотопно-геохимического изучения магматических пород рудных полей Малмыж и Гион. Результаты изотопно-геохронологических исследований указывают на позднемеловой – сеноманский (97–99 млн лет) и кампанский (76–82 млн лет) радиологический возраст их магматической кристаллизации соответственно. На основе сравнительного анализа изученных образцов как друг с другом, так и с магматическими породами других порфировых месторождений Мира, обсуждаются результаты изучения на вторично-ионном масс-спектрометре (SIMS) закономерностей распределения элементов-примесей (REE+Y, Hf, Ti, U, Th, Pb) в акцессорных цирконах из магматических пород рудных полей Малмыж и Гион с целью оценки их потенциальной рудоносности на золото-медно-порфировое оруденение.

Ключевые слова: элементы-примеси в акцессорных цирконах, золото-медно-порфировое оруденение, рудные поля Малмыж и Гион, Нижнее Приамурье.

O. V. Petrov, V. V. Shatov (VSEGEI), A. I. Khanchuk, V. V. Ivanov (FEGI FEB RAS),
Yu. P. Zmievskiy, V. I. Shpikerman, E. O. Petrov, V. V. Snezhko,
A. V. Shmanyak, A. V. Molchanov, V. O. Khalenev, N. V. Shatova,
N. V. Rodionov, B. V. Belyatskiy, S. A. Sergeev (VSEGEI)

ON THE PROSPECTS FOR THE DISCOVERY OF NEW MALMYZH-TYPE GOLD-COPPER-PORPHYRY DEPOSITS IN THE LOWER AMUR REGION (FAR EAST, RUSSIA)

The paper discusses new data obtained during mineralogical-petrographic, petrogeochemical, isotope geochronological, and isotope geochemical studies of igneous rocks from the Malmyzh and Gion ore fields. Results of isotope geochronological studies indicate the Late Cretaceous-Cenomanian (97–99 Ma) and Campanian (76–82 Ma) radiological ages of their magmatic crystallization, respectively. Based on a comparative analysis of the studied samples with each other and with igneous rocks from other porphyry deposits of the world, the authors describe results of studying at the secondary ion mass-spectrometer (SIMS) of distribution patterns of trace elements (REE+Y, Hf, Ti, U, Th, Pb) in accessory zircons from igneous rocks of the Malmyzh and Gion ore fields in order to assess their ore potential for gold-copper-porphyry mineralization.

Keywords: trace elements in accessory zircons, gold-copper-porphyry mineralization, Malmyzh and Gion ore fields, Lower Amur region.

Для цитирования: Петров О. В. О перспективах открытия новых золото-медно-порфировых месторождений Малмыжского типа на территории Нижнего Приамурья (Дальний Восток, Россия) / О. В. Петров, В. В. Шатов, А. И. Ханчук, В. В. Иванов, Ю. П. Змиевский, В. И. Шпикерман, Е. О. Петров, В. В. Снежко, А. В. Шманяк, А. В. Молчанов, В. О. Халенев, Н. В. Шатова, Н. В. Родионов, Б. В. Беляцкий, С. А. Сергеев // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 94. – С. 75–112. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_75-112.

Введение. В настоящее время месторождения порфирового семейства являются одним из главных источников получения меди, золота и молибдена в мире, тогда как в нашей стране на долю данного геолого-промышленного типа приходится

не более 20 % разведанных запасов меди, 6 % – золота и 15 % – молибдена (рис. 1).

На данный момент на территории Российской Федерации выявлено 71 месторождение (17 – крупных, 15 – средних и 39 – мелких) и 518 рудо-

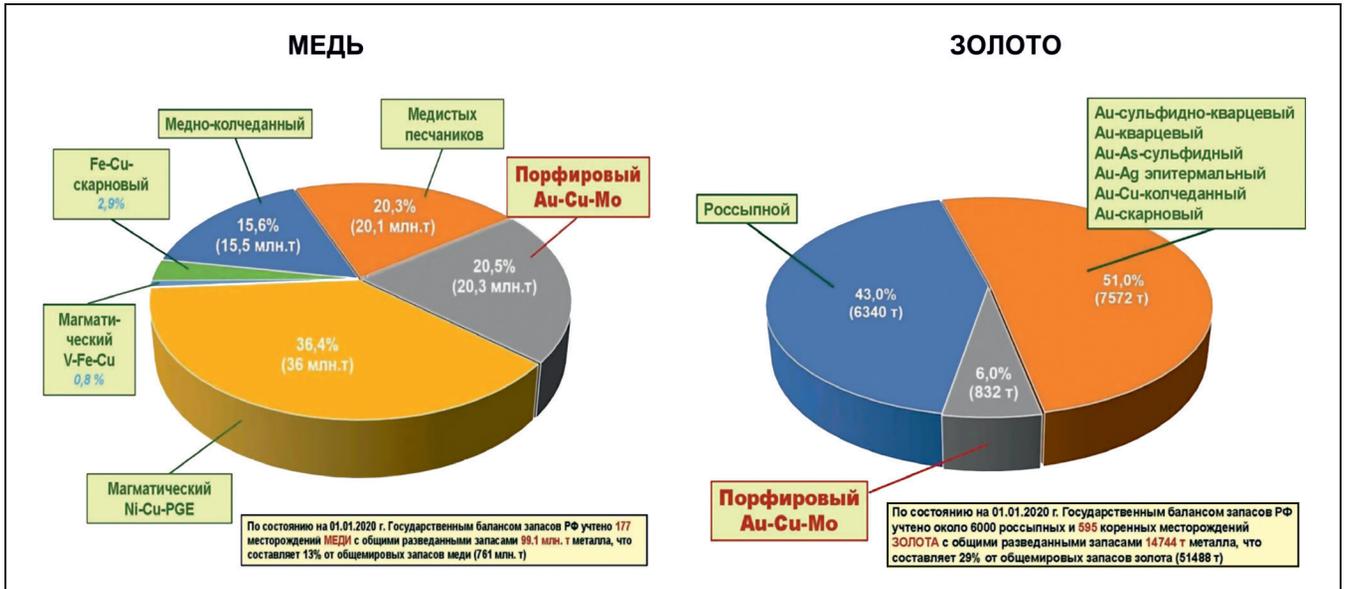
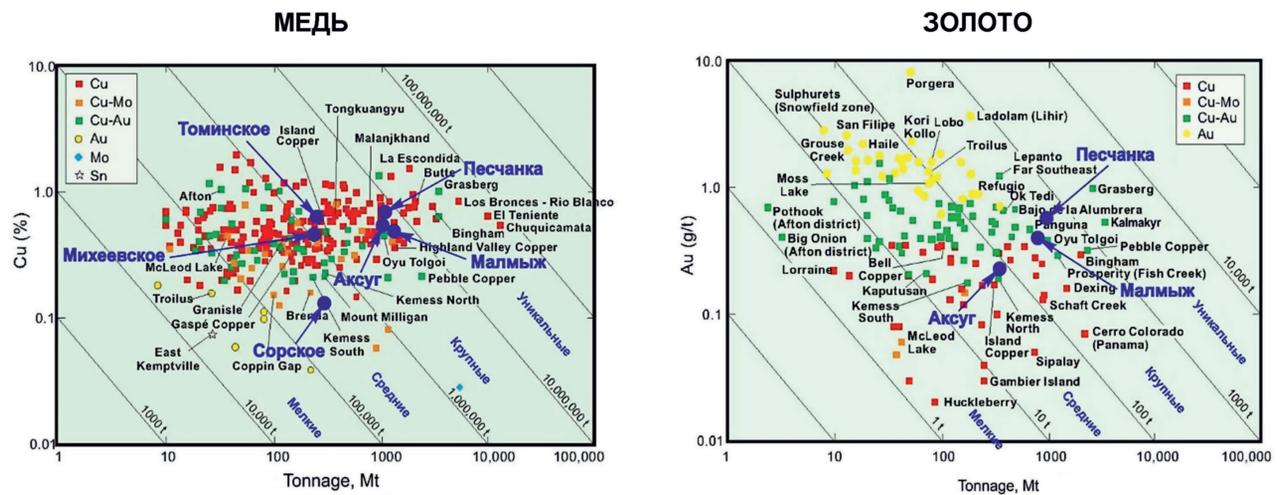


Рис. 1. Структура минерально-сырьевой базы меди и золота Российской Федерации (распределение по геолого-промышленным типам по состоянию на 1.01.2021 г.)



№ п/п	Месторождение	Медь		Золото		Молибден	
		Запасы, млн т	Содержание, %	Запасы, т	Содержание, г/т	Запасы, тыс. т	Содержание, %
1	Песчанка	6,4	0,53	350	0,30	132	0,014
2	Малмыж	8,3	0,35	347	0,20	—	—
3	Аксуг	3,6	0,67	83	0,20	71	0,015
4	Томинское	3,8	0,34	33	0,12	—	—
5	Михеевское	1,9	0,37	88	0,22	121	0,002
6	Сокское	0,4	0,25	—	—	89	0,060

Рис. 2. Положение ведущих порфировых месторождений России на вариационных диаграммах: Запасы (A + B + C₁ + C₂) vs. Содержание полезного компонента в рудах

проявлений, которые с определенной долей условности можно отнести к порфировому геолого-промышленному типу. Как показано на рис. 2, из шести ведущих золото-медно-порфиновых месторождений России (Песчанка, Малмыж, Аксуг, Томинское, Михеевское и Сорское) только пять относятся к крупным по запасам месторождениям, одно – к средним и ни одного – к уникальным ($Cu > 10$ млн т, $Au > 1000$ т) типа Эль-Тениенте, Рио-Бланко и Чуакамата в Чили, Гразберг в Папуа-Новая Гвинея, Калмакыр и Дальнее в Узбекистане, Бингэм в США, Ою Толгой в Монголии, Пэббл на Аляске, Кляймакс и Хендерсон в США и др. [6; 8; 22; 23; 35; 39; 50–52 и др.].

Здесь возникает закономерный вопрос: Почему структура МСБ меди, золота и молибдена России так разительно отличается от мировой? В чем причина?

В геологическом отношении территория России выглядит достаточно благоприятно с точки зрения возможностей обнаружения новых порфиновых объектов. В ее пределах установлены кайнозойские, мезозойские и палеозойские вулканоплутонические пояса окраинно-континентального типа, получил широкое развитие мощнейший островодужный или син- и постколлизийный магматизм. То есть, казалось бы, в пределах нашей страны существовали все необходимые условия для формирования порфиновых объектов, а месторождений мало.

Ответ на этот вопрос связан, по-видимому, с тем обстоятельством, что в течение длительного времени, еще начиная с советских времен, прогнозу и поискам этого типа рудных объектов на территории Российской Федерации не уделялось должное внимание. Все усилия были направлены на прогнозирование порфинового оруденения в пределах Среднеазиатских и Закавказских Республик бывшего Советского Союза – в Казахстане, Узбекистане, Таджикистане, Кыргызстане и Армении, что привело к открытию там целого ряда порфиновых объектов мирового класса таких как Медный Коунрад, Бошекуль, Актогай, Айдарлы, Нурказган, Коктасжал, Каратас, Саяк, Коксай, Талдыбулак, Калмакыр, Дальнее, Каджаран и др.

Тем не менее количество отечественных запасов меди, золота и молибдена, связанных с порфиновыми объектами, хоть и медленно, но с каждым годом продолжает увеличиваться, прежде всего в связи с открытием таких крупных порфиновых месторождений как Малмыж и Песчанка на Дальнем Востоке России, Быстринское в Забайкалье, Михеевское и Томинское на Урале, Аксуг в Алтае-Саянской складчатой области и др.

То есть можно ожидать, что перспективы воспроизводства МСБ меди, золота и молибдена нашей страны будут связаны в ближайшие годы, в том числе и с открытием и разведкой новых объектов порфинового семейства.

В ФГБУ «ВСЕГЕИ» в последние годы в результате реализации Государственной программы по региональному геологическому изучению недр

территории Российской Федерации в масштабе 1:1 000 000 (3-е поколение) и 1:200 000 (2-е издание) накоплен обширный фактический материал по характеристике золото-медно-порфиновых месторождений территории Российской Федерации, обстановкам их проявления и закономерностям размещения, что позволило составить «*Карту закономерностей размещения золото-медно-порфиновых месторождений России масштаба 1:2.5М*» [14].

Карта подготовлена в формате ArcGIS 10.2 и включает в себя целый ряд тематических «слоев», а также базу данных по рудным объектам порфинового семейства. На карте отражено положение всех известных месторождений, рудопроявлений и проявлений порфировой рудной минерализации, а также 297 рудных и потенциально рудных узлов, перспективных на обнаружение порфинового оруденения.

Анализ карты дал возможность локализовать на территории Российской Федерации более 200 перспективных на обнаружение порфировой рудной минерализации участков недр, привязанных к номенклатурным листам масштаба 1:200 000 с целью постановки в их пределах ГДП-200/2, в том числе по территории Дальневосточного федерального округа (ДФО) – 179 единиц (50 – первой и 129 – второй очереди) [11; 13; 14].

Здесь возникает вопрос: Что делать с этим многообразием перспективных участков недр и каким образом выделить среди них наиболее интересные в поисковом отношении объекты?

Общеизвестно, что одной из главных проблем геологосъемочных работ на современном этапе является повышение их поисковой эффективности. Актуальность этой проблемы не вызывает сомнений в связи с тем, что лимит легко открываемых в нашей стране месторождений, в том числе и золото-медно-порфинового геолого-промышленного типа, в настоящее время практически полностью исчерпан. Новые рудные объекты могут быть обнаружены только за счет скрытых, не выходящих на дневную поверхность рудных месторождений. Повышение поисковой эффективности геологосъемочных работ можно ожидать от широкого привлечения наряду с геохимическими, геофизическими, дистанционными и другими методами, также и *прецизионных изотопно-геохимических методов исследования вещества горных пород, руд и минералов*.

В последние годы за рубежом, главным образом в Китае, Австралии, Канаде, США, Аргентине, Чили и в других странах на основе использования современных инновационных технологий получило широкое развитие новое научное направление – так называемое «*изотопно-геохимическое картирование*» интрузивных комплексов, нацеленное на оценку их потенциальной рудоносности на золото-медно-порфиновое оруденение.

В частности, в ходе этих исследований было показано, что циркон, как аксессуарный минерал магматических пород, благодаря своим уникальным физическим свойствам, способности фикси-

ровать условия среды минералообразования и консервативным изотопно-геохимическим характеристикам может рассматриваться в качестве одного из самых надежных *минералов-индикаторов продуктивных на золото-медно-порфировое оруденение* интрузивных массивов [3; 5; 16; 17; 24; 26–30; 32; 36; 38; 41–46; 49; 50; 54 и др.].

Начиная с 2020 г., данная методика, позволяющая на основе изучения закономерностей распределения некоторых элементов-примесей (REE+Y, Hf, Nb, Ta, U, Th, Pb, Ti и др.) в акцессорных цирконах с большей долей вероятности разбраковывать порфиновые интрузивы *на продуктивные и заведомо «безрудные»*, также широко используется во ФГБУ «ВСЕГЕИ» при прогнозно-минерагеническом анализе территории Российской Федерации на золото-медно-порфировое оруденение.

Эта методика уже успешно апробирована нами на примере целого ряда порфировых объектов Дальневосточного региона России – Малмыж, Пони, Песчанка, Рябиновое, Морозкинское, Россошинское, Доронинское, Лора, Лазурное, Медьгора и др., где показала свою эффективность [10; 14; 24; 44 и др.].

В настоящей статье авторы поставили перед собой задачу продемонстрировать на примере территории Нижнего Приамурья, в пределах которой расположено крупное золото-медно-порфировое месторождение Малмыж, эффективность данного методического подхода для разбраковки порфировых гранитоидных комплексов позднемелового возраста на продуктивные и «безрудные» на основе использования индикативных геохимических параметров циркона (Porphyry Indicator Zircons – PIZs [38; 45]), указывающих на то – был ли материнский гранитоидный расплав в достаточной степени флюидо- и водонасыщен, окислен, обогащен серой и рудогенными элементами для того, чтобы запустить механизм процесса формирования порфировой рудоносной гидротермально-метасоматической системы.

В статье также обсуждаются новые данные, полученные коллективом специалистов из ВСЕГЕИ и Дальневосточного геологического института ДВО РАН в ходе минералого-петрографического, петрогеохимического, изотопно-геохронологического и изотопно-геохимического изучения магматических пород рудных полей Малмыж и Гион (Маноминский перспективный участок). Это позволило авторам статьи на основе сравнительного анализа изученных образцов магматических пород как друг с другом, так и с магматическими породами других порфировых месторождений Мира, прийти к выводу о высоких перспективах обнаружения в пределах потенциального рудного поля Гион золото-медно-порфировой рудной минерализации Малмыжского типа.

Положение рудных полей Малмыж и Гион в региональных геологических структурах, потенциальных геофизических полях и металлогенической зональности территории Нижнего Приамурья. Как показано на рис. 3, в структурах

Сихотэ-Алинского орогенного пояса территория Нижнего Приамурья принадлежит к *Журавлевско-Амурскому террейну* турбидитового осадочного бассейна, сформированного на океанической плите в раннемеловое время на границе континент–океан и деформированного в позднем альбе – сеномане в результате синсдвиговой коллизии с континентальной окраиной раннемеловой островной дуги.

Важную роль в металлогении территории Нижнего Приамурья, как и всего юга Дальнего Востока России, играют проявления позднеальб-сеноманского синколлизийного и кампанского постколлизийного гранитоидного и монзонитоидного магматизма, так как с ними в регионе связано формирование крупных месторождений редких, цветных и благородных металлов различных геолого-промышленных типов: порфирового, скарнового, золото-кварцевого и др. [2; 7; 11; 13; 18–21].

Особое звучание эта проблема приобрела в связи с открытием в пределах Журавлевско-Амурского террейна крупного золото-медно-порфирового месторождения Малмыж и целого ряда перспективных на золото и медь рудопроявлений, таких как Пони и Тырское. Все эти объекты имеют очень важное значение для развития минерально-сырьевой базы Дальнего Востока России.

Многочисленными работами А. И. Ханчука [2; 18–21; 31], О. В. Петрова [11; 13; 14] и соавторов была дана развернутая характеристика геологических, минерагенических, петрохимических и геохимических особенностей синорогенных (коллизийных) позднемеловых рудоносных магматических пород, впервые произведена оценка возраста их кристаллизации по акцессорным цирконам, предложены к рассмотрению геологические, регионально-минерагенические и геодинамические модели формирования магматических образований, как Журавлевско-Амурского террейна, так и всего Сихотэ-Алинского орогенного пояса.

В результате этих работ выяснилось, что даже территориально сближенные позднеальб-сеноманские и кампанские интрузивы Сихотэ-Алиня могут иметь пестрые петрогеохимические характеристики. В одном случае они представлены габбро, монцогаббро и монзонитами, а в другом – адакитами и гранитоидами А-, I- и S-типов.

Такая комбинация внутриплитных и надсубдукционных (или мантийных и коровых) признаков характерна для магматитов трансформных континентальных окраин. При этом было показано, что с мантийно-коровыми синорогенными интрузиями гранитоидов связано образование Au-Cu- и Au-Mo-Cu-порфирового оруденения в раннемеловом террейне турбидитового осадочного бассейна на границе континент–океан и Cu-Au-W оруденения в террейне средне-позднеюрской аккреционной призмы (рис. 3).

На основании чего эти авторы смогли прийти к выводу о проявлении на рассматриваемой территории на рубеже 100 ± 10 млн лет медного, вольфрамового, оловянного и золотого оруденения, сформированного в результате синсдвигового

орогенеза в обстановке трансформной континентальной окраины в период и после коллизии островной дуги.

Однако, несмотря на открытие Малмыжского месторождения и рудопоявлений Пони и Тырское, минерагенический потенциал территории Нижнего Приамурья в отношении золото-медно-порфирового оруденения можно считать до конца еще не исчерпанным.

В ходе работ ГК-200/2 и ГК-1000/3 в ее пределах установлена целая серия перспективных участков недр (Подхоренковский, Переселенка, Мухенский, Маноминский – Гион, Мачтовый, Ситогинский, Дидбиранский, Золотогорский, Благодатненский и Амысканский), также связанных с проявлением поздне мелового гранитоидного и монцитонитового магматизма и в пределах которых ожидается обнаружение рудной минерализации золото-медно-порфирового геолого-промышленного типа (рис. 3, 4).

Из вышеперечисленных перспективных участков наиболее интересным в прогностическом отношении является Маноминская площадь, расположенная на правом берегу р. Амур, в 50 км к югу от месторождения Малмыж и которая в геологической литературе нередко фигурирует под названием «потенциальное рудное поле Гион» [13].

На рис. 5 демонстрируется положение рудных полей Малмыж и Гион в региональных геологических структурах, на космическом снимке и в потенциальных геофизических полях территории Нижнего Приамурья. При рассмотрении этой иллюстрации, прежде всего, обращает на себя внимание факт чрезвычайно высокой степени сходства этих двух рудных полей как по особенностям их геологического строения, выраженности на местности положительными формами рельефа, так и по положению в потенциальных геофизи-

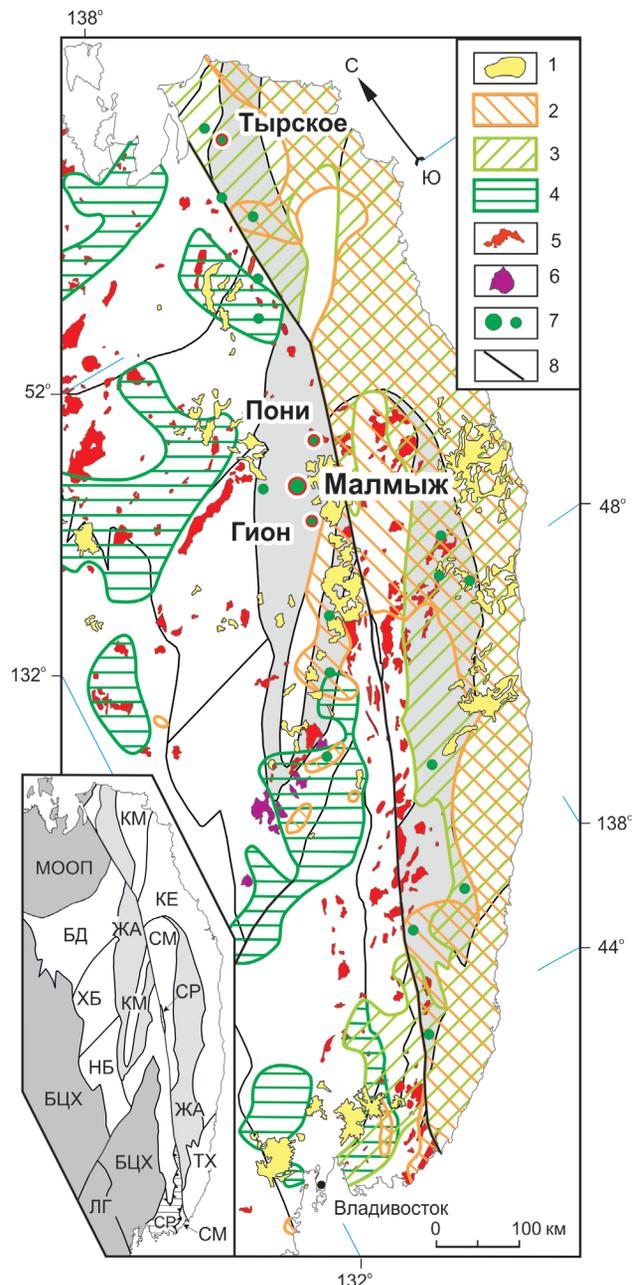
ческих полях. В обоих случаях территории этих рудных полей хорошо фиксируются высокоградиентными положительными магнитными и гравитационными аномалиями. Особенно детально этот вопрос изучен на примере Малмыжского рудного поля, для которого, по результатам работ ряда исследователей [9; 25], была предложена геолого-геофизическая модель Малмыжской рудно-магматической системы с целью использования магнитометрических и гравиметрических данных при прогнозировании на территории Нижнего Приамурья перспективных участков недр на золото-медно-порфировое оруденение.

На рис. 6 приводится фрагмент геолого-геофизического разреза земной коры по опорному профилю 8-ДВ, пересекающему в интервале ПК 1450–1525 км территории рудных полей Гион и Малмыж.

Рис. 3. Положение золото-медно-порфировых рудных полей Малмыж, Гион, Пони и Тырское в структурах Сихотэ-Алинского орогенного пояса

1–6 – меловые и кайнозойские магматические комплексы (штрихами показаны ареалы распространения): 1 – плиоцен (платобазальты), 2 – поздний палеоцен – миоцен (риолиты, бимодальные вулканы, базальты и габбро-граниты), 3 – турон – ранний палеоцен (андезиты–риолиты и гранитоиды), 4 – поздний альб – нижний сеноман (базальты, андезиты, риолиты), 5 – позднеальб-сеноманские гранитоиды и монцитониты, 6 – готерив-барремские граниты; 7 – золото-медно-порфировые месторождения и рудопоявления; 8 – Центральный Сихотэ-Алинский разлом.

На врезке – террейны средне-позднеюрской аккреционной призмы: БД – Баджалский и НБ – Наданьхада-Бикинский, СМ – Самаринский и ХБ – Хабаровский; террейны поздне-валанжинской аккреционной призмы: ТХ – Таухинский; террейны баррем-раннеальбской аккреционной призмы: КМ – Киселевско-Маноминский; террейны баррем-раннеальбской островной дуги: ЖА – Жемско-Удильский; террейны ранне мелового турбидитового бассейна: ЖА – Журавлевско-Амурский; СР – Сергеевский террейн палеозойских континентальных аллохтонов на террейне юрской аккреционной призмы; террейны и супертеррейны орогенных поясов: БЦХ – Бурея-Цзямуси-Ханкайский раннепалеозойский, ЛГ – Лаоелин-Гродековский триасовый, МООП – Монголо-Охотский юрский



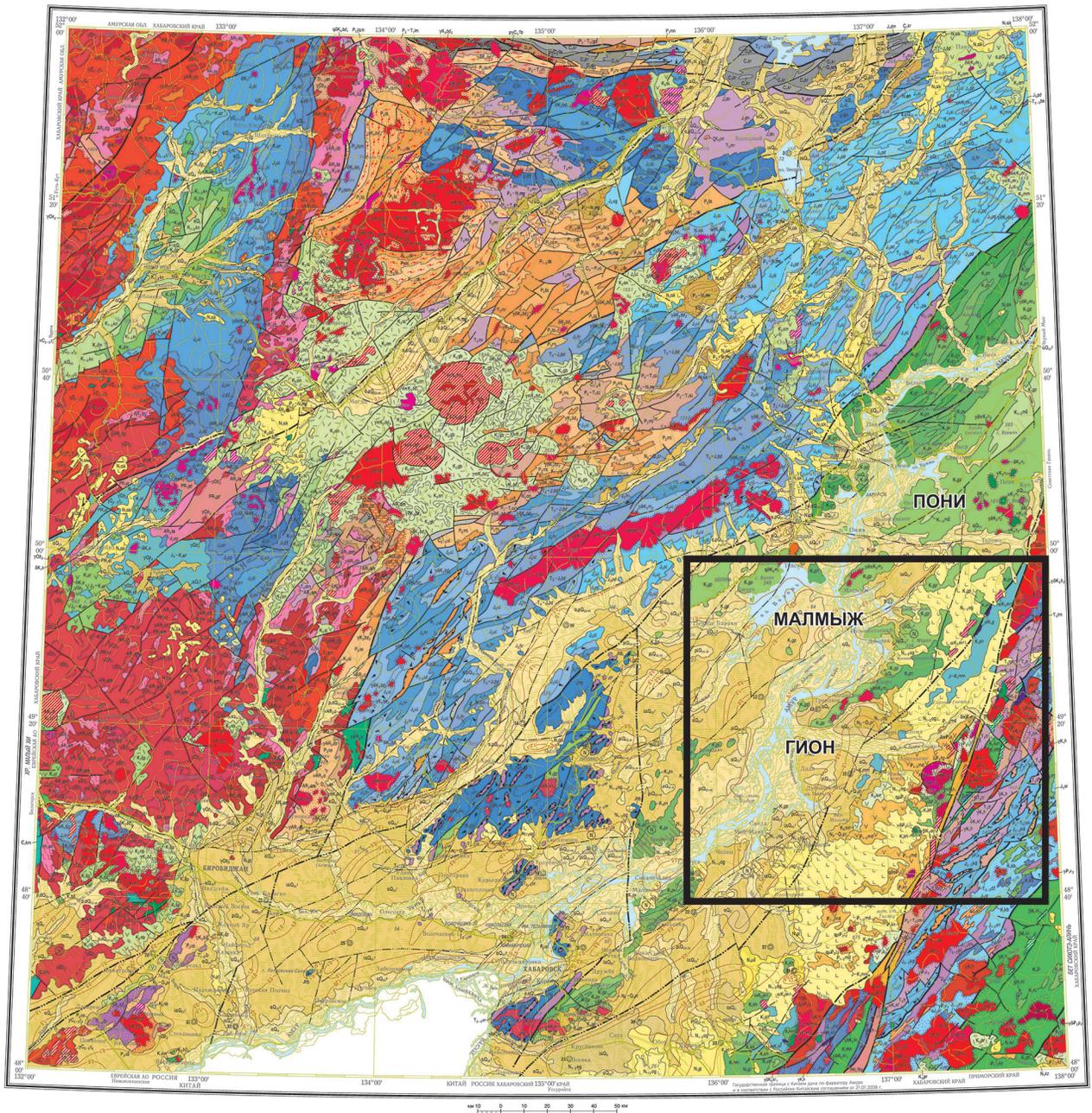


Рис. 4. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1М, лист М-53 (Хабаровск) Черной рамкой показано местоположение изученной территории (см. рис. 5)

В целом данный фрагмент геолого-геофизического разреза (ПК 1450–1590) освещает глубинное строение зоны сочленения Западно-Сихотэалинской и Центрально-Сихотэалинской СФЗ. В пределах Западно-Сихотэалинской СФЗ на данном фрагменте выделяются Приамурская и Приуссурийская подзоны, которые сложены раннемеловыми турбидитовыми и аккреционными комплексами пород, сформированными на океанической плите на границе континент–океан. Приамурская подзона, в пределах которой и расположены рудные поля Малмыж и Гион, в своей верхней, складчато-надвиговой части представляет собой крупную синформу, выпол-

ненную турбидитовыми отложениями нижнего мела мощностью до 8–12 км, смятыми в симметричные складки. В западной ее части (ПК 1450–1485) на глубинах 8–12 км на границе верхнего складчато-метаморфического слоя с нижележащей зоной гранитизации мелового возраста, четко выделяется слой куполовидной формы со сгущением площадок отражения мощностью 2–8 км, который интерпретируется как реликт палеоокеанической коры, представленный базитами. В палеогеодинамическом плане данная структура рассматривается в качестве задугового спредингового бассейна. Турбидитовый состав осадков позволяет отнести

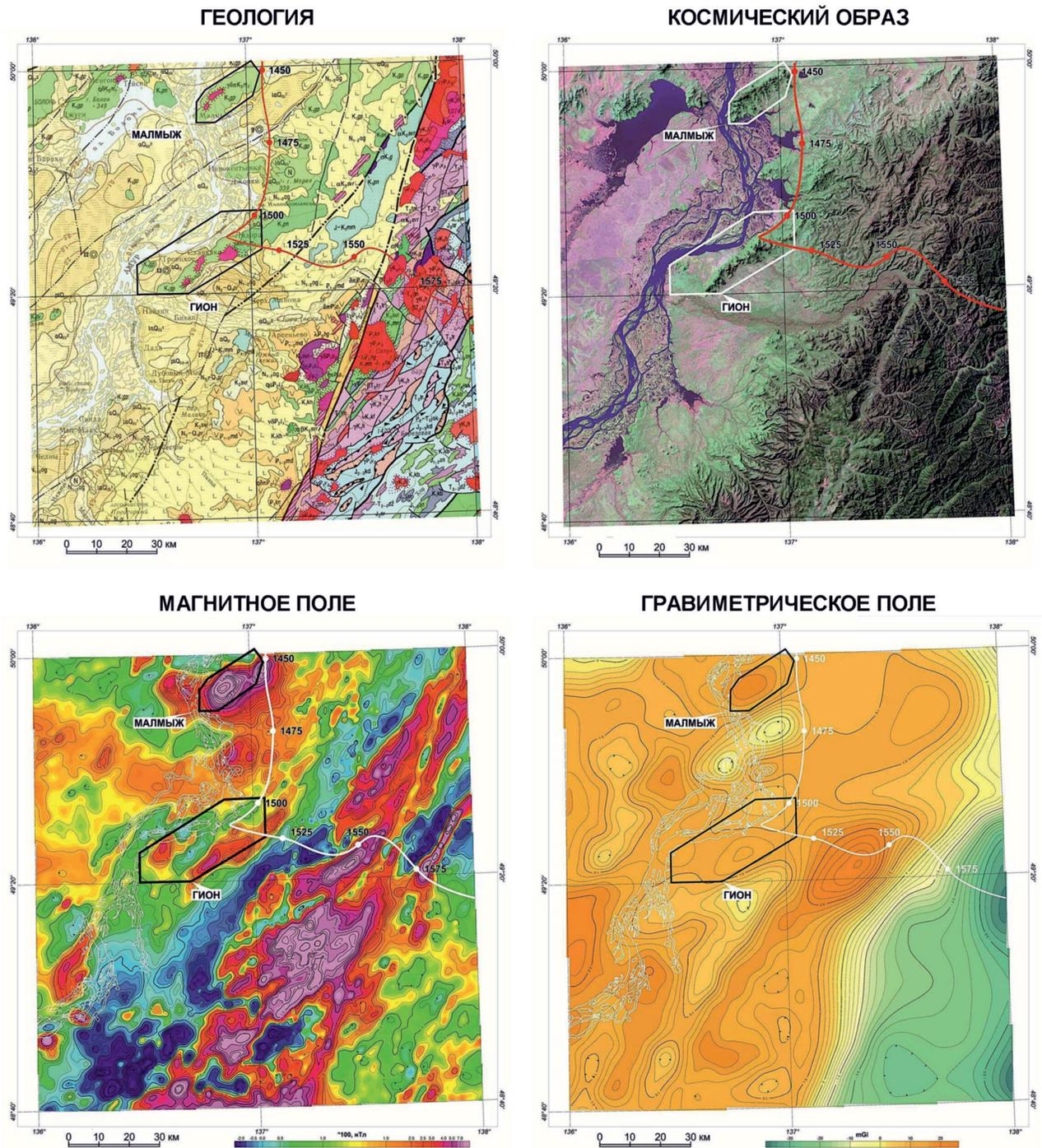


Рис. 5. Положение рудных полей Гион и Малмыж в региональных геологических структурах, на космическом снимке и в потенциальных геофизических полях территории Нижнего Приамурья

Космический образ представлен в виде цветовой композиции RGB 12, 8 и 4-го каналов KC SENTINEL2, совмещенной с цифровой моделью рельефа поверхности.

Красной и белой линиями на рисунках показан фрагмент траектории комплексного геолого-геофизического разреза земной коры 8-ДВ в интервале 1450–1595 км

данную структуру к трансформным. Останцы палеоокеанической коры над зоной мелового магмообразования могли служить источником флюидов, заимствующих благородные металлы для формирования месторождений золото-молибденовой формации. Именно к этой зоне и приурочено месторождение Малмыж.

Восточнее, ПК 1480–1525, в интервале которого расположено потенциальное рудное поле Гион, подобный слой со сгущением площадок отражения наблюдается уже на глубинах 18–20 км, где залегает под область меловой гранитизации (магмообразования), погружаясь под Приуссурйскую подзону. В целом, выделенную область

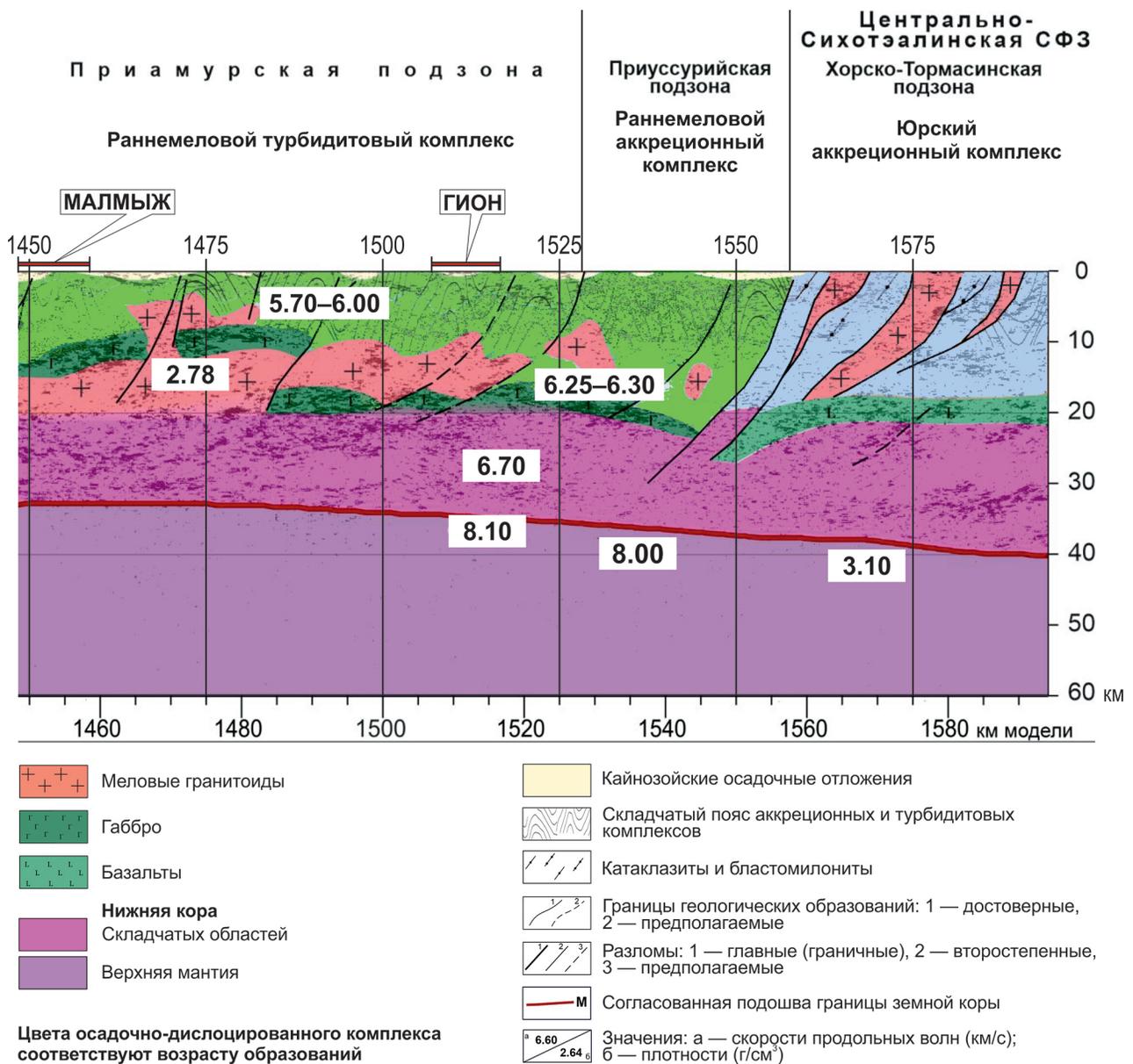


Рис. 6. Комплексный геолого-геофизический разрез земной коры 8-ДВ. Фрагмент: интервал ПК 1450–1595 км, пересекающий территории рудных полей Гион и Малмыж

гранитизации вполне можно сопоставить с гранитным слоем, который здесь и по совокупности геофизических данных имеет аномально малую мощность – 5–8 км. Базитовый слой характеризуется относительно большей мощностью – 15–17 км, с увеличением мощности к востоку, к границе с Приуссурийской подзоной, до 18 км.

Поверхность М по профилю от ПК 1450 до ПК 1525 держится примерно на глубине 32–33 км, то есть земная кора в Приамурской подзоне, как и других зонах Сихотэ-Алинской орогенной системы, имеет сокращенную мощность.

Рудное поле Малмыж. Малмыжское рудное поле расположено в южной части Хабаровского края, в нижнем течении р. Амур. Входящее в его состав одноименное золото-медно-порфи-

ровое месторождение приурочено к небольшим интрузивным телам гранитоидов позднемелового (сеноманского) возраста, среди которых наиболее крупным является Боккинский массив, прорывающий терригенные породы нижнего мела (рис. 7).

На современном уровне эрозионного среза Боккинский массив и сопровождающие его в виде саттелитов более мелкие куполо-, штоко- и дайкообразные тела порфиroidных диоритов, кварцевых диоритов и гранодиоритов, а также диорит- и гранодиорит-порфиroidов образуют линейный рудно-магматический ареал, контролирующий размещение золото-медно-порфиroidной минерализации. Ареал вытянут в северо-восточном направлении вдоль оси Малмыжской зоны разломов более чем на 20 км при ширине в 5–10 км. В его пределах выделяется целая серия рудоносных

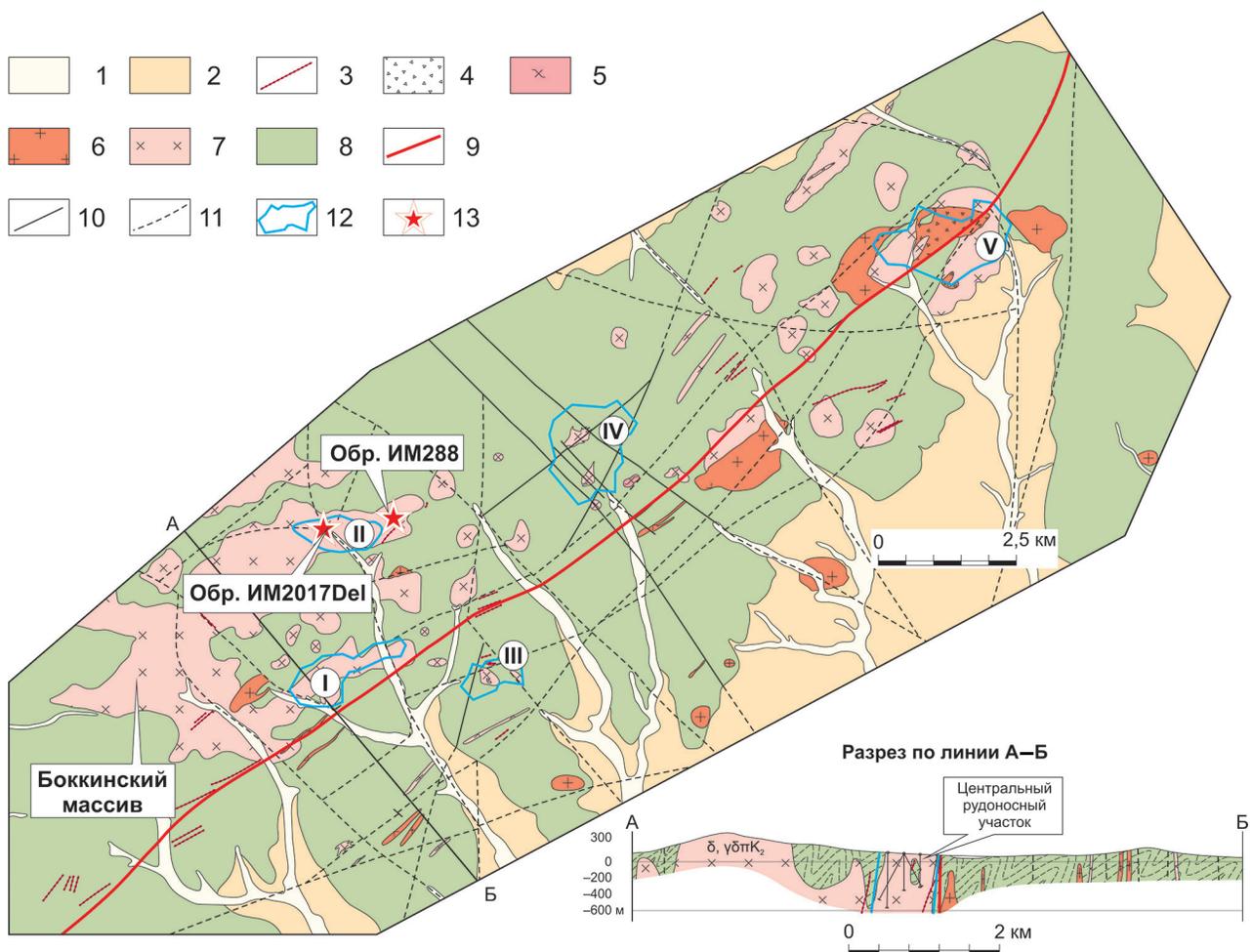


Рис. 7. Схема геологического строения рудного поля Малмыж

1–2 – четвертичные отложения (1 – речные аллювиальные и делювиальные отложения, 2 – суглинки, супеси, дресва, щебень, глины с редкой галькой и гравием); 3–7 – магматические образования позднемелового (сеноманского) возраста (3 – гипабиссальный дайковый комплекс: диорит- и кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры, 4 – гидротермально-магматические эруптивные брекчи, 5 – диорит-порфиры, 6 – порфиroidные гранодиориты и гранодиорит-порфиры, 7 – порфиroidные кварцевые диориты, кварцевые диорит-порфиры); 8 – нижнемеловые терригенные отложения (Ларгасинская свита: песчаники, алевролиты, гравелиты, туффиты); 9 – ось Малмыжской зоны разломов; 10–11 – тектонические нарушения (10 – установленные, 11 – предполагаемые); 12 – проекция на дневную поверхность штокверковых золото-медно-порфирировых рудных тел (рудоносные участки – римские цифры в кружочках: I – Центральный, II – Северный, III – Равнина, IV – Долина, V – Свобода); 13 – места отбора проб на изотопно-геохронологические и изотопно-геохимические исследования

участков штокверкового типа (Центральный, Северный, Равнина, Долина, Свобода и др.), приуроченных к выходам на дневную поверхность малых тел диорит- и гранодиорит-порфиров позднемелового возраста, прорывающих терригенные и туфогенно-терригенные породы нижнемеловой (альбской) ларгасинской свиты.

На территории рудного поля по структурно-морфологическим особенностям выделяются линейные и ареально-изометрические штокверки, а по вещественным характеристикам – магнетит-сульфидные существенно медные и кварц-сульфидные золотосодержащие медные штокверки.

Установленная в пределах Малмыжского рудного поля гидротермально-метасоматическая зональность, обусловленная процессом внедрения сеноманских гранитоидов, выражается в смене от центра к периферии кварц-биотит-калишпатовых гидротермалитов сначала кварц-серицит-карбо-

нат-хлоритовыми, а затем кварц-серицитовыми метасоматитами или филлизитами, а еще дальше – пропилитами, образующими самый внешний ореол гидротермальных изменений. По особенностям внутреннего строения выявленная зональность мало чем отличается от типовой «диоритовой» модели строения рудоносной порфирировой системы, предложенной Дж. Лоуэллом и Дж. Джильбертом [37]. Выявленные в восточной части рудного поля ореолы аргиллизации имеют гипергенную природу, «накладываясь» на все вышеперечисленные типы гидротермально-метасоматических изменений.

Большинство рудных тел Малмыжского месторождения контролируется разрывными нарушениями преимущественно северо-восточного простирания. Рудная минерализация представлена вкрапленностью и прожилками магнетита, пирита, халькопирита и борнита. В подчиненном количе-

Содержания петрогенных и малых элементов в интрузивных породах рудных полей Гион и Малмыж (участок Северный)

Оксиды, малые элементы, %	Малмыж		Гион				Предел обнаружения
	Кварцевый диорит	Диорит	Кварцевый диорит-порфир	Гранодиорит-порфир	Кварцевый диорит-порфир	Гранодиорит-порфир	
	Обр. ИМ-288	Обр. ИМ-2017 DEL	Обр. 2-2	Обр. 3-4	Обр. 3-9А	Обр. 3-11	
SiO ₂	63,40	58,20	62,30	65,00	62,40	64,10	0,02, %
Al ₂ O ₃	15,70	19,90	15,80	15,80	16,70	16,20	0,05
TiO ₂	0,40	0,39	0,70	0,64	0,68	0,59	0,01
Fe ₂ O ₃ зобщ	6,78	4,78	5,60	4,39	4,83	4,39	0,01
MnO	0,14	0,24	0,11	0,12	0,05	0,09	0,01
MgO	1,88	1,90	2,98	2,33	3,11	2,61	0,10
CaO	6,12	8,32	4,67	2,53	5,12	3,71	0,01
Na ₂ O	2,65	3,15	3,97	3,45	3,81	3,94	0,10
K ₂ O	0,59	0,95	2,40	3,36	1,85	2,50	0,01
P ₂ O ₅	0,11	0,13	0,26	0,21	0,27	0,19	0,05
ппп	2,11	1,53	1,08	2,12	1,00	1,54	0,10
Сумма	99,90	99,60	99,90	99,90	99,90	99,80	
Fe ₂ O ₃	3,74	2,73	2,83	1,54	1,49	1,82	0,30
FeO	2,74	1,85	2,50	2,57	2,91	2,31	0,25
Fe ₂ O ₃ /FeO	1,36	1,48	1,13	0,60	0,51	0,79	
K ₂ O+Na ₂ O	3,24	4,10	6,37	6,81	5,66	6,44	
K ₂ O/Na ₂ O	0,22	0,30	0,60	0,97	0,49	0,63	
Sc, г/т	7,2	9,9	7,8	10,0	6,9	4,4	0,2, г/т
V	94	98	120	96	110	100	2,5
Cr	20	3,4	48	28	45	28	1,0
Ni	16	14	25	40	36	27	1,0
Co	6,2	6,5	10,0	18,0	12,0	8,4	0,5
Pd	0,02	0,028	0,037	0,030	0,048	0,041	0,002
Pt	0,003	<0,002	0,0092	0,013	0,012	0,0035	0,002
Au	0,030	0,004	0,0083	0,0085	0,0063	0,002	0,002
Ag	0,63	0,12	0,026	0,093	0,12	0,04	0,01
Cu	1280	83	19	82	63	9	1,0
Pb	7,0	28	11	14	4,2	7,8	1,0
Zn	84	129	54	71	23	40	1,0
As	н.о.	н.о.	2,8	1,6	1,6	1,3	0,5
Sb	0,57	0,84	0,28	1,72	0,17	0,58	0,1
Re	0,0083	<0,005	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,005
Bi	<0,1	0,20	0,14	<0,1	0,18	0,47	0,1
Rb	16	18	65	124	75	58	2,0
Cs	н.о.	н.о.	1,3	2,8	3,0	1,6	0,1
Ba	190	260	650	930	560	770	50
Sr	265	426	724	636	870	818	1,0
Zr	56	82	131	142	119	136	0,5
Hf	1,60	2,20	3,29	3,82	2,88	3,48	0,01
Ta	0,4	0,5	0,6	0,8	0,6	0,5	0,1
Nb	3,2	4,1	9,7	10,4	8,5	8,4	0,5
Th	2,2	3,1	7,8	12,7	6,8	8,4	0,1

Оксиды, малые элементы, %	Малмыж		Гион				Предел обнаружения
	Кварцевый диорит	Диорит	Кварцевый диорит-порфир	Гранодиорит-порфир	Кварцевый диорит-порфир	Гранодиорит-порфир	
	Обр. ИМ-288	Обр. ИМ-2017 DEL	Обр. 2-2	Обр. 3-4	Обр. 3-9А	Обр. 3-11	
U	0,6	0,9	1,9	2,6	1,6	1,8	0,1
Mo	2,9	<0,6	0,7	0,6	1,5	1,3	0,6
W	0,6	0,6	0,8	1,4	6,8	0,6	0,5
Sn	1,0	0,8	0,9	1,0	1,6	0,8	0,2
Be	<1,0	<1,0	1,6	1,1	1,3	1,5	1,0
Sr/Y	20	29	67	46	42	61	
Y	13,2	14,9	13,0	20,4	10,6	11,2	0,1
La	9,99	12,00	27,20	39,30	29,10	28,70	0,01
Ce	20,10	26,40	52,60	67,10	56,20	53,00	0,01
Pr	2,38	3,26	5,88	8,98	6,32	5,90	0,01
Nd	9,80	13,00	21,40	30,40	22,00	20,60	0,01
LREE	42,27	54,66	107,08	145,78	113,62	108,20	
Sm	2,05	2,48	3,48	6,15	3,77	3,71	0,005
Eu	0,68	0,81	1,12	1,77	1,16	1,10	0,005
Gd	2,28	2,51	3,63	5,30	3,44	3,15	0,01
Tb	0,37	0,45	0,48	0,81	0,44	0,39	0,005
Dy	2,14	2,36	2,40	4,02	2,18	2,10	0,01
Ho	0,46	0,49	0,44	0,68	0,35	0,36	0,005
MREE	7,98	9,10	11,55	18,73	11,34	10,81	
Er	1,54	1,57	1,19	2,08	1,01	1,08	0,01
Tm	0,27	0,28	0,23	0,33	0,14	0,16	0,005
Yb	1,45	1,62	1,21	1,77	0,81	1,02	0,01
Lu	0,27	0,27	0,16	0,23	0,14	0,15	0,005
HREE	3,53	3,74	2,79	4,41	2,10	2,41	
ΣREE	53,78	67,50	121,42	168,92	127,06	121,42	

Примечание. Малмыж: обр. ИМ-2017Del – равномернозернистый диорит, обр. ИМ-288 – порфировидный кварцевый диорит. Гион: обр. 2-2 – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир, обр. 3-4 – биотитовый гранодиорит-порфир, обр. 3-9А – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир и обр. 3-11 – биотит-роговообманковый гранодиорит-порфир.

стве отмечаются сфалерит, галенит, пирротин, арсенопирит и молибденит. Серебро- и медьсодержащее самородное золото, теллуриды золота и серебра, а также различные минералы серебра и платиноидов присутствуют в руде в виде тонких включений в халькопирите, борните, пирите и магнетите.

В зоне окисления широкое развитие получили гётит, ярозит, гематит, лимонит, куприт, малахит, азурит, самородная медь, халькозин, ковеллин и дигенит, замещающие минералы первичных сульфидных руд.

Это одно из самых крупных золото-медно-порфировых месторождений Российской Федерации. Его запасы (A + B + C₁) составляют 1,3 млрд т руды, в том числе 6,18 млн т меди и 273 т золота

при средних содержаниях этих металлов в рудах – 0,35 % и 0,20 г/т соответственно. К 2023 г. Русская медная компания (РМК) планирует построить на месторождении горно-обогатительный комбинат мощностью переработки 56 млн т руды в год. Оператором освоения месторождения является ООО «Амур Минералс», которое входит в Группу РМК [с сайта – <https://amurminerals.ru/>].

Рудные образования Малмыжского месторождения всесторонне изучены с использованием самых современных аналитических методов и технологий [1; 4; 7; 15; 22; 44; 53].

Результаты изотопно-геохронологических исследований. Для определения радиологического возраста магматических образований Мал-

мыжского рудного поля в ЦИИ ВСЕГЕИ локальным U-Pb методом было изучено два представительных образца под номерами ИМ-288 и ИМ-2017Del, характеризующих гранитоиды северо-восточной части Боккинского массива в пределах Северного рудоносного участка [10; 44].

Обр. ИМ-288 отобран из керна скв. 081 с глубины 288 м. Он представляет собой среднекристаллический биотит-роговообманковый порфиоровидный кварцевый диорит. Порода состоит на 10–15 % из кварца, на 35–40 % – основного плагиоклаза (андезина), на 15–20 % – биотита и роговой обманки и на 20–25 % – новообразованных минералов стадии пропилитизации–березитизации. Темноцветные минералы исходной породы, биотит и роговая обманка практически полностью замещены агрегатными псевдоморфозами хлорит-карбонатного и хлорит-эпидотового составов, к которым нередко приурочены микровключения пирита, халькопирита и магнетита. Идиоморфные кристаллы андезина серицитизированы. Порода незначительно минерализована за счет проявления коротко-прожилковых обособлений и вкрапленности пирит-халькопиритового и магнетит-халькопирит-пиритового состава, что сказалось на повышенных содержаниях некоторых элементов – меди, серебра и др. (табл. 1).

Обр. ИМ-2017Del отобран из элювиально-делювиальных глыбовых развалов гранитоидов северо-восточной части Боккинского массива. По данным микроскопического изучения прозрачно-полированных шлифов, образец представляет собой среднекристаллический равномерно-зернистый биотит-роговообманковый клинопироксенсодержащий диорит, состоящий на 5–10 % из кварца, на 45–50 % – основного плагиоклаза (андезина), на 15–20 % – биотита и роговой обманки, на 2–5 % – клинопироксена и на 10–15 % – новообразованных минералов стадии пропилитизации. Как и в предыдущем случае, темноцветные минералы породы (особенно биотит) псевдоморфно замещены хлоритом, эпидотом, пренитом и кальцитом. Плагиоклаз же подвержен слабой серицитизации и карбонатизации.

В процессе изотопно-геохронологических исследований изучались монофракции акцессорных цирконов, возраст которых определялся локальным U-Pb методом на вторично-ионном микрозонде SIMS SHRIMP-IIe в ЦИИ ВСЕГЕИ по стандартной методике [48; 56].

Как было показано в наших более ранних публикациях [10; 44], радиологический U-Pb возраст магматической кристаллизации пород северо-восточного фланга Малмыжского рудного поля находится в интервале **97–99 млн лет**, что не противоречит результатам, полученным ранее Д. С. Бухановой [1].

При этом порфиоровидные биотит-роговообманковые кварцевые диориты (обр. ИМ-288) имеют радиологический возраст в $97,2 \pm 1,1$ млн лет, а равномернозернистые биотит-роговообманковые клинопироксенсодержащие диориты (обр. ИМ-2017Del) – $99,4 \pm 1,3$ млн лет.

Наряду с автохтонными кристаллами цирконов в магматических породах Малмыжского рудного поля также были выявлены и захваченные аллохтонные (ксеногенные) кристаллы цирконов, характеризующие процесс контаминации гранитоидного расплава веществом вмещающих терригенных и туфогенных пород нижнего мела. Морфологически эти аллохтонные цирконы представляют собой «окатанные» короткопризматические кристаллы, чаще – обломки неправильной формы с темными включениями.

Большинство аллохтонных (ксеногенных) цирконов из диоритов и кварцевых диоритов Малмыжского рудного поля имеет возраст 120–130 млн лет, что соответствует возрасту вмещающих туфогенно-терригенных пород Ларгасинской свиты нижнего мела.

В табл. 1 приводится подробная петрохимическая и геохимическая характеристика изученных образцов магматических пород рудных полей Малмыж (участок Северный) и Гион.

Рудное поле Гион. Потенциальное рудное поле Гион расположено в междуречье Амура и его правого притока – р. Манома, в 50 км к югу от месторождения Малмыж. В геоморфологическом отношении территория рудного поля представляет собой цепь невысоких холмов с абс. отм. от 300 до 475 м, образующих узкую гряду (или хребет) шириной от 4 до 8 км, вытянутую в северо-восточном направлении более чем на 40 км.

В геологическом строении рудного поля принимают участие турбидитовые терригенные и вулканогенно-терригенные отложения Ларгасинской и Уктурской свит раннемелового возраста, представленные мощной пачкой переслаивания алевролитов, песчаников, гравелитов и конгломератов. В составе пачки выделяются маломощные горизонты туффитов, туфов и лав андезитового и андезит-дацитового состава (рис. 8).

Весь этот комплекс раннемеловых вулканогенно-терригенных пород в различных частях рассматриваемой территории прорван гранитоидами Нижнеамурского интрузивного комплекса. На хр. Гион закартировано несколько небольших по размерам штокообразных интрузивных тел неправильной формы.

Судя по характеру положительной магнитной аномалии (рис. 5), все выходы гранитоидов принадлежат к одному крупному интрузиву линейного типа, вытянутому в северо-восточном направлении более чем на 40 км и обнажающемуся на современном уровне эрозионного среза в виде серии небольших по размерам штокообразных массивов. Наиболее крупный из них, расположенный в районе перевала Гольдского (рис. 8), занимает площадь около 16 км², остальные – не более 2–4 км². В верхних частях Гольдского массива – на водоразделах и склонах – установлены выходы кварцевых диорит-порфиров и гранодиорит-порфиров, а в уречах ручьев, вниз по рельефу в сторону долины р. Манома получили развитие полнокристаллические порфиоровидные

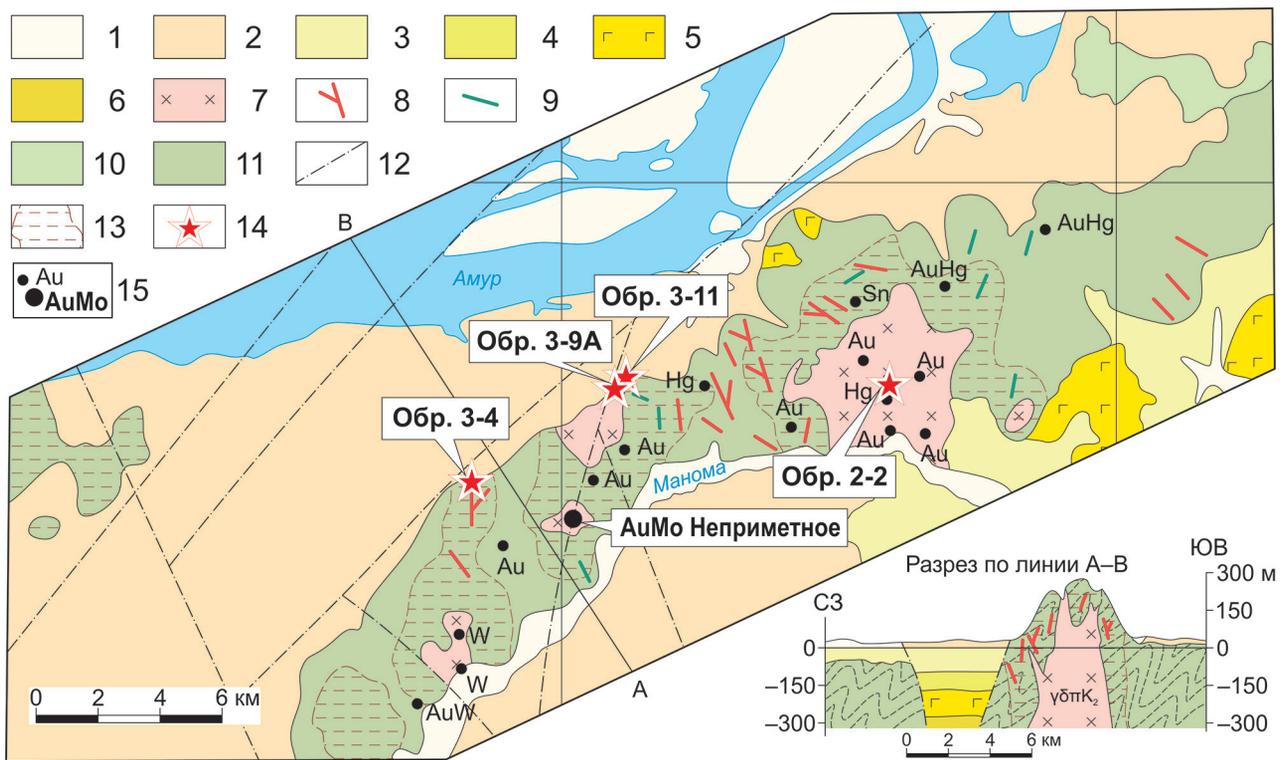


Рис. 8. Схема геологического строения потенциального рудного поля Гион

1–2 – четвертичные отложения (1 – верхнечетвертичные отложения: речные аллювиальные и делювиальные отложения русел, поймы и надпойменных террас, 2 – нижне- и среднечетвертичные отложения: пески, галечники, суглинки, супеси, алевриты, глины с редкой галькой и гравием); 3–6 – неогеновые образования (3 – плиоцен: Приамурская свита – пески, гравийники, галечники, глины, 4–6 – миоцен: 4 – Головинская свита – глины, алевриты, пески (на разрезе), 5 – Кизинская свита – покровы базальтов, 6 – Ушумунская свита – глины, алевриты, пески, прослой углей (на разрезе); 7–9 – магматические образования позднемиоценового Нижнеамурского интрузивного комплекса (7 – диорит-порфиры, кварцевые диорит-порфиры и гранодиорит-порфиры, 8 – дайки кварцевых диорит-порфиров и гранодиорит-порфиров, 9 – дайки габбродиоритов и диорит-порфиров); 10–11 – нижнемеловые терригенные и туфогенно-терригенные отложения (10 – Ларгасинская свита – песчаники, конгломераты, гравелиты, алевролиты, 11 – Уктурская свита, верхняя подсвита: песчаники, алевролиты, конгломераты, гравелиты, туфы и лавы андезитов); 12 – тектонические нарушения (установленные и предполагаемые); 13 – участки проявления интенсивных гидротермально-метасоматических изменений пород (окварцевание, сульфидизация, биотитизация, эпидотизация, хлоритизация, серицитизация и др.); 14 – места отбора образцов на изотопно-геохронологические и изотопно-геохимические исследования; 15 – проявления рудной минерализации (рудопоявления и пункты минерализации)

гранодиориты и кварцевые диориты. Нередко в этом интрузиве можно наблюдать небольшие (до 0,5 км²) останцы вмещающих осадочных пород.

На хр. Гион с коренными выходами гранитоидов ассоциируют многочисленные дайки гранодиорит-порфиров, кварцевых диорит-порфиров и диоритовых порфиров. Мощность даек варьирует от 1 м до первых десятков метров. Их простирание преимущественно северо-западное и субмеридиональное. Контакты дайковых тел крутые, иногда с апофизами во вмещающие породы.

На контакте гранитоидов с вмещающими вулканогенно-терригенными породами, последние несут отчетливые признаки интенсивного ороговирования, выраженного в виде разнообразных минеральных парагенезисов биотитового, кварц-биотитового, кварц-полевошпат-биотитового, кварц-биотит-кордиеритового, кварц-серицит-биотитового и кварц-амфибол-биотитового состава (рис. 9). При этом кварц-биотитовые и биотитовые разности роговиков заметно преобладают над остальными. Интенсивность биотитизации зависит от двух факторов: 1) от расстояния до контакта с гра-

нитоидами и 2) от состава вмещающих пород. Наиболее сильно ей подвержены субаркозовые песчаники, алевропесчаники и алевролиты, а также эффузивные породы среднего состава. В узких приконтактных зонах получили развитие кварц-полевошпат-биотитовые и пятнистые кварц-биотит-кордиеритовые роговики, которые во все стороны от контакта с гранитоидами постепенно сменяются обширными площадными ореолами биотитизации, размеры которых нередко достигают первых десятков км² (рис. 8).

Среди этих площадных ореолов ороговирования и биотитизации установлены многочисленные более локальные по размерам участки пропилитизации и березитизации, контролирующее размещение в пространстве зон штокверкового окварцевания линейного и ареального типов, несущих прожилково-вкрапленную сульфидную (пирит, пирротин, халькопирит, молибденит и т. д.) минерализацию (рис. 9). Именно к таким участкам и приурочены небольшие (площадью около 1 км²) шлиховые ореолы со знаковым содержанием золота. Судя по величине обломков кварца в делювии

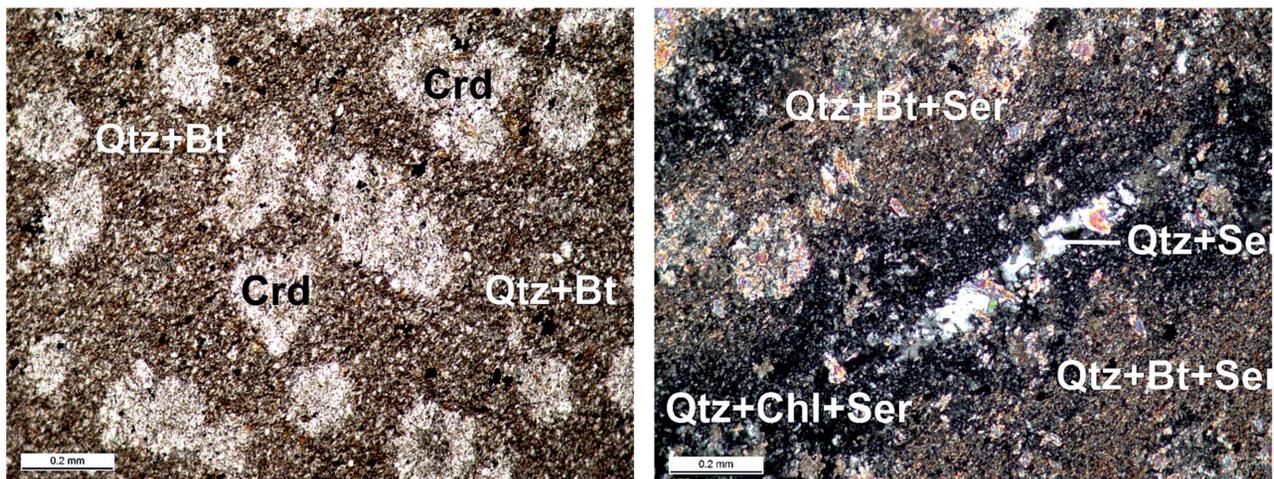


Рис. 9. Микрофотографии прозрачно-полированных шлифов, характеризующих особенности проявления гидротермально-метасоматических изменений в алевролитах ларгасинской свиты

Слева – общий вид кварц-биотит-кордиеритовых роговиков, получивших развитие по алевролитам Ларгасинской свиты (Обр. 1-1. ув. $\times 10$, николи =).

Справа – характер проявления процесса березитизации в орговикованных алевролитах Ларгасинской свиты. Кварц-серицитовые прожилки секут мелкокристаллические агрегаты кварц-биотит-кордиеритовых роговиков. При этом, вдоль прожилков, симметрично с обеих сторон, получили развитие метасоматические «оторочки» кварц-серицит-хлоритового и кварц-хлоритового составов, а метакристаллы кордиерита в кварц-биотитовом матриксе роговиков повсеместно замещаются агрегатными псевдоморфозами кварц-серицитового и хлорит-хлорит-серицитового состава (Обр. 1-1. ув. $\times 10$, николи +).

Здесь и далее, на рис. 11: Qtz – кварц, Chl – хлорит, Ser – серицит, Ep – эпидот, Pl – плагиоклаз, Hb – роговая обманка, Bt – биотит, Kfs – калиевый полевой шпат, Crd – кордиерит

и аллювии, в пределах таких зон жильно-штокерного окварцевания и локализуется основная масса кварцевых жил мощностью до первых десятков см. Кварц в них серый, сахаровидно-белый, массивного сложения, трещиноватый, содержащий густую вкрапленность пирита и других сульфидов. Наиболее широко такие кварцевые жилы распространены в эндо- и экзоконтактах большинства обнажающихся массивов гранитоидов, а также в пределах рудопроявления Неприметное.

Рудопроявление *Неприметное* приурочено к минерализованным гранитоидам Нижнеамурского комплекса, которыми сложен небольшой (около 2 км²) изометричный по форме куполовидный интрузив в центральной части рудного поля. Гранитоиды здесь прорывают терригенные отложения Уктурской свиты, представленные сильно ороговикованными субаркозовыми и полимиктовыми песчаниками, реже алевропесчаниками и алевролитами.

Вблизи контакта с вмещающими породами гранодиорит-порфиры интенсивно пропицитизированы, березитизированы и пиритизированы. В центральной части участка проходит крупное разрывное нарушение северо-восточного простирания. Здесь наблюдается наибольшее количество обломков и глыб кварца, а также повышенные содержания золота и киновари в делювиальных развалах пород. В кварце установлены скопления крупных (до 3–5 мм) кристаллов пирита, галенита, халькопирита и чешуек молибденита. Из-за плохой обнаженности в коренном залегании жилы кварца не вскрыты. Рудные минералы на участке рудо-

проявления представлены золотом, халькопиритом, базовисмутитом, молибденитом и шеелитом. Вкрапленность этих минералов выявлена главным образом в кварцевых жилах и прожилках, реже в минерализованных гранодиорит-порфирах и зеленовато-серых кварцитах по роговикам. Золото в этих пиритизированных породах отмечается спорадически с содержаниями, достигающими величин в 0,1–1,0 г/т. Содержания молибдена нередко поднимаются до значений 0,1–0,2 %. Тогда как концентрации меди, свинца и цинка варьируют от 0,05 до 0,4 %, а вольфрама и висмута – от 0,005 до 0,06 %. В отдельных шлиховых пробах из шурфов, пройденных в долине ручья, установлены единичные знаки золота, киновари и до 10–15 знаков базовисмутита. В таких же количествах эти минералы отмечаются и в шлиховых пробах из делювия. Металлометрическим опробованием установлены ореолы повышенных содержаний золота (0,01–0,03 г/т), тяготеющие к разрывному нарушению северо-восточного простирания. В пределах этого же нарушения локализован вторичный ореол рассеяния молибдена с содержанием 0,001–0,004 %.

Проведенные авторами данной статьи в 2021 г. полевые работы с пробоотбором и последующей лабораторно-аналитической обработкой представительного каменного материала позволили получить новые данные, касающиеся минералого-петрографических, петрогеохимических, изотопно-геохронологических и изотопно-геохимических особенностей гранитоидов и вмещающих их вулканогенно-терригенных пород раннемелового

возраста, участвующих в строении потенциально-рудного поля Гион.

Всего в ходе полевых работ было отобрано 46 штучных геохимических проб, сколков для изготовления прозрачно-полированных шлифов и образцов горных пород, включая четыре представительных образца гранитоидов весом 3–4 кг каждый для проведения изотопно-геохронологических и изотопно-геохимических исследований в ЦИИ ВСЕГЕИ (рис. 8). Определение петрогенных и малых элементов осуществлялось в ЦЛ ВСЕГЕИ

методами ICP-MS, атомной абсорбции и рентгено-спектрального флюоресцентного анализа (см. пределы обнаружения элементов в табл. 1).

В табл. 2 приводится развернутая петрохимическая и геохимическая характеристика в различной степени гидротермально измененных пород рудного поля Гион, представленных обширными ореолами орговикования, пропилитизации и березитизации, обусловленными процессом внедрения и длительного становления гранитоидного плутона Гион (рис. 8).

Таблица 2

Петрохимические и геохимические особенности в различной степени гидротермально измененных пород рудного поля Гион

Оксиды, малые элементы, %	Орговикование		Пропилитизация		Березитизация			
	по алевролитам		по андезитах и андезибазальтам		по субаркозовым алевропесчаникам		по гранодиорит-порфирам	
	I–III	VII–IX	I–III	VII–IX	I–III	VII–IX	I–III	VII–IX
SiO ₂	75,23	66,40	54,03	50,73	73,47	75,37	65,10	67,40
Al ₂ O ₃	13,10	16,30	14,73	13,87	13,43	12,57	16,20	16,50
TiO ₂	0,44	0,73	1,07	1,32	0,51	0,48	0,58	0,37
Fe ₂ O ₃ общ	2,76	5,08	8,36	10,02	3,15	2,82	5,28	4,07
MnO	0,04	0,07	0,10	0,23	0,05	0,07	0,08	0,06
MgO	1,01	1,75	7,24	9,49	1,19	0,82	2,19	1,54
CaO	0,57	2,36	6,86	7,63	0,83	1,49	2,02	1,99
Na ₂ O	2,41	2,59	3,06	2,28	2,67	2,25	4,07	3,47
K ₂ O	3,03	3,44	2,07	1,75	2,98	2,87	2,44	2,18
P ₂ O ₅	0,05	0,31	0,41	0,47	0,08	0,05	0,13	0,14
ппп	1,37	0,99	1,94	2,10	1,52	1,18	1,80	2,11
Сумма	99,95	100,00	99,85	99,87	99,87	99,97	99,90	99,80
Fe ₂ O ₃	0,86	0,89	2,50	3,13	1,35	1,10	2,13	2,58
FeO	1,71	3,78	5,29	6,21	1,62	1,55	2,84	1,34
Sc, г/т	4,0	10,6	8,5	10,1	6,5	3,2	6,4	2,7
V	55,0	79,0	175,0	206,7	70,0	59,0	110,0	60,0
Cr	26,5	28,0	127,3	223,3	31,7	31,0	17,0	18,0
Ni	16,0	15,5	70,8	86,0	19,0	16,3	16,0	22,0
Co	8,3	7,1	21,5	19,7	8,1	8,3	8,1	5,2
Pd	0,007	0,014	0,040	0,035	0,009	0,015	0,029	0,030
Pt	0,008	0,030	0,016	0,012	0,026	0,016	0,010	0,005
Au	0,006	0,020	0,018	0,009	0,016	0,021	0,004	0,008
Ag	0,099	0,048	0,108	0,087	0,084	0,324	0,035	0,120
Cu	14,3	15,7	198,9	48,7	15,4	13,7	26,9	70,5
Pb	7,8	13,7	5,6	6,6	10,4	18,0	11,9	148,0
Zn	32,4	64,0	47,0	158,0	31,5	24,3	57,8	249,0
As	8,3	2,8	4,8	3,9	15,1	5,5	2,7	11,4
Sb	0,4	0,2	0,31	0,44	0,4	0,6	0,2	0,2
Bi	0,7	0,2	0,25	0,41	0,3	0,6	0,1	0,2
Cd	0,1	0,1	0,13	0,21	0,1	0,1	0,1	0,1
Te	0,6	0,2	0,40	0,20	0,3	0,3	0,2	0,2
Li	10,0	10,0	10,0	10,0	12,3	10,0	10,0	17,0
Rb	104,2	144,5	79,9	49,5	100,6	90,3	73,1	37,9
Cs	3,5	8,0	4,5	0,9	3,9	2,7	2,9	0,8
Ba	640,0	545,0	570,0	466,7	646,7	656,7	670,0	790,0

Оксиды, малые элементы, %	Ороговикование		Пропилитизация		Березитизация			
	по алевролитам		по андезитах и андезибазальтам		по субаркозовым алевропесчаникам		по гранодиорит-порфирам	
	I-III	VII-IX	I-III	VII-IX	I-III	VII-IX	I-III	VII-IX
Sr	192,0	220,0	227,5	160,0	135,0	213,3	130,0	54,0
Zr	204,3	208,5	136,3	130,3	196,3	233,3	123,0	105,0
Hf	5,6	5,5	3,2	3,3	5,2	6,2	3,1	2,8
Ta	0,7	1,0	0,6	0,7	0,7	0,7	0,5	0,4
Nb	9,0	13,5	10,5	11,7	9,1	8,9	7,2	5,6
Th	8,6	11,5	7,7	7,0	8,8	6,9	7,7	6,7
U	2,1	2,4	1,6	1,4	2,0	1,9	1,5	1,9
Mo	1,0	1,0	0,8	0,6	1,4	0,6	0,6	1,2
W	1,3	2,7	1,6	1,4	2,1	2,0	0,6	1,4
Sn	2,1	1,7	2,6	1,6	2,2	6,3	0,8	1,1
Be	1,6	0,8	1,3	0,9	1,6	1,7	1,1	1,8
Y	16,1	28,9	15,9	17,4	16,8	15,9	11,0	9,7
La	24,28	33,90	33,70	32,57	25,13	18,74	23,60	22,60
Ce	51,33	71,75	69,38	65,50	52,17	39,83	47,00	36,80
Pr	5,78	8,18	8,31	8,09	5,96	4,70	5,35	4,31
Nd	20,25	29,55	29,63	30,53	20,33	16,71	18,40	13,90
LREE	101,6	143,4	141,0	136,7	103,6	79,9	94,4	77,6
Sm	4,11	6,49	6,01	6,17	3,99	3,33	3,65	2,88
Eu	0,76	1,25	1,59	1,69	0,75	0,81	0,95	0,74
Gd	3,46	5,93	4,98	5,21	3,32	3,04	3,02	2,38
Tb	0,53	0,91	0,64	0,73	0,50	0,48	0,45	0,34
Dy	2,82	4,83	3,09	3,48	2,95	2,72	2,12	1,69
Ho	0,54	0,93	0,53	0,63	0,56	0,54	0,45	0,29
MREE	12,2	20,3	16,8	17,9	12,1	10,9	10,6	8,3
Er	1,67	2,87	1,61	1,70	1,67	1,66	1,16	0,85
Tm	0,27	0,41	0,23	0,24	0,28	0,27	0,17	0,12
Yb	1,79	2,69	1,36	1,59	1,86	1,90	1,14	0,74
Lu	0,25	0,39	0,20	0,21	0,28	0,27	0,17	0,13
HREE	3,98	6,35	3,39	3,73	4,09	4,11	2,64	1,84
ΣREE	117,8	170,1	161,2	158,3	119,8	95,0	107,6	87,8
<i>n</i>	4	2	4	3	3	3	4	4

Примечание. I-IX степень ГМ изменения: I-III – слабая-умеренная (<15 % новообразований), VII-IX – интенсивная-полная (>50 % новообразований); *n* – количество проб.

В табл. 3 суммирована информация о средне-взвешенных значениях коэффициентов привноса-выноса петрогенных и малых элементов в ходе формирования главных типов гидротермально измененных пород рудного поля Гион.

Как показано в табл. 2–3, для ореолов березитизации, получивших развитие как по гранитоидам Нижнеамурского комплекса, так и по ороговикованным субаркозовым алевропесчаникам Уктурской свиты, наиболее характерным является многократный (по сравнению с малоизмененными породами) привнос в среду минералообразования прежде всего таких элементов как свинец, цинк,

мышьяк, серебро, медь, кадмий, висмут, вольфрам, молибден и золото. Тенденцию к выносу испытывает ряд сидерофильных (Sc, V, Co, Ni, Pt) и литофильных (Rb, Cs, Sr, Nb, Th и REE+Y) элементов, тогда как остальные компоненты ведут себя индифферентно.

Для рудного поля Гион геохимическая формула, отражающая уровень концентрации элементов-примесей в ходе развития процесса березитизации по гранитоидам Нижнеамурского комплекса, выглядит следующим образом: $Pb_{+1144} Zn_{+331} As_{+329} Ag_{+243} Cu_{+162} Cd_{+124} W_{+122} Mo_{+100} (Au_{+50} Bi_{+50})$. То есть геохимически они мало чем отличаются от околорудных

Таблица 3

Привнос–вынос петрогенных и малых элементов (ΔC) в ходе формирования главных типов гидротермально измененных пород рудного поля Гион

Оксиды, малые элементы, %	Роговики	Пропилиты	Березиты		Оксиды, малые элементы, %	Роговики	Пропилиты	Березиты	
	по алевролитам	по андезитам и андезибазальтам	по субаркозовым алевропесчаникам	по гранодиорит-порфирам		по алевролитам	по андезитам и андезибазальтам	по субаркозовым алевропесчаникам	по гранодиорит-порфирам
SiO ₂	-12	-6	3	4	Ba	-15	-18	2	18
Al ₂ O ₃	24	-6	-6	2	Sr	15	-30	58	-58
TiO ₂	66	24	-6	-36	Zr	2	-4	19	-15
Fe ₂ O ₃	3	25	-19	21	Hf	-3	2	19	-9
FeO	121	18	-4	-53	Ta	43	19	-3	-13
MnO	84	124	31	-31	Nb	50	11	-2	-22
MgO	73	31	-31	-30	Th	34	-9	-21	-12
CaO	316	11	79	-1	U	14	-14	-9	29
Na ₂ O	7	-25	-16	-15	Mo	3	-33	-56	100
K ₂ O	14	-15	-4	-11	W	104	-11	-2	122
P ₂ O ₅	470	15	-35	8	Sn	-19	-37	186	41
CO ₂ +H ₂ O	-28	8	-23	17	Be	-51	-27	4	64
Sc	168	18	-50	-58	Y	80	10	-5	-12
V	44	18	-16	-45	La	40	-3	-25	-4
Cr	6	76	-2	6	Ce	40	-6	-24	-22
Ni	-3	22	-14	38	Pr	41	-3	-21	-19
Co	-14	-9	2	-36	Nd	46	3	-18	-24
Pd	86	-13	65	3	LREE	41	-3	-23	-18
Pt	291	-27	-40	-45	Sm	58	3	-17	-21
Au	248	-49	28	50	Eu	66	6	8	-22
Ag	-52	-19	284	243	Gd	71	5	-9	-21
Cu	10	-76	-11	162	Tb	71	15	-4	-24
Pb	77	17	73	1144	Dy	71	13	-8	-20
Zn	97	236	-23	331	Ho	71	20	-4	-36
As	-66	-19	-64	329	MREE	66	6	-10	-22
Sb	-45	43	44	-17	Er	72	5	0	-27
Bi	-69	66	132	50	Tm	53	3	-1	-29
Cd	-21	58	25	124	Yb	50	17	2	-35
Te	-66	-50	-16	0	Lu	52	6	-6	-24
Li	0	0	-19	70	HREE	60	10	0	-30
Rb	39	-38	-10	-48	ΣREE	44	-2	-21	-18
Cs	125	-79	-32	-73	n	6	7	6	8

Примечание. Коэффициент привноса–выноса элементов (ΔC) приведен в процентах и рассчитывался по формуле: $\Delta C = (C_i - C) / C \times 100 \%$, где C_i – содержание элемента в интенсивно/полностью измененной породе, C – содержание элемента в минимально измененной породе. Для главных компонентов расчет баланса вещества осуществлялся атомно-объемным методом с учетом плотностных характеристик исходных пород и замещающих их метасоматитов (Казизын, Рудник, 1968); n – общее количество проб в сравниваемых выборках (см. табл. 2).

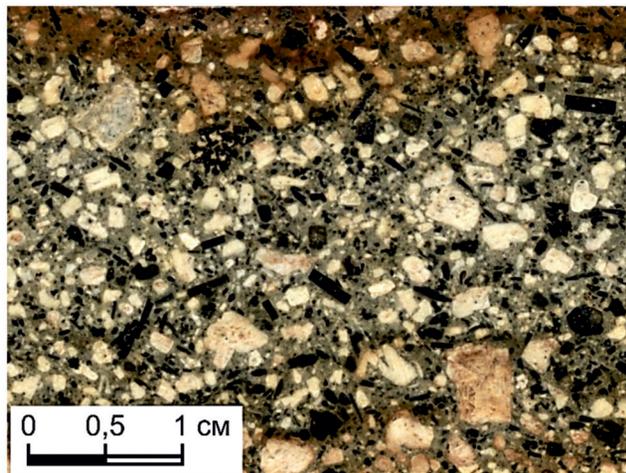
березитов-филлизитов большинства порфировых месторождений России и стран СНГ (Малмыж, Песчанка, Аксуг, Михеевское, Томинское, Актогай, Бошекуль, Медный Коунрад, Коксай и др.).

Пропилиты, роговики и биотититы, как «под-рудные» ГМ-образования, имеют принципиально иную геохимическую специализацию. Из числа рассеянных элементов тенденцию к накоплению в пропилитах-роговиках, развитых по терригенным

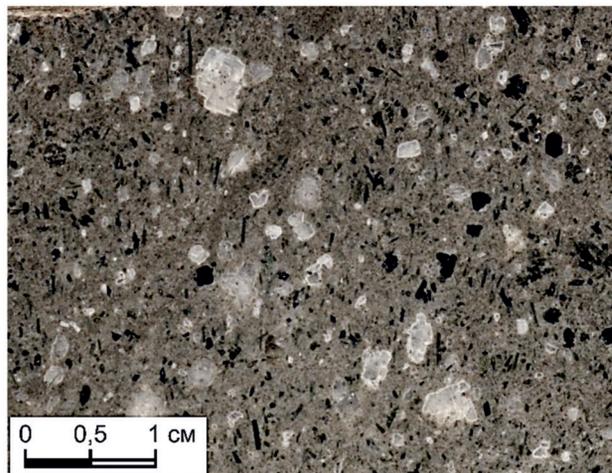
и вулканогенным породам нижнего мела, испытывают прежде всего сидерофильные (Cr, Ni, V, Sc, Pd, Pt), а также ряд халькофильных (Au, Pb, Zn) и литофильных (Rb, Cs, Nb, W, REE+Y) элементов.

Результаты изотопно-геохронологических исследований. Для определения радиологического возраста магматических образований потенциального рудного поля Гион локальным U-Pb

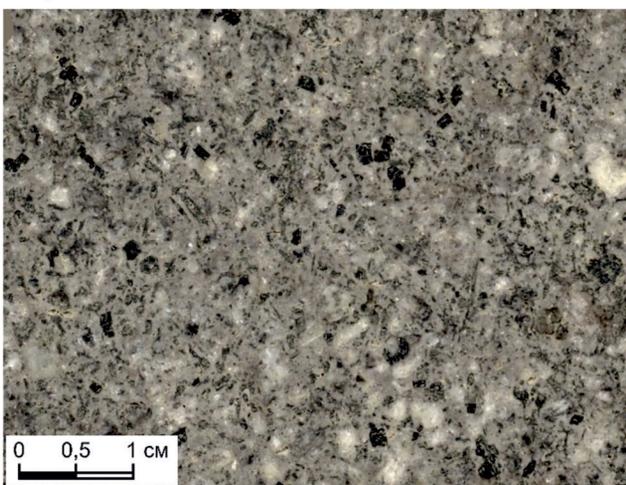
Обр. 2-2



Обр. 3-9А



Обр. 3-4



Обр. 3-11

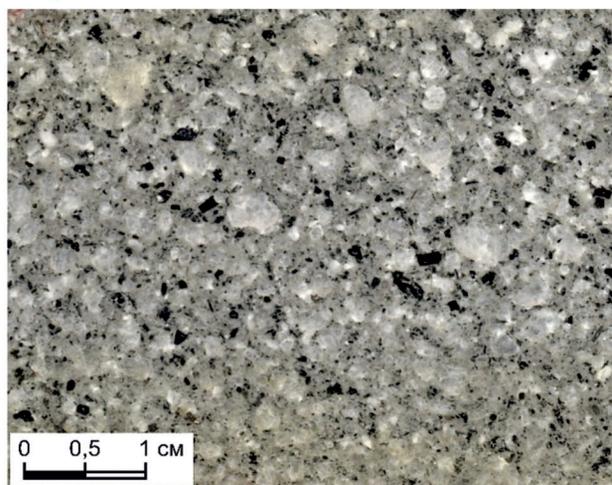


Рис. 10. Фотографии изученных образцов магматических пород рудного поля Гион

Образцы: 2-2 – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир, 3-4 – биотитовый гранодиорит-порфир, 3-9А – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир, 3-11 – биотит-роговообманковый гранодиорит-порфир

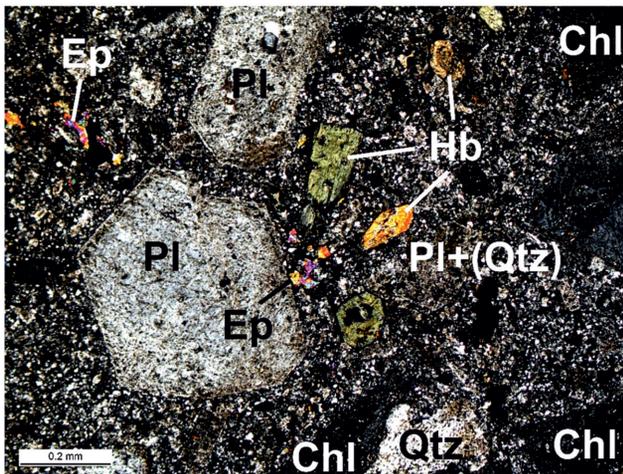
методом в ЦИИ ВСЕГЕИ было изучено четыре представительных образца под номерами 2-2, 3-4, 3-9А и 3-11, характеризующих гранитоидные образования из центральной и северной частей района работ (рис. 10, 11).

Обр. 2-2 отобран из крупноглыбовых однородных по составу элювиально-делювиальных развалов, слагающих восточный борт руч. Гольдский (рис. 8). Образец представляет собой средне-мелкокристаллический биотит-роговообманковый *кварцевый диорит-порфир*. Порода состоит на 45–55 % из порфириковых выделений плагиоклаза (андезина и олигоклаза), роговой обманки и биотита, среди которых плагиоклаз заметно превалирует над темноцветными минералами. Основная масса породы сложена кварцем (10–15 %), андезином (15–20 %), биотитом и роговой обманкой (5–10 %), а также новообразованными минералами стадии пропилитизации – 5–10 % (эпидот, хлорит, пренит, альбит). Биотит практически полностью замещен агрегатными псевдоморфозами хлорит-эпидотового и хлорит-прени-

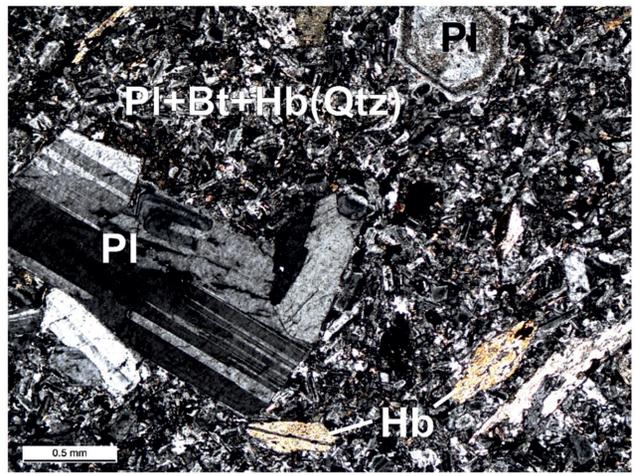
тового составов, к которым нередко приурочены микровключения пирита и магнетита. Порфириковые вкрапленники андезина в незначительной степени альбитизированы и серицитизированы.

Обр. 3-4 отобран из коренных выходов гранитоидов, слагающих небольшое по размерам интрузивное тело, вскрытое крутым уступом-расчисткой строящегося газопровода в северо-западной части рудного поля. По данным микроскопического изучения прозрачно-полированных шлифов образец представляет собой средне-мелкокристаллический биотит-роговообманковый *гранодиорит-порфир*, состоящий на 15–20 % из кварца, на 40–45 % – плагиоклаза (олигоклаза), на 15–20 % – биотита и роговой обманки и на 5–10 % – новообразованных минералов стадии пропилитизации (эпидот, хлорит, серицит, карбонат). Как и в предыдущем случае, на долю порфириковых выделений в составе породы приходится не менее 40–45 % от их объема. Однако здесь, в отличие от предыдущего образца, в составе фенокристаллов темноцветные минералы (биотит и роговая обманка) и анде-

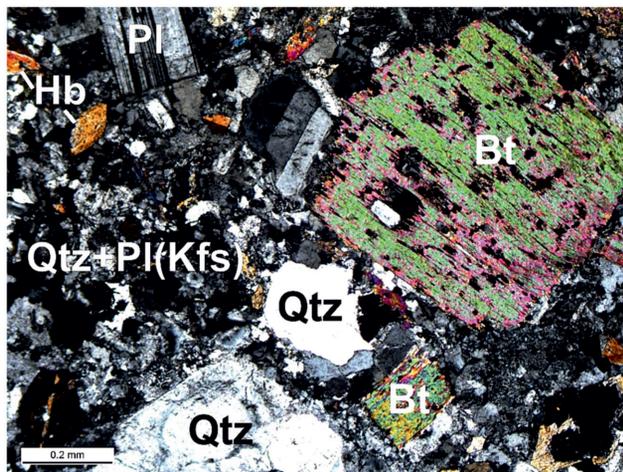
Обр. 2-2



Обр. 3-9A



Обр. 3-4



Обр. 3-11

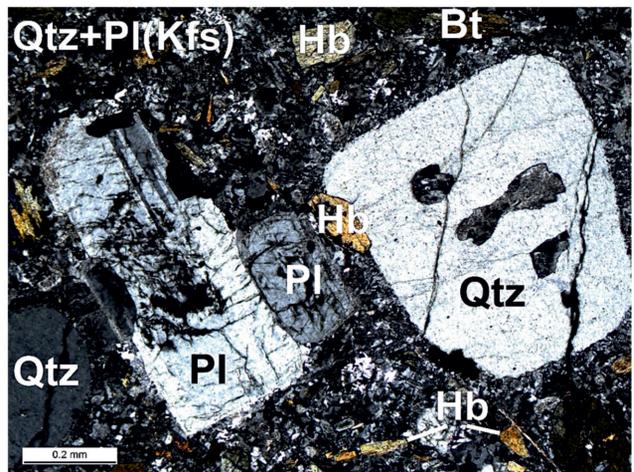


Рис. 11. Микрофотографии прозрачно-полированных шлифов (ППШ), характеризующих общий вид и особенности внутреннего строения изученных образцов магматических пород рудного поля Гион

ППШ: 2-2 – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир (ув. $\times 10$, николи +), 3-4 – биотитовый гранодиорит-порфир (ув. $\times 10$, николи +), 3-9A – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир (ув. $\times 4$, николи +), 3-11 – биотит-роговообманковый гранодиорит-порфир (ув. $\times 10$, николи +)

зин-олигоклаз находятся в примерно равных пропорциях.

Обр. 3-9A и 3-11 отобраны из коренных выходов гранитоидов, слагающих овальное по форме интрузивное тело размером 4 км² в северной части рудного поля, где оно, как и в предыдущем случае, вскрыто стенкой уступа строящегося газопровода.

Обр. 3-9A представляет собой средне-мелкокристаллический биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир. Порода состоит на 35–40 % из порфировых вкрапленников плагиоклаза (андезина), роговой обманки и, в меньшей степени, биотита, среди которых плагиоклаз заметно преобладает над темноцветными минералами. Мелкокристаллическая основная масса породы сложена кварцем (5–15 %), андезином (15–20 %) и роговой обманкой (5–10 %), а также новообразованными минералами стадии пропилитизации – 2–5 % (эпидот, хлорит, альбит).

По данным микроскопического изучения шлифов, обр. 3-11 представляет собой средне-мелко-

кристаллический биотит-роговообманковый *гранодиорит-порфир*, состоящий на 15–25 % из кварца, на 40–45 % – плагиоклаза (олигоклаза–андезина), на 15–20 % – биотита и роговой обманки и на 5–10 % – новообразованных минералов стадии пропилитизации и березитизации (кварц, хлорит, серицит, карбонат, пирит, халькопирит). Как и в случае с вышеописанными образцами, здесь на долю порфировых выделений в составе породы также приходится не менее 40–45 % от их объема с примерно близким количественным соотношением между кварц-плагиоклазовой и темноцветной составляющими. Из числа изученных образцов обр. 3-11 является единственным, в составе которого была выявлена густая вкрапленность мелкокристаллического пирита объемом до 1,5 % с редкими микровключениями халькопирита, обусловленная проявлением в породе березитовых новообразований кварц-серицит-карбонат-хлоритового состава.

Всего в ЦИИ ВСЕГЕИ на вторично-ионном микрозонде SIMS SHRIMP-IIe было выполнено

Результаты изучения U-Pb изотопной системы аксессуарных цирконов из интрузивных пород рудного поля Гион

№ п/п	Образец, зерно, кратер	²⁰⁶ Pb _c , %	Содержание, г/г			²³² Th/ ²³⁸ U	Возраст (1), млн лет			Изотопные отношения (1)					КК
			U	Th	²⁰⁶ Pb*		²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	± %	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	± %			
Обр. 2-2															
1	1,1	1,21	804	730	8,34	0,94	76,68	± 0,91	0,0507	6,7	0,0837	6,8	0,01197	1,2	0,176
2	2,1	0,44	771	753	8,11	1,01	78,04	± 0,92	0,0466	6,3	0,0783	6,4	0,01218	1,2	0,187
3	3,1	0,48	699	683	7,54	1,01	79,92	± 0,96	0,0466	6,7	0,0802	6,8	0,01247	1,2	0,178
4	4,1	1,12	517	336	5,40	0,67	77,3	± 1,0	0,0498	9,3	0,0828	9,4	0,01206	1,3	0,141
5	5,1	1,21	446	349	4,64	0,81	76,7	± 1,1	0,0492	10,0	0,0812	10,0	0,01198	1,4	0,136
6	6,1	1,49	388	216	4,13	0,58	78,5	± 1,1	0,0504	11,0	0,0852	11,0	0,01226	1,5	0,129
7	7,1	0,60	608	496	6,11	0,84	74,31	± 0,94	0,0463	8,3	0,0739	8,4	0,01159	1,3	0,151
8	8,1	1,06	676	559	6,84	0,85	74,94	± 0,93	0,0503	7,2	0,0811	7,3	0,01169	1,3	0,171
9	9,1	1,16	499	359	5,23	0,74	77,5	± 1,0	0,0496	9,3	0,0826	9,4	0,01210	1,4	0,144
10	10,1	1,27	299	147	4,49	0,51	110,6	± 1,6	0,0513	8,9	0,1220	9,0	0,01730	1,4	0,157
11	11,1	1,23	501	378	5,15	0,78	75,9	± 1,0	0,0501	9,0	0,0818	9,1	0,01184	1,3	0,147
12	12,1	0,67	522	100	5,50	0,20	77,9	± 1,0	0,0460	9,9	0,0771	10,0	0,01216	1,3	0,134
13	13,1	0,29	795	890	8,37	1,16	78,12	± 0,93	0,0454	6,5	0,0763	6,6	0,01219	1,2	0,181
14	14,1	0,70	535	273	5,32	0,53	73,85	± 0,99	0,0497	5,9	0,0789	6,0	0,01152	1,3	0,223
Обр. 3-4															
15	1,1	0,21	927	533	9,98	0,59	80,1	± 1,1	0,0483	3,7	0,0834	3,9	0,01251	1,3	0,344
16	2,1	0,36	507	268	5,53	0,55	81,0	± 1,2	0,0472	5,6	0,0823	5,8	0,01264	1,4	0,248
17	3,1	0,26	697	427	7,65	0,63	81,6	± 1,1	0,0466	4,4	0,0818	4,6	0,01273	1,3	0,288
18	4,1	0,32	573	379	6,34	0,68	82,2	± 1,1	0,0485	5,0	0,0858	5,2	0,01284	1,4	0,266
19	5,1	0,18	618	312	6,65	0,52	80,2	± 1,1	0,0471	5,6	0,0813	5,7	0,01251	1,4	0,238
20	6,1	0,32	602	285	6,52	0,49	80,6	± 1,1	0,046	5,2	0,0798	5,4	0,01259	1,4	0,256
21	7,1	0,16	1022	905	11,10	0,92	80,7	± 1,0	0,0504	3,0	0,0875	3,3	0,01259	1,3	0,387
22	8,1	0,27	707	584	7,87	0,85	82,7	± 1,1	0,0449	5,4	0,0800	5,5	0,01292	1,3	0,241
23	9,1	0,41	478	222	5,19	0,48	80,7	± 1,2	0,0459	6,4	0,0797	6,5	0,0126	1,5	0,226
24	10,1	0,30	510	406	5,52	0,82	80,4	± 1,2	0,0481	4,9	0,0832	5,1	0,01256	1,4	0,284
25	11,1	0,19	830	612	8,84	0,76	79,3	± 1,0	0,0463	3,6	0,0791	3,8	0,01238	1,3	0,340
26	12,1	0,41	479	255	5,21	0,55	80,9	± 1,2	0,0474	6,4	0,0825	6,6	0,01263	1,5	0,224
27	13,1	0,001	422	273	4,65	0,67	82,2	± 1,2	0,0485	4,0	0,0858	4,2	0,01283	1,5	0,350
28	14,1	0,41	768	499	8,45	0,67	81,7	± 1,1	0,0458	5,2	0,0806	5,3	0,01275	1,3	0,248
29	15,1	0,24	770	589	8,43	0,79	81,5	± 1,1	0,0474	4,1	0,0831	4,3	0,01272	1,3	0,303
Обр. 3-9A															
30	1,1	2,34	447	336	4,99	0,78	81,7	± 1,2	0,0525	12,0	0,0920	12,0	0,01276	1,4	0,124
31	2,1	1,37	637	630	7,08	1,02	81,9	± 1,5	0,0487	8,9	0,0859	9,1	0,01279	1,9	0,208
32	3,1	1,05	739	757	7,98	1,06	80,02	± 0,94	0,0516	6,1	0,0889	6,2	0,01249	1,2	0,191
33	5,1	0,85	567	382	5,99	0,70	78,31	± 0,98	0,0493	6,8	0,0831	6,9	0,01222	1,3	0,183
34	6,1	0,68	858	588	9,47	0,71	81,68	± 0,94	0,0464	6,4	0,0816	6,5	0,01275	1,2	0,178
35	7,1	1,72	321	256	3,43	0,82	78,6	± 1,3	0,0510	16,0	0,0860	16,0	0,01227	1,6	0,102
36	8,1	0,65	519	358	5,57	0,71	79,4	± 1,0	0,0462	9,1	0,0789	9,2	0,01239	1,3	0,143
37	9,1	1,02	692	603	7,12	0,90	76,05	± 0,93	0,0482	8,1	0,0789	8,1	0,01187	1,2	0,152
38	10,1	0,39	346	172	15,40	0,51	325,0	± 3,7	0,0527	3,4	0,3760	3,6	0,05170	1,2	0,325
39	11,1	1,10	349	165	3,71	0,49	78,3	± 1,2	0,0461	14,0	0,0780	14,0	0,01221	1,5	0,111
40	12,1	0,76	477	307	4,99	0,66	77,3	± 1,0	0,0464	9,8	0,0772	9,9	0,01206	1,4	0,136
41	13,1	0,21	1191	1489	12,20	1,29	76,33	± 0,84	0,0461	4,6	0,0757	4,7	0,01191	1,1	0,237
42	15,1	0,51	587	349	6,10	0,61	76,9	± 1,0	0,0455	8,6	0,0753	8,8	0,01201	1,4	0,154

№ п/п	Образец, зерно, кратер	²⁰⁶ Pb _c , %	Содержание, г/т			²³² Th/ ²³⁸ U	Возраст (1), млн лет	Изотопные отношения (1)						КК	
			U	Th	²⁰⁶ Pb*			²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*	± %	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U		± %
Обр. 3-11															
43	1,1	0,17	1063	895	11,4	0,87	79,6	± 0,97	0,0478	3,1	0,0819	3,3	0,01243	1,2	0,369
44	4,1	0,18	777	506	8,55	0,67	81,9	± 1,1	0,0480	3,4	0,0846	3,6	0,01278	1,3	0,357
45	5,1	0,35	549	214	5,9	0,40	79,8	± 1,1	0,0470	5,5	0,0808	5,7	0,01246	1,4	0,251
46	6,1	0,31	598	357	6,46	0,62	80,4	± 1,1	0,0467	5,1	0,0807	5,3	0,01254	1,4	0,262
47	7,1	0,43	500	192	5,42	0,40	80,4	± 1,2	0,0473	5,6	0,0819	5,8	0,01256	1,4	0,248
48	8,1	0,37	410	185	4,34	0,47	78,8	± 1,2	0,0484	5,6	0,0821	5,8	0,0123	1,5	0,263
49	9,1	0,36	541	285	5,74	0,54	78,8	± 1,1	0,0481	5,9	0,0816	6,1	0,0123	1,4	0,233
50	10,1	0,19	659	525	7,16	0,82	80,8	± 1,1	0,0470	3,7	0,0817	3,9	0,01262	1,3	0,340
51	11,1	0,20	785	496	8,27	0,65	78,4	± 1,0	0,0465	3,7	0,0784	3,9	0,01223	1,3	0,335
52	13,1	0,23	795	509	8,63	0,66	80,8	± 1,0	0,0477	4,0	0,0829	4,2	0,01261	1,3	0,310
53	14,1	0,26	734	601	7,61	0,85	77,1	± 1,4	0,0465	4,4	0,0771	4,8	0,01204	1,8	0,385

Примечание. Погрешности приведены на уровне 1σ. Pb_c и Pb* – свинец нерадиоогенный и свинец радиоогенный соответственно. (1) – скорректировано на измеренный нерадиоогенный Pb. Погрешность калибровки по стандарту Темора 0,43 %. КК – коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²³⁸U и ²⁰⁷Pb/²³⁵U. Номера кратеров соответствуют номерам кратеров пробоотбора (диаметр 25 мкм) в цирконах на рис. 12.

U-Pb методом 53 локальных изотопных анализа по стандартной методике [48; 56]. С этой целью выбирались однородные, свободные от включений и трещин, участки в хорошо сохранившихся кристаллах цирконов, выделенных из вышеохарактеризованных образцов магматических пород потенциального рудного поля Гион.

Цирконы выделялись из раздробленных до 300 мкм образцов с последующим осаждением тяжелой фракции в бромформе, извлечением немагнитной фракции и последующей ручной доочисткой под бинокулярной лупой. Для инструментальных исследований цирконы и стандарты имплантировались в эпоксидные шайбы и приполировались до половины толщины кристаллов.

Результаты U-Pb датирования приведены в табл. 4 и показаны на рис. 12.

В целом изученные монофракции цирконов представляют собой гомогенную популяцию, сформировавшуюся в процессе магматической кристаллизации гранитоидного расплава. Общими минералогическими особенностями изученных зерен цирконов являются их сравнительно крупные размеры (250–400 мкм), эвгедральный, короткопризматический облик (коэффициент удлинения равен 3–4), гиацинтовый габитус, ярко выраженная тонкая осцилляторная внутренняя зональность роста и хорошо сохранившиеся ребра и вершины кристаллов. Унаследованные ядра отсутствуют, имеются немногочисленные газожидкие и пылевые минеральные включения, степень резорбции поверхности граней выражена незначительно.

В результате выполненных изотопно-геохронологических исследований было установлено, что радиологический U-Pb возраст магматической кри-

сталлизации пород потенциального рудного поля Гион оценивается интервалом **76–82 млн лет**, что соответствует кампанскому веку позднего мела (рис. 12). При этом кварцевые диорит-порфиры (обр. 2-2 и 3-9А) имеют радиологический возраст 76,78 ± 0,73 и 76,62 ± 0,85 млн лет, а гранодиорит-порфиры (обр. 3-4 и 3-11) – 81,01 ± 0,58 и 79,82 ± 0,67 млн лет соответственно.

Как и в случае с Малмыжским месторождением, в магматических породах потенциального рудного поля Гион, наряду с автохтонными кристаллами цирконов, также выявлены и захваченные аллохтонные (ксеногенные) кристаллы цирконов, характеризующие процесс контаминации гранитоидного расплава веществом вмещающих терригенных и вулканогенно-туфогенных пород нижнего мела. В отличие от Малмыжского месторождения, здесь спектр радиологических возрастов изученных аллохтонных (ксеногенных) цирконов варьирует в широких пределах. В обр. 3-11 обнаружено одно аллохтонное зерно с раннеордовикским возрастом 474 млн лет, в обр. 2-2 также зафиксировано одно зерно с раннемеловым возрастом 110 млн лет, а в обр. 3-9А – два зерна: одно с раннеюрским возрастом 190 млн лет, а другое – со среднекарбовым возрастом 325 млн лет.

Скорее всего, такой разброс значений радиологического возраста ксеногенных цирконов свидетельствует о более широком возрастном спектре пород областей сноса обломочного материала при формировании терригенных и вулканогенных пород нижнего мела, веществом которых и был контаминирован гранитоидный расплав при внедрении в данный (Гионовский) фрагмент земной коры Журавлевско-Амурского террейна.

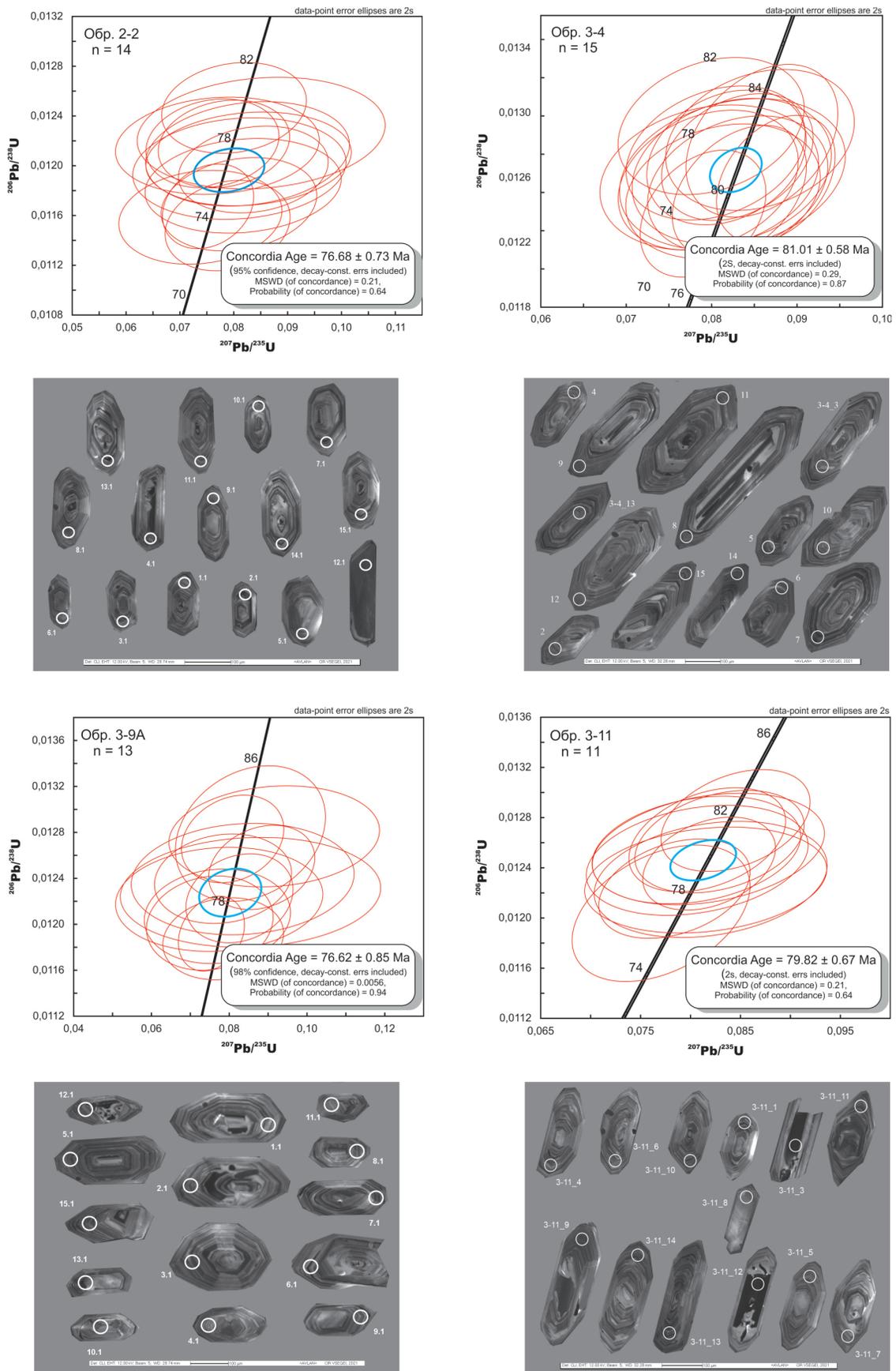


Рис. 12. Результаты U-Pb датирования интрузивных пород рудного поля Гион на примере Обр. 2-2, 3-4, 3-9А и 3-11

Для каждого из изученных образцов:

Вверху – диаграммы с конкордиями ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$) для цирконов из гранодиорит-порфиров и кварцевых диорит-порфиров, характеризующих возраст их магматической кристаллизации.

Внизу – катодолуминесцентные изображения изученных зерен цирконов с местоположением кратеров пробоотбора (25 мкм)

Результаты изучения закономерностей распределения элементов-примесей в цирконах из магматических пород рудных полей Малмыж и Гион. Изучение индикативных геохимических характеристик циркона, отражающих состав и металлогенические особенности среды минералообразования, требует наличия гомогенной популяции зерен этого минерала, кристаллизовавшегося из гранитоидного расплава. Для исследования в таких случаях непригодны многофазные кристаллы гибридного происхождения, а также кристаллы, содержащие значительное количество минеральных включений, древние ядра, метаморфические оболочки и т. п.

Применение вторично-ионного масс-спектрометра (SIMS) в сочетании с предварительной катодолюминесцентной (CL) и оптической документацией позволяет исключить из рассмотрения нерелевантные фазы циркона и проводить в одном микрообъеме кристалла как U-Pb изотопное определение возраста, так и определение концентраций редкоземельных и других элементов-примесей. В результате появляется однозначная привязка определенного геологического события (процесса) к его геохимическому наполнению.

В данной работе для изучения закономерностей распределения элементов-примесей в цирконах из магматических пород рудных полей Малмыж и Гион было использовано шесть образцов (ИМ-288, ИМ-2017Del, 2-2, 3-4, 3-9А и 3-11), петрографическое описание которых и геологическая привязка были рассмотрены выше.

Методика проведения локального элементного анализа в цирконе. Анализ проводился на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-IIe в ЦИИ ВСЕГЕИ. Измерялись относительные содержания редкоземельных элементов (РЗЭ), а также иттрий, титан и гафний по методике количественного химического анализа (МКХА), предложенного П. В. Хоскиным [32]. Интенсивность первичного пучка молекулярных отрицательно заряженных ионов кислорода O_2^- составляла 3-4 нА, диаметр аналитического кратера 25–30 мкм.

Опорным пиком служил изотоп ^{91}Zr , а нормализация содержаний элементов в измеряемом образце производилась относительно стандарта SRM NIST-611. Вторичные положительно заряженные ионы направлялись с помощью ускоряющего напряжения 10кВ в масс-спектрометр и регистрировались электронным умножителем в одноколпекторном режиме.

Энергетическое фильтрование применялось для уменьшения излишне высокой интенсивности пика циркония, при этом также подавляя изотопные наложения (ионов гидридов, окислов и других комплексов), что в совокупности с масс-разрешением 4000–5000 (1 % высоты пика) позволяло уверенно отделять каждый измеряемый полезный пик от паразитного наложения. Во время анализа регистрировалось три масс-спектра нижеперечисленных изотопов: ^{89}Y , ^{91}Zr , ^{139}La , ^{140}Ce , ^{141}Pr , ^{143}Nd ,

^{146}Nd , ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{151}Eu , ^{153}Eu , ^{155}Gd , ^{157}Gd , ^{159}Tb , ^{161}Dy , ^{163}Dy , ^{165}Ho , ^{166}Er , ^{167}Er , ^{169}Tm , ^{171}Yb , ^{172}Yb , ^{175}Lu , ^{178}Hf , ^{180}Hf .

Закономерности распределения элементов-примесей в цирконах. В табл. 5–6 приведены содержания редкоземельных элементов, а также содержания иттрия, титана, гафния, свинца, урана и тория в изученных зернах цирконов на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-IIe. При построении спектров распределения редкоземельных элементов состав циркона нормировался на состав хондрита CI [55–56].

Рудное поле Малмыж. Как показано на рис. 13, спектры распределения редкоземельных элементов (REE) в цирконах из образцов ИМ-288 и ИМ-2017Del практически идентичны друг другу, как по форме, так и по уровням содержания индивидуальных редких земель.

Суммарное содержание REE в цирконах в обр. ИМ-288 варьирует от 234 до 1105 г/т (при среднем значении 508 г/т), а в обр. ИМ-2017Del – от 217 до 1158 г/т (при среднем значении 468 г/т) (табл. 6). Характер распределения редких земель отчетливо дифференцирован с увеличением содержаний элементов от легких к тяжелым REE (Lu_N/La_N отношение в среднем по двум образцам составляет **40052**). Eu-аномалия – отрицательная, выражена достаточно слабо (Eu/Eu^* в среднем – **0,60**). Ce-аномалия, наоборот, положительная, проявлена весьма отчетливо и интенсивно (Ce/Ce^* в среднем составляет **61,4** в обр. ИМ-288 и **72,5** – в обр. ИМ-2017Del).

Содержания остальных элементов-примесей (Y, Hf, Pb, U, Th) в цирконах также мало чем отличаются друг от друга в изученных образцах гранитоидов. Так, средние содержания иттрия в обр. ИМ-288 и ИМ-2017Del варьируют от **718** до **732 г/т**, гафния – от **4524** до **4928 г/т**, свинца – от **1,2** до **1,6 г/т**. Концентрации U и Th весьма низкие. Средние значения содержаний урана – **89–112 г/т**, а тория – **58–76 г/т** при Th/U отношении **0,59–0,62**.

Потенциальное рудное поле Гион. Изученные зерна цирконов из кварцевых диорит-порфиров и гранодиорит-порфиров (обр. 2-2, 3-4, 3-9А и 3-11) незначительно отличаются по своим геохимическим характеристикам от цирконов из вышерассмотренных гранитоидов Малмыжского рудного поля (табл. 5–6). Прежде всего, эти различия касаются легких редких земель, а также иттрия, гафния, свинца, урана и тория, концентрации которых в 2–3 раза и более превышают средние значения этих элементов в цирконах из малмыжских гранитоидов. Тогда как по содержаниям средних и тяжелых редких земель цирконы из гранитоидов этих двух рудных полей практически не отличаются друг от друга.

Суммарное содержание REE в цирконах из обр. 2-2, 3-4, 3-9А и 3-11 варьирует от **243** до **1059 г/т** при среднем значении – **502 г/т** и высокой дисперсии распределения. Так же, как и в случае с малмыжскими образцами, характер поведения редких земель отчетливо дифференцирован

Таблица 5

Содержания типоморфных элементов-примесей (в г/т) и значения Th/U отношения в изученных зернах акцессорных цирконов из гранитоидов рудного поля Гюн, полученные по результатам исследования на вторично-ионном микроскопе SHRIMP-IIe

Образец, зерно	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Hf	Ti	Pb	U	Th	Th/U
2-2_11.1	0,005	23,98	0,04	0,57	1,12	0,53	5,98	2,25	29,97	11,75	60	15	164	37	480	7163	3,08	5,2	501	378	0,78
2-2_12.1	0,018	3,93	0,05	0,88	3,04	2,45	25,15	9,94	115,16	37,32	131	21	150	24	1606	5490	19,90	5,5	522	100	0,20
2-2_13.1	0,006	27,86	0,04	0,72	1,48	0,64	7,67	2,73	35,48	14,10	70	17	189	42	577	7136	3,20	8,4	795	890	1,16
2-2_14.1	0,007	40,84	0,07	1,18	2,27	1,00	11,13	3,72	47,49	18,53	88	21	220	48	750	6999	4,63	5,3	535	273	0,53
2-2_15.1	0,019	21,45	0,03	0,46	1,00	0,44	4,77	1,96	24,34	9,82	49	12	132	29	409	7166	3,34	7,4	733	674	0,95
3-4_1.1	0,012	15,73	0,04	0,50	1,23	0,73	6,67	3,04	38,43	16,71	82	22	233	55	643	7792	2,73	10,0	927	533	0,59
3-4_2.1	0,026	22,23	0,03	0,52	1,16	0,47	5,68	2,28	29,71	13,12	67	17	186	44	597	7128	2,90	10,0	927	533	0,59
3-4_3.1	0,046	21,81	0,05	0,77	1,09	0,37	4,65	1,82	18,89	8,11	39	10	109	26	361	7098	3,06	7,7	697	427	0,63
3-4_4.1	0,101	16,87	0,06	0,77	1,71	0,27	9,23	3,95	50,92	20,33	90	20	182	36	892	5877	5,01	6,3	573	379	0,68
3-4_5.1	0,230	25,92	0,09	0,89	1,26	0,51	6,43	2,32	27,36	10,47	50	12	126	26	462	6697	2,63	6,7	618	312	0,52
3-9A_5.1	0,030	18,14	0,11	1,32	2,53	0,82	13,49	5,54	68,16	28,31	139	33	339	71	1080	7446	4,69	9,5	858	588	0,71
3-9A_5.1	0,011	36,14	0,08	1,14	2,29	0,98	11,54	4,23	50,80	19,16	93	22	221	47	738	7022	5,48	3,4	321	256	0,82
3-9A_5.1	0,005	21,59	0,04	0,52	1,24	0,48	6,74	2,86	37,76	16,44	89	21	244	56	699	7561	3,09	7,1	692	603	0,89
3-9A_5.1	0,010	31,20	0,06	0,82	1,79	0,71	10,57	4,21	56,43	23,70	117	29	309	69	984	7184	4,24	12,2	1191	1489	1,29
3-9A_5.1	0,015	30,14	0,03	0,72	1,55	0,71	8,89	3,58	49,88	21,00	103	26	273	61	823	7313	3,55	6,1	587	349	0,61
3-11_4.1	0,028	38,34	0,05	0,83	1,92	0,88	11,84	4,81	58,89	25,22	119	29	288	65	1015	8304	4,33	8,6	777	506	0,67
3-11_5.1	0,087	20,34	0,05	0,58	1,29	0,62	8,14	3,49	44,72	19,34	93	23	240	53	754	9167	3,36	5,9	549	214	0,40
3-11_6.1	0,033	35,01	0,06	1,05	2,36	0,97	12,65	5,37	63,87	25,74	117	28	283	60	948	8571	4,12	5,9	549	214	0,40
3-11_7.1	0,061	10,39	0,04	0,55	0,91	0,44	4,61	2,19	26,71	12,23	60	16	165	39	432	10452	5,17	5,4	500	192	0,40
3-11_9.1	0,040	30,89	0,11	2,03	4,31	2,73	26,27	10,95	131,39	50,19	220	47	441	92	1895	6014	16,29	5,7	541	285	0,54

Примечание. Номер анализа соответствует номеру и положению соответствующего кратера уран-свинцового изотопного анализа циркона.

Таблица 6

Некоторые статистические параметры распределения содержания редкоземельных и редких элементов-примесей (в г/т) в цирконах из интрузивных пород рудных полей Малмыж (участок Северный) и Гион

Элементы, индикативные показатели	Малмыж				Гион				Среднее по рудному полю
	Обр. ИМ-2017Del	Обр. ИМ-288	Среднее по рудному полю		Обр. 3-4	Обр. 3-9А	Обр. 3-11		
	$\bar{X}_{\text{гир}}(\text{Me})$ min-max	$\bar{X}_{\text{гир}}(\text{Me})$ min-max			$\bar{X}_{\text{гир}}(\text{Me})$ min-max	$\bar{X}_{\text{гир}}(\text{Me})$ min-max	$\bar{X}_{\text{гир}}(\text{Me})$ min-max		
La	0,02 (0,02) 0,01-0,05	0,02 (0,01) 0,003-0,06	0,02 (0,01) 0,003-0,06	0,02 (0,01) 0,003-0,06	0,08 (0,05) 0,012-0,23	0,01 (0,01) 0,005-0,03	0,01 (0,01) 0,005-0,03	0,05 (0,04) 0,028-0,087	0,04 (0,02) 0,005-0,23
Ce	6,48 (5,33) 3,75-17,98	6,47 (5,54) 3,75-17,32	6,47 (5,44) 3,75-17,98	6,47 (5,44) 3,75-17,98	20,51 (21,81) 15,73-25,92	27,44 (30,14) 18,14-36,14	27,44 (30,14) 18,14-36,14	26,99 (30,89) 10,39-38,34	24,64 (23,11) 3,93-40,8
Pr	0,06 (0,04) 0,01-0,39	0,04 (0,04) 0,01-0,11	0,05 (0,04) 0,01-0,39	0,05 (0,04) 0,01-0,39	0,06 (0,05) 0,04-0,09	0,06 (0,06) 0,03-0,11	0,06 (0,06) 0,03-0,11	0,06 (0,05) 0,04-0,11	0,06 (0,05) 0,03-0,11
Nd	0,99 (0,60) 0,23-6,18	0,77 (0,65) 0,24-1,73	0,88 (0,62) 0,23-6,18	0,88 (0,62) 0,23-6,18	0,69 (0,77) 0,49-0,89	0,90 (0,83) 0,52-1,32	0,90 (0,83) 0,52-1,32	1,01 (0,83) 0,55-2,03	0,84 (0,77) 0,46-2,03
Sm	1,85 (1,29) 0,60-9,50	1,60 (1,39) 0,50-2,90	1,72 (1,37) 0,50-9,50	1,72 (1,37) 0,50-9,50	1,29 (1,23) 1,09-1,71	1,88 (1,79) 1,24-2,53	1,88 (1,79) 1,24-2,53	2,16 (1,92) 0,92-4,31	1,78 (1,52) 0,92-4,31
Eu	0,60 (0,59) 0,22-1,29	0,63 (0,58) 0,25-1,03	0,62 (0,58) 0,22-1,29	0,62 (0,58) 0,22-1,29	0,47 (0,47) 0,27-0,73	0,74 (0,71) 0,48-0,98	0,74 (0,71) 0,48-0,98	1,13 (0,88) 0,44-2,73	0,84 (0,68) 0,27-2,73
Gd	8,04 (6,19) 2,71-36,77	7,23 (6,29) 2,69-13,66	7,63 (6,24) 2,69-36,77	7,63 (6,24) 2,69-36,77	6,53 (6,43) 4,65-9,23	10,25 (10,57) 6,74-13,49	10,25 (10,57) 6,74-13,49	12,71 (11,84) 4,62-26,27	10,11 (8,51) 4,62-26,27
Tb	3,19 (2,55) 1,14-13,00	2,95 (2,50) 1,25-6,36	3,07 (2,52) 1,14-13,00	3,07 (2,52) 1,14-13,00	2,68 (2,32) 1,82-3,95	4,09 (4,21) 2,86-5,54	4,09 (4,21) 2,86-5,54	5,36 (4,81) 2,19-10,95	4,06 (3,54) 1,82-10,95
Dy	41,61 (31,29) 15,99-152,10	40,35 (36,28) 17,05-91,81	40,98 (32,55) 15,99-152,10	40,98 (32,55) 15,99-152,10	33,06 (29,71) 18,89-50,92	52,60 (50,80) 37,80-68,20	52,60 (50,80) 37,80-68,20	65,11 (58,90) 26,70-131,4	50,32 (46,11) 18,89-131,4
Ho	17,02 (12,47) 6,95-55,68	17,11 (16,65) 7,43-39,82	17,06 (14,23) 6,95-55,68	17,06 (14,23) 6,95-55,68	13,75 (13,12) 8,11-20,33	21,72 (21,00) 16,44-28,32	21,72 (21,00) 16,44-28,32	26,55 (25,20) 12,23-50,19	20,08 (18,85) 8,11-50,19
Er	83,20 (61,21) 36,48-240,80	87,61 (82,44) 38,14-201,30	85,41 (75,76) 36,48-240,80	85,41 (75,76) 36,48-240,80	65,63 (66,8) 39,28-90,30	108,2 (103,0) 88,66-139,2	108,2 (103,0) 88,66-139,2	121,90 (117,5) 60,11-219,6	93,84 (89,46) 39,28-219,6
Tm	21,20 (16,21) 9,71-51,70	23,34 (21,32) 10,46-52,03	22,26 (20,60) 9,71-52,03	22,26 (20,60) 9,71-52,03	16,15 (16,91) 10,02-21,80	26,1 (25,6) 21,2-32,9	26,1 (25,6) 21,2-32,9	28,5 (27,9) 15,59-47,12	22,0 (21,2) 10,02-47,12

Элементы, индикативные показатели	Малмыж				Гион				Среднее по рудному полю
	Обр. ИМ-2017Del $\chi_{\text{ср.}}(\text{Me})$ min-max	Обр. ИМ-288 $\chi_{\text{ср.}}(\text{Me})$ min-max	Среднее по рудному полю		Обр. 2-2 $\chi_{\text{ср.}}(\text{Me})$ min-max	Обр. 3-4 $\chi_{\text{ср.}}(\text{Me})$ min-max	Обр. 3-9А $\chi_{\text{ср.}}(\text{Me})$ min-max	Обр. 3-11 $\chi_{\text{ср.}}(\text{Me})$ min-max	
			Среднее по рудному полю						
Yb	234,7 (186,8) 113,4-490,0	264,9 (241,3) 125,1-566,5	249,8 (226,6) 113,4-566,5	171,0 (163,6) 131,7-220,0	167,1 (181,6) 109,3-232,7	277,3 (273,3) 221,0-339,2	283,3 (282,7) 165,2-441,5	224,7 (220,5) 109,3-441,5	
Lu	48,90 (40,58) 25,70-101,30	54,87 (50,19) 27,69-112,60	51,88 (44,35) 25,70-112,60	36,07 (36,6) 24,37-48,31	37,39 (35,65) 26,28-54,92	60,9 (60,8) 47,1-71,5	61,71 (59,75) 38,81-92,42	49,02 (47,70) 24,37-92,42	
ΣREE	467,86 (364,90) 217,10-1158,00	507,88 (462,40) 234,50-1105,00	487,87 (446,22) 217,10-1158,0	415,0 (409,8) 286,3-524,0	365,4 (388,2) 242,7-474,7	592,1 (579,3) 497,4-721,3	636,6 (635,0) 337,8-1059	502,3 (500,6) 242,7-1059	
ΣLREE	7,55 (5,98) 4,00-24,60	7,30 (6,24) 2,29-4,00	7,41 (6,12) 2,29-24,60	24,43 (24,60) 4,88-42,10	21,34 (22,67) 16,27-27,13	28,42 (30,91) 19,59-37,37	28,11 (33,07) 11,05-39,25	25,58 (23,70) 4,88-42,10	
ΣMREE	69,53 (63,12) 29,18-154,6	72,31 (54,63) 27,69-268,4	70,92 (56,99) 27,69-268,4	86,65 (62,10) 42,33-193,1	57,78 (52,41) 34,93-86,42	91,28 (89,00) 65,52-118,8	113,0 (103,6) 47,09-225,8	87,18 (80,87) 34,93-225,8	
ΣHREE	429,5 (387,0) 201,4-932,4	388,0 (304,3) 185,3-865,4	408,7 (375,0) 185,3-932,4	303,9 (319,1) 222,0-377,6	286,2 (312,9) 185,1-391,7	472,5 (462,7) 382,9-582,8	495,5 (487,8) 279,7-800,6	389,5 (380,2) 185,1-800,6	
Y	718 (546) 283-2212	732 (714) 306-1632	725 (615) 283-2212	764 (577) 408,8-1606	591 (597,0) 361-892	865 (823) 699,4-1080	1009 (948) 432,4-1895	807 (744) 361-1895	
Hf	4928 (4910) 4130-5822	4524 (4523) 4136-4986	4726 (4632) 4130-5822	6791 (7136) 5490-7166	6918 (7098) 5877-7792	7305 (7313) 7022-7561	8502 (8571) 6014-10452	7379 (7165) 5490-10452	
Ti	5,8 (5,7) 4,1-16,6	5,0 (5,3) 5,0-7,2	5,6 (5,4) 4,1-16,6	6,83 (3,34) 3,08-19,9	3,27 (2,90) 2,63-5,01	4,21 (4,24) 3,09-5,48	6,65 (4,33) 3,36-16,3	5,24 (3,83) 3,08-19,9	
Pb	1,6 (1,0) 0,7-8,4	1,2 (1,2) 0,6-2,4	1,4 (1,0) 0,6-8,4	6,3 (5,5) 5,2-8,4	8,1 (7,7) 6,3-10,0	7,7 (7,1) 3,4-12,2	6,3 (5,9) 5,4-8,6	7,1 (6,5) 3,4-12,2	
U	112 (75) 52-482	89 (85) 45-182	100 (75) 45-482	617 (535) 501-795	748 (697) 573-927	730 (692) 321-1191	583 (549) 500-777	670 (602) 321-1191	
Th	76 (47) 24-433	58 (50) 18-118	67 (48) 18-433	463 (378) 99,9-889,5	437 (427) 312-533	657 (588) 255,9-1489	282 (214) 192-506	460 (378) 99,9-1489	
Ce/Ce*	61,4 (58,2) 29,2-124,4	72,5 (60,8) 21,6-191,0	67,0 (58,3) 21,6-191,0	301,3 (402,2) 31,1-438,7	113,7 (108,3) 43,4-181,2	278,8 (316,1) 78,8-373,5	137,3 (112,7) 49,3-250,5	207,6 (189,5) 31,1-438,7	

Eu/Eu*	0,6 (0,6) 0,2–0,7	0,64 (0,66) 0,54–0,68	0,62 (0,63) 0,55–0,65	0,57 (0,58) 0,49–0,64	0,49 (0,50) 0,21–0,70	0,58 (0,58) 0,21–0,70
Lu _N /La _N	33558 (25483) 7313–63788	47658 (63192) 13198–74770	14086 (5605) 1102–43999	54701 (40755) 23159–101651	14742 (17531) 5895–22089	32797 (22072) 1102–101651
Sm _N /La _N	171,7 (156,3) 24,1–361,6	324,5 (371,0) 82,42–484,5	60,9 (37,7) 8,63–160,8	255,2 (294,8) 133,6–364,6	86,81 (106,6) 23,26–167,9	181,8 (146,8) 8,63–484,5
Lu _N /Gd _N	64,4 (64,0) 18,6–96,7	38,0 (45,3) 8,0–50,6	48,9 (47,1) 31,9–68,1	51,4 (53,6) 33,7–69,0	47,3 (45,1) 29,1–69,4	46,4 (46,2) 8,0–69,4
Pr _N /Gd _N	0,015 (0,013) 0,006–0,027	0,013 (0,014) 0,005–0,016	0,019 (0,015) 0,012–0,031	0,013 (0,013) 0,008–0,017	0,012 (0,010) 0,009–0,021	0,014 (0,013) 0,005–0,031
Yb _N /Sm _N	153,6 (146,1) 47,0–265,8	100,5 (116,6) 44,95–133,5	119,3 (96,6) 90,92–172,1	141,4 (157,6) 87,85–179,1	134,6 (136,6) 93,24–169,7	124,0 (120,7) 44,95–179,1
La _N /Gd _N	0,003 (0,002) 0,001–0,012	0,001 (0,001) 0,001–0,003	0,011 (0,008) 0,002–0,031	0,001 (0,001) 0,0001–0,002	0,005 (0,002) 0,001–0,011	0,005 (0,002) 0,0001–0,031
Yb/Gd	36,19 (35,77) 13,33–56,34	21,08 (24,69) 5,97–27,63	26,08 (23,53) 19,61–34,90	28,10 (29,27) 19,15–36,15	25,74 (24,30) 16,81–35,81	25,25 (24,92) 5,97–36,15
Nd/Yb	0,003 (0,002) 0,001–0,013	0,004 (0,004) 0,004–0,006	0,005 (0,004) 0,002–0,007	0,003 (0,003) 0,002–0,005	0,003 (0,003) 0,002–0,005	0,004 (0,004) 0,002–0,007
Yb/Hf	0,05 (0,04) 0,02–0,11	0,03 (0,03) 0,02–0,03	0,02 (0,03) 0,02–0,03	0,04 (0,04) 0,03–0,05	0,04 (0,03) 0,02–0,07	0,03 (0,03) 0,02–0,07
U/Yb	0,44 (0,38) 0,31–0,98	3,75 (3,47) 2,43–5,57	4,68 (4,89) 3,16–6,38	2,56 (2,53) 1,45–3,85	2,24 (2,29) 1,23–3,03	3,31 (3,05) 1,23–6,38
Th/U	0,59 (0,61) 0,39–0,90	0,70 (0,75) 0,19–1,12	0,59 (0,58) 0,51–0,66	0,84 (0,80) 0,59–1,25	0,47 (0,39) 0,38–0,65	0,65 (0,60) 0,19–1,25
LREE-I	82,59 (74,39) 40,64–188,50	91,90 (76,66) 61,03–168,4	76,31 (82,99) 41,85–108,5	90,04 (99,88) 66,91–103,6	94,71 (95,08) 77,49–111,3	88,24 (85,49) 41,85–168,4

Примечание. В таблице для каждого образца: в числителе – значение среднего арифметического содержания, в скобках – медиана, в знаменателе – разброс частных значений в выборке (минимум–максимум).
 Малмыж: Обр. ИМ-2017Del – равномерно-зернистый диорит, обр. ИМ-288 – порфировидный кварцевый диорит.
 Гианг: Обр. 2-2 – биотит-рогообманковый кварцевый диорит-порфир, Обр. 3-4 – биотитовый гранодиорит-порфир, Обр. 3-9А – биотит-рогообманковый кварцевый диорит-порфир и Обр. 3-11 – биотит-рогообманковый гранодиорит-порфир.

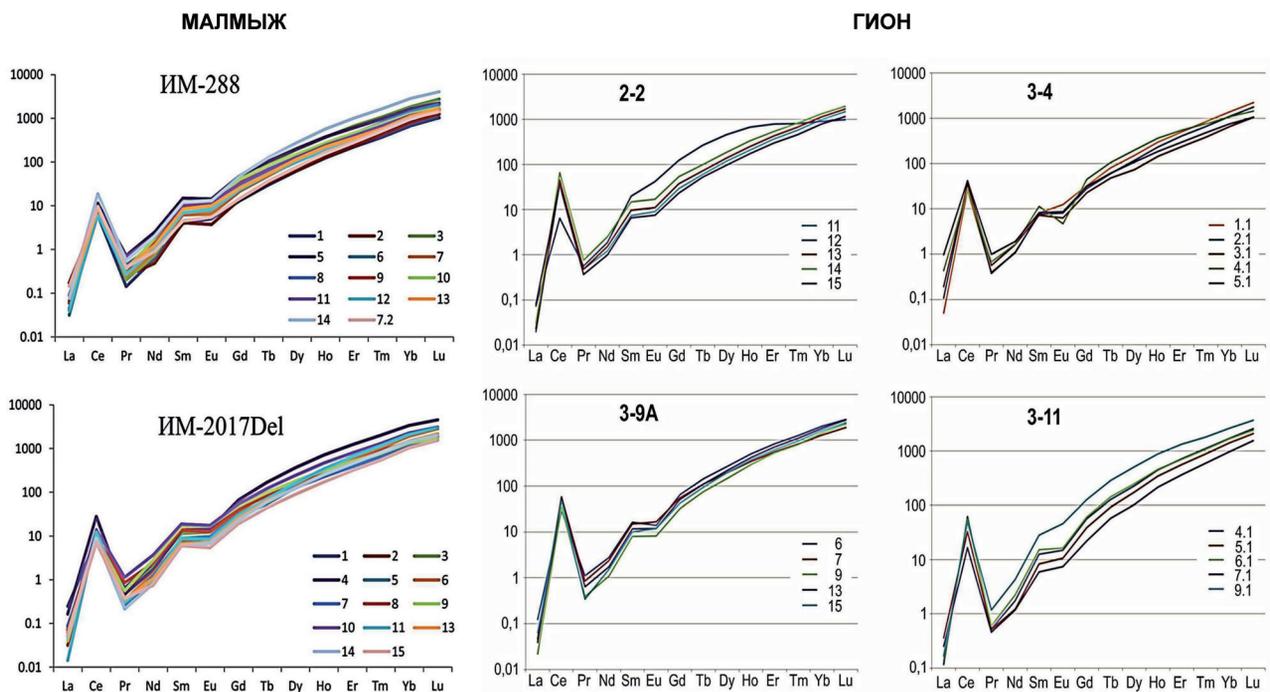


Рис. 13. Редкоземельные спектры цирконов (в нормированных единицах к содержаниям в хондритах) из магматических пород рудных полей Малмыж и Гион

с увеличением содержаний элементов от легких к тяжелым REE (Lu_N/La_N отношение колеблется в широких пределах, в среднем составляя **32 797**). Eu-аномалия – отрицательная, выражена чуть сильнее, чем в малмыжских цирконах (Eu/Eu^* в среднем – **0,58**). Ce-аномалия положительная, проявлена более отчетливо, чем в случае с малмыжскими гранитоидами (Ce/Ce^* в среднем составляет **207,6**).

В цирконах из гионовских гранитоидов обнаружены высокие концентрации U и Th. Средние значения содержаний урана – **670 г/т**, а тория – **460 г/т** при Th/U – **0,65**. Концентрации остальных элементов-примесей (Y, Hf и Pb) по сравнению с малмыжскими гранитоидами также повышенные. Средние значения содержаний иттрия составляют **807 г/т**, гафния – **7379 г/т**, а свинца – **7,1 г/т**.

Обсуждение результатов исследования.

1. На рис. 14 приведены материалы, иллюстрирующие положение состава изученных образцов магматических пород рудных полей Гион и Малмыж на петрохимической диаграмме TAS ($Na_2O + K_2O - SiO_2$), а также на вариационных диаграммах $Fe_2O_3/FeO - SiO_2$ и $Sr/Y - Y$. Для сравнения на них вынесены фигуративные точки усредненных составов рудовмещающих интрузивных пород большинства ведущих порфировых месторождений мира. Сравнительный анализ изученных образцов магматических пород как друг с другом, так и с рудоносными магматическими породами ведущих порфировых месторождений мира позволил сделать ряд выводов генетическо-

го, геодинамического и прогнозно-минерагенического характера:

- петрогеохимически изученные образцы малмыжских и гионовских магматических пород практически мало чем отличаются друг от друга. Все они принадлежат к известково-щелочной серии гранитоидов, характеризуюсь нормальной щелочностью ($Na_2O + K_2O = 3-6\%$) при резком преобладании натрия над калием ($K_2O/Na_2O = 0,2-0,3$) у малмыжских образцов и менее резком преобладании натрия над калием ($K_2O/Na_2O = 0,5-0,9$) – у таковых, отобранных в пределах рудного поля Гион (рис. 14, А). То есть гионовские гранитоиды оказались более калиевыми чем малмыжские, что не могло не сказаться на их геохимической специализации. Так, более калиевые гранитоиды из рудного поля Гион значительно обогащены по сравнению с малмыжскими образцами магматических пород барием, рубидием, стронцием, цирконием, торием, ураном и суммой редкоземельных элементов, особенно их легкой лантаноидной составляющей;

- на вариационной диаграмме $Fe_2O_3/FeO - SiO_2$ фигуративные точки состава характеризуемых образцов группируются в поле «золото-медно-порфировых и медно-порфировых месторождений», связанных с проявлением гранитоидного магматизма «магнетитовой» серии (рис. 14, Б). В этом отношении гранитоиды из рудных полей Гион и Малмыж практически не отличаются как друг от друга, так и от магматических пород большинства порфировых месторождений Мира;

- на вариационной диаграмме $Sr/Y - Y$ фигуративные точки состава данных образцов расположи-

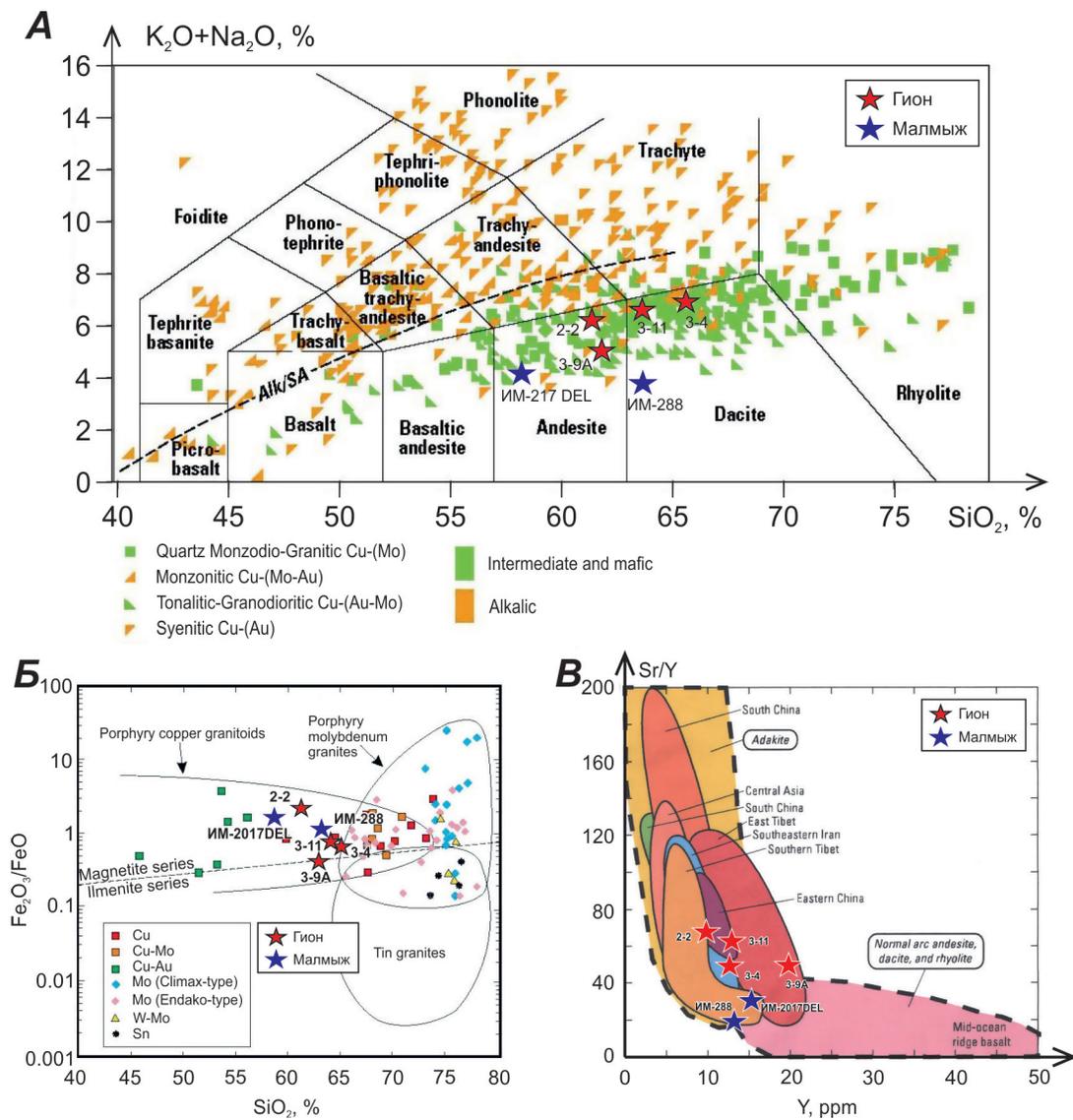


Рис. 14. Положение состава изученных образцов магматических пород рудных полей Гион и Малмыж
А – на петрохимической диаграмме TAS (Na₂O + K₂O – SiO₂), на которой для сравнения вынесены фигуративные точки составов рудовмещающих интрузивных пород большинства ведущих Au-Cu-, Au-Cu-Mo- и Cu-Mo-порфировых месторождений мира (по D. A. John et al. [35], Fig. 3 с дополнениями авторов).
Б – на вариационной диаграмме Fe₂O₃/FeO – SiO₂, предложенной В. Д. Синклером (W. D. Sinclair [52], Fig. 12) и на которую для сравнения вынесены фигуративные точки усредненных составов рудовмещающих интрузивных пород некоторых ведущих Cu-, Au-Cu-, Au-Cu-Mo-, Mo, W-Mo и Sn-порфировых месторождений мира.
В – на диаграмме Sr/Y – Y, предложенной Д. А. Джоном с соавторами (D. A. John et al. [35], Fig. 4), на которую для сравнения вынесены поля усредненных составов рудовмещающих интрузивных пород некоторых Cu- и Au-Cu-порфировых месторождений Азиатского региона (Китай, Центральная Азия, Иран, Индонезия)

лись в области «адакитовых» магматических пород порфировых месторождений Китая, Центральной Азии и Ирана, а внутри нее малмыжские гранитоиды «попали» в поле Южного Тибета, а гионовские образцы – в поле Восточного Тибета, Юго-Восточного Ирана и Северо-Востоку Китая (рис. 14, В).

По этому показателю из всего многообразия порфировых месторождений Мира изученные магматические породы Журавлевско-Амурского террейна сопоставимы, в первую очередь, со синсдвиговыми интрузивными породами территории китайского Тибета, где в последние годы была открыта серия золото-медно-молибден-порфиро-

вых месторождений, связанных с проявлениями адакитового гранитоидного магматизма [33; 34; 46; 47; 57].

2. Результаты проведенных изотопно-геохронологических исследований магматических пород рудных полей Малмыж и Гион указывают на близкий – **позднемеловой** радиологический возраст их кристаллизации: **сеноманский** (97–99 млн лет) для малмыжских образцов и **кампанский** (76–82 млн лет) для образцов, отобранных в пределах рудного поля Гион.

Это свидетельствует о том, что магматические породы данных рудных полей были сформиро-

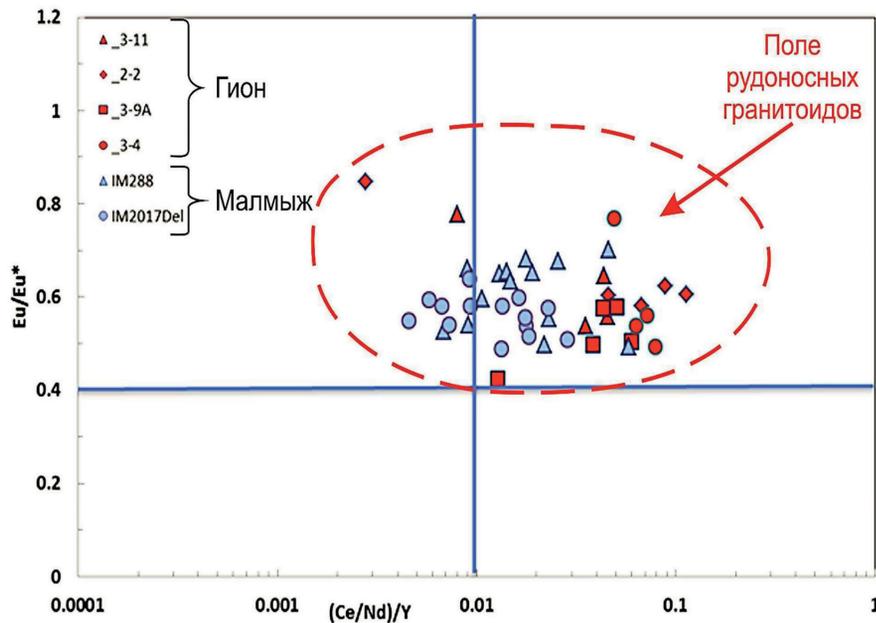


Рис. 15. Положение геохимического состава изученных зерен цирконов из образцов магматических пород рудных полей Малмыж и Гион на вариационной диаграмме $Eu/Eu^* - (Ce/Nd)/Y$

ваны в рамках одного, достаточно короткого по времени (не более 20 млн лет), этапа проявления син- и постколлизивной интрузивной магматической деятельности, реализованной в пределах Журавлевско-Амурского террейна раннемелового турбидитового осадочного бассейна.

3. Оценка потенциальной рудоносности магматических пород рудных полей Малмыж и Гион по геохимическим характеристикам акцессорных цирконов осуществлялась на основе использования вариационных диаграмм: $Eu/Eu^* - Dy/Nd$ и $Eu/Eu^* - (Ce/Nd)/Y$, предложенных Ю. Лу с соавторами [38; Fig. 5 и 6] на основе обобщения большого фактического материала по золото-медно-порфировым и золото-медно-молибден-порфировым месторождениям Центрально-Азиатского альпийского орогенного пояса в сравнении их с

заведомо безрудными магматическими образованиями различных регионов Мира. На приведенных в этой работе вариационных диаграммах отчетливо выделяются, практически не перекрывающиеся друг с другом, поля, одни из которых отвечают цирконам из рудоносных магматических пород порфировых месторождений, а другие – заведомо безрудным магматическим комплексам.

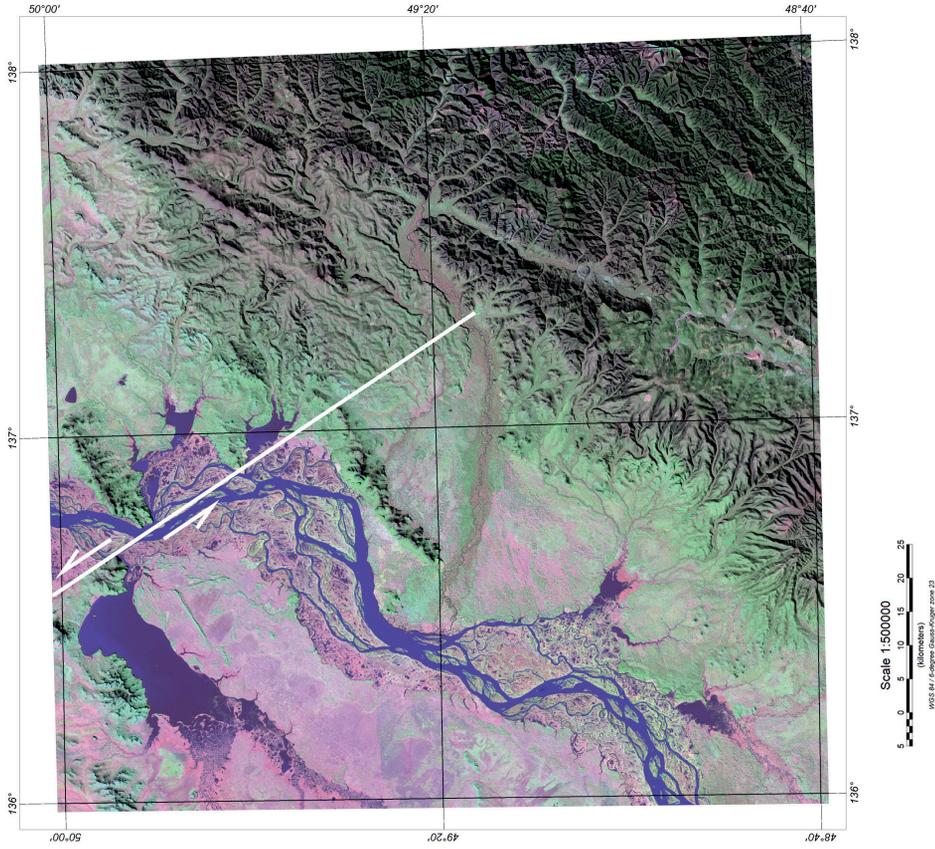
На рис. 15 представлена вариационная диаграмма $Eu/Eu^* - (Ce/Nd)/Y$, заимствованная из работы Ю. Лу и соавторов [38], на которой специальными значками нанесены фигуративные точки геохимических составов изученных зерен циркона из магматических пород рудных полей Малмыж и Гион. Анализ диаграммы показывает, что цирконы как из малмыжских (обр. ИМ-288 и ИМ-2017Del), так и гионовских (обр. 2-2, 3-4, 3-9А и 3-11)

Таблица 7

Значения индикативных геохимических параметров циркона (Porphyry Indicator Zircons – PIZs, after Pizarro et al. [45]) для изученных образцов магматических пород рудных полей Гион и Малмыж (участок Северный)

№ п/п	Индикативные геохимические параметры циркона (PIZs) для продуктивных порфировых интрузивов		Гион					Малмыж		
			Обр. 2-2	Обр. 3-4	Обр. 3-9А	Обр. 3-11	Среднее	Обр. ИМ-288	Обр. ИМ-2017Del	Среднее
1	Ce/Nd	>1	40,7	29,3	37,8	33,4	35,3	10,0	10,1	10,0
2	Eu/Eu*	>0,4	0,61	0,54	0,51	0,59	0,56	0,60	0,60	0,60
3	(Ce/Nd)/Y	>0,01	0,078	0,063	0,043	0,043	0,057	0,019	0,016	0,018
4	Dy/Yb	<0,3	0,19	0,17	0,18	0,20	0,19	0,16	0,16	0,16
5	(10000x Eu/Eu*)/Y	>1	11,6	11,7	7,1	5,7	9,0	11,1	9,1	10,0
6	Th/U	от 0,1 до 1,0	0,87	0,59	0,82	0,40	0,67	0,59	0,62	0,61
7	T° C (Ti-in-zircon-thermometer)	от 637 до 738	651	643	671	672	659	660	700	680

КОСМИЧЕСКИЙ ОБРАЗ



ГЕОЛОГИЯ

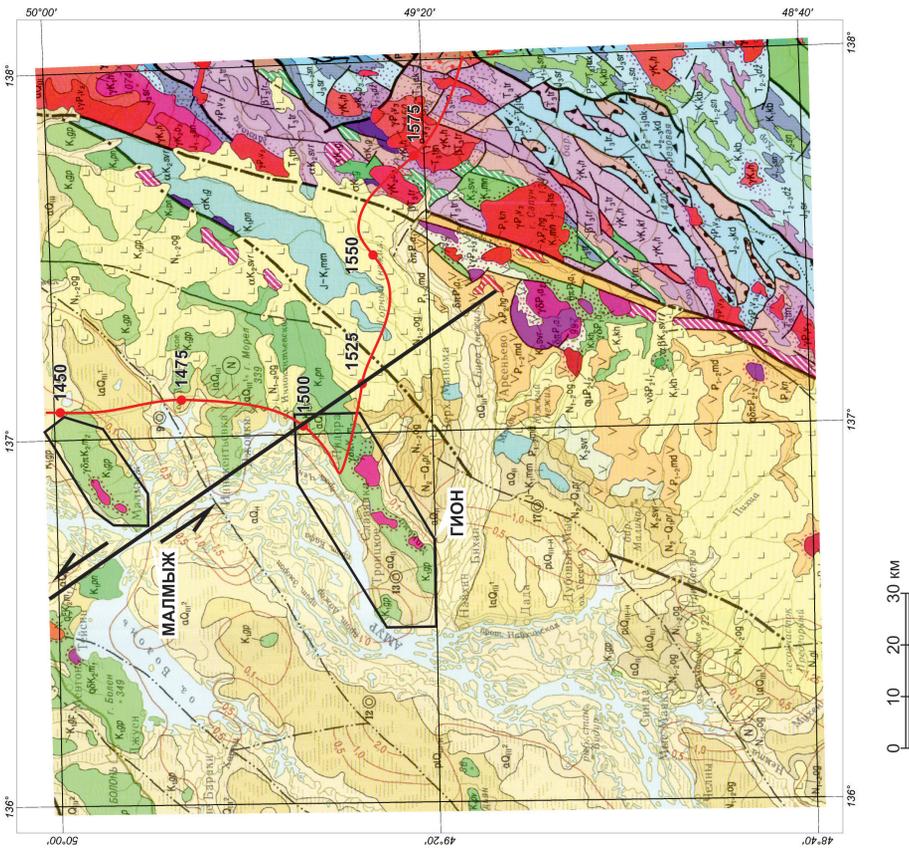


Рис. 16. Положение рудных полей Малмыж и Гион в региональных геологических структурах и на космическом снимке территории Нижнего Приамурья (фрагмент листа М-53 – Хабаровск, на котором линиями белого и черного цветов показано направление предполагаемого сдвигового движения, разделившего некогда единый в позднемиоценовое время гранитоидный интрузивный пояс (протяженностью 65 км) на два фрагмента: Малмыжский и Гионский)

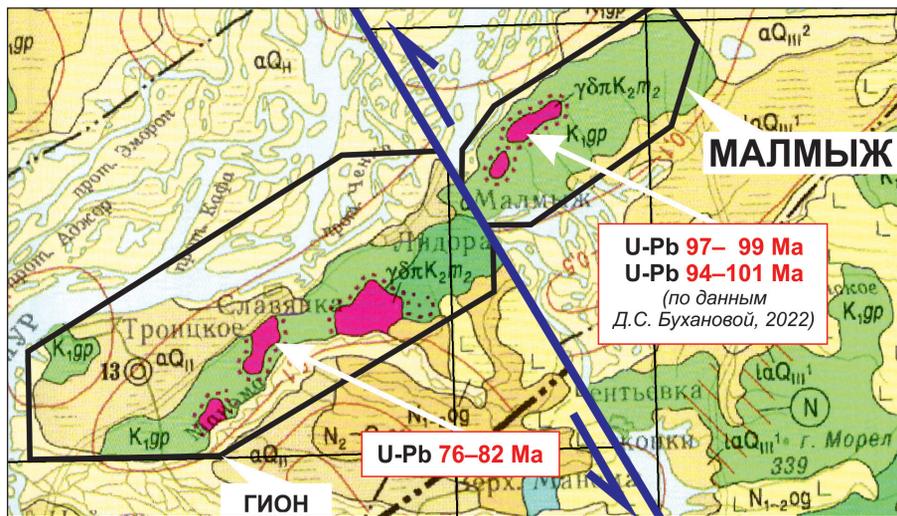


Рис. 17. Реконструкция предполагаемого геологического строения Гион-Малмыжского гранитоидного интрузивного пояса на момент его формирования в позднемеловое время

гранитоидов попадают в область рудоносных порфировых систем.

Это подтверждается и материалами табл. 7, в которой приводятся значения всех семи основных индикативных геохимических параметров циркона (PIZs – Porphyry Indicator Zircons), предложенных Х. Пизарро и соавторами [45] на основе обобщения большого статистического материала по основным порфировым месторождениям Мира и рассчитанных для изученных образцов магматических пород рудных полей Гион и Малмыж.

То есть на основе анализа вышеприведенных геохимических данных можно прийти к однозначному выводу: несмотря на то, что в пределах потенциального рудного поля Гион до настоящего времени промышленная золото-медно-порфировая рудная минерализация была неизвестна, тем не менее, гранитоиды, участвующие в его геологическом строении, по геохимическим характеристикам аксессуарных цирконов практически ничем не отличаются от гранитоидов как соседнего с ним Малмыжского рудного поля, так и большинства золото-медно-порфировых месторождений Мира.

Таким образом, изучение особенностей распределения элементов-примесей (REE+Y, Hf, Ti, U, Th, Pb) в аксессуарных цирконах из магматических пород рудных полей Малмыж и Гион, проведенное авторами статьи на основе использования геохимических моделей, предложенных Ю. Лу с соавторами [38] и Х. Пизарро и соавторами [45], действительно может помочь при разбраковке порфировых магматических комплексов на потенциально рудоносные и безрудные.

4. Однако по результатам работ Троицкой партии, проводившей на этой территории в 1975–1978 гг. ГСР масштаба 1 : 200 000, в целом было сделано негативное заключение о перспективах открытия в пределах рудного поля Гион промышленного золото-медно-порфирового оруденения (С. П. Кузьменко и др., 1979ф).

Сравнительный анализ всей совокупности приведенных в данной статье новых геолого-геофизических, космогеологических, петрогеохимических, минералого-петрографических, изотопно-геохронологических и изотопно-геохимических материалов однозначно указывает на то, что между этими двумя рудными полями – Малмыж и Гион скорее всего больше сходства нежели различий.

Более того, на основе тщательного анализа положения рудных полей Малмыж и Гион в региональных геологических структурах и на космическом снимке территории Нижнего Приамурья с определенной долей условности можно предположить, что в позднемеловое время эти две территории находились рядом, представляя собой единый гранитоидный интрузивный пояс, вытянутый в северо-восточном направлении более чем на 65 км (рис. 16, 17). Однако в результате неотектонических движений в плейстоценовое время этот единый гранитоидный интрузивный пояс был разделен левосторонним сдвигом на два фрагмента: Малмыжский и Гионский, с первым из которых связано крупнейшее в России золото-медно-порфировое месторождение, а перспективы второго на предмет прогнозирования промышленной рудной минерализации порфирового типа остаются пока до конца не реализованными.

По мнению авторов статьи, для окончательного решения этого вопроса в пределах потенциального рудного поля Гион необходимо провести оценку геологической изученности и подготовить Программу геологоразведочных работ масштаба 1 : 50 000 (1 : 25 000) с общими поисками, включающих комплекс современных геофизических, литогеохимических и дистанционных методов, а также петрографо-геохимическое изучение и картирование полей гидротермально измененных пород, нацеленное на выделение в его пределах более локальных перспективных участков размером не более 10–15 км² под проведение ГРП поисково-оценочной стадии. В результате реали-

зации подобной Программы на территории потенциального рудного поля Гион можно будет ожидать открытие 1–2 крупных порфировых месторождений по запасам, близким к месторождениям Малмыж и Песчанка.

Рассмотренные выше результаты исследования важны для решения актуальных проблем прогнозирования и оценки золото-медно-порфирового оруденения не только на территории Сихотэ-Алиня, но и в пределах всего Дальневосточного региона России в целом.

Благодарности. Авторы выражают благодарность директору Центра дистанционных методов природоресурсных исследований ВСЕГЕИ А. А. Кирсанову, директору центра геолого-геофизических основ ВСЕГЕИ А. И. Атакову и зав. отделом глубинных геофизических исследований ВСЕГЕИ И. Ю. Винокурову за предоставленные космогеологические и геофизические материалы по листу М-53 – Хабаровск и опорному геолого-геофизическому профилю 8-ДВ, а также ведущему инженеру Отдела прогнозной и геолого-экономической оценки месторождений полезных ископаемых ВСЕГЕИ Т. В. Бузковой за оказанную техническую помощь в подготовке и оформлении иллюстраций к данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буханова Д. С. Первые данные о возрасте Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения, Хабаровский край // *Материалы конференции «Новое в познании процессов рудообразования»*. – М.: ИГЕМ РАН, 2018. – С. 81–82.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2 кн. / Ред. А. И. Ханчук. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 981 с.
- Глебовицкий В. А. Геохимия цирконов анатектической и диатектической стадий формирования мигматов Северо-Западного Приладожья / В. А. Глебовицкий, Л. М. Саморукова, И. С. Седова, А. М. Федосеев // *Докл. РАН*. – 2008. – Т. 420, № 6. – С. 813–817.
- Иванов В. В., Кононов В. В., Игнатьев Е. К. Минералого-геохимические особенности рудной минерализации в метасоматитах золото-медного рудного поля Малмыж (Нижнее Приамурье) // *Материалы Всероссийской конференции: VIII Косыгинские чтения «Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии»*. – Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2013. – С. 258–261.
- Краснобаев А. А. Циркон как индикатор геологических процессов. – М.: Наука, 1986. – 134 с.
- Кривцов А. И. Медно-порфировые месторождения. Серия: Модели месторождений благородных и цветных металлов / А. И. Кривцов, В. С. Звездов, И. Ф. Мигачев, О. В. Минина. – М.: Изд-во ЦНИГРИ, 2001. – 232 с.
- Малышев Ю. Ф. Глубинное строение и перспективы поисков крупных и сверхкрупных месторождений на Дальнем Востоке / Ю. Ф. Малышев, М. В. Горошко, С. М. Родионов, Н. П. Романовский // *Крупные и сверхкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования*. – М.: ИГЕМ РАН, 2005. – С. 423–430.
- Мигачев И. Ф., Гирфанов М. М., Шишаков В. Б. Медно-порфировое месторождение Песчанка // *Руды и металлы*. – 1995. – № 3 – С. 48–58.
- Носырев М. Ю., Диденко А. Н., Гильманова Г. З. Геофизическая модель Малмыжского рудного узла по данным магнитного и гравитационного аномальных полей (Сихотэ-Алинь) // *Докл. РАН*. – 2022. – Т. 506, № 2. – С. 227–235. – DOI: 10.31857/S2686739722800015.
- Петров О. В. U-Pb SIMS геохронология рудносных магматических пород золото-медно-порфировых проявлений Малмыжского и Понийского рудных полей (Нижнее Приамурье) / О. В. Петров, А. И. Ханчук, В. В. Иванов, Е. А. Киселев, В. В. Шатов, Ю. П. Змиевский, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, С. А. Сергеев // *Региональная геология и металлогения*. – 2020. – № 83. – С. 41–56.
- Петров О. В. Государственное геологическое картографирование – эффективный путь к открытию месторождений-лидеров / О. В. Петров, Е. А. Киселев, А. Ф. Морозов, В. И. Шпикерман, Т. Н. Зубова, В. В. Шатов, Ю. П. Змиевский // *Региональная геология и металлогения*. – 2015. – № 64. – С. 5–10.
- Петров О. В. Карта закономерностей размещения золото-медно-порфировых месторождений России масштаба 1 : 2 500 000 (на основе обобщения результатов работ по составлению комплектов государственных геологических карт масштаба 1 : 1 000 000 третьего поколения) / О. В. Петров, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, В. В. Шатов, В. Н. Белова, С. В. Кашин, В. В. Семенова, А. Е. Соболев, Н. С. Соловьев, В. А. Шамахов // *Региональная геология и металлогения*. – 2020. – № 84. – С. 5–24.
- Петров О. В. Прогноз размещения месторождений золото-медно-порфирового типа в вулканоплутонических поясах восточных районов России по результатам работ составления листов Госгеолкарты-1000/3 / О. В. Петров, Е. А. Киселев, В. И. Шпикерман, Ю. П. Змиевский // *Региональная геология и металлогения*. – 2019. – № 80. – С. 50–74.
- Петров О. В. Распределение элементов-примесей (REE+Y, Hf, U, Th, Pb) в цирконе как индикатор рудоносности магматических пород Au-Cu-порфировых проявлений Малмыжского и Понийского рудных полей (Нижнее Приамурье, Дальний Восток) / О. В. Петров, Е. А. Киселев, А. И. Ханчук, В. В. Иванов, В. В. Шатов, А. А. Аленичева, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, Н. В. Родионов, Б. В. Беляцкий, С. А. Сергеев // *Региональная геология и металлогения*. – 2020. – № 84. – С. 55–70.
- Рязанова Е. И. Новейшее открытие Дальнего Востока России – золото-медно-порфировое месторождение Малмыж // *Геология в развивающемся мире*. – 2015. – С. 52–55.
- Скублов С. Г. Распределение редкоземельных и редких элементов в цирконах из мискиловых лампроитов Панозерского комплекса Центральной Карелии / С. Г. Скублов, С. Б. Лобач-Жученко, Н. С. Гусева, И. М. Гембицкая, Е. В. Толмачева // *Геохимия*. – 2009. – № 9. – С. 958–971.
- Федотова А. А., Бибикина Е. В., Симакин С. Г. Геохимия циркона (данные ионного микрозонда) как индикатор генезиса минерала при геохронологических исследованиях // *Геохимия*. – 2008. – № 9. – С. 980–997.
- Ханчук А. И. Альб-сеноманский магматизм и медный рудогенез Сихотэ-Алиня / А. И. Ханчук, В. В. Иванов, Е. К. Игнатьев, С. В. Коваленко, Д. В. Семенова // *Докл. РАН*. – 2019. – Т. 488, № 3. – С. 69–73.
- Ханчук А. И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России // *Рудные месторождения континентальных окраин*. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – С. 5–34.
- Ханчук А. И. Природа континентальной коры Сихотэ-Алиня (по данным изотопного состава Nd в породах Южного Приморья) / А. И. Ханчук, Н. Н. Крук,

- V. В. Голозубов, В. П. Ковач, П. А. Серов, В. В. Холднов, В. И. Гвоздев, С. А. Касаткин // Докл. РАН. – 2013. – Т. 451, № 4. – С. 441–445. – DOI: 10,7868/S0869565213220179.
21. Ханчук А. И., Гребенников А. В., Иванов В. В. Альб-сеноманский окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // Тихоокеанская геология. – 2019. – Т. 38, № 3. – С. 4–37.
22. Читалин А. Ф. Малмыж – новая крупная золото-медно-порфирировая система мирового класса на Сихотэ-Алине / А. Ф. Читалин, А. А. Ефимов, К. И. Воскресенский, Е. К. Игнатъев, А. Г. Колесников // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2013. – № 3. – С. 65–69.
23. Читалин А. Ф. Порфиново-эпитермальные системы Баймской рудной зоны, Западная Чукотка / А. Ф. Читалин, Ю. Н. Николаев, И. А. Бакшеев, В. Ю. Прокофьев, Е. В. Фомичев, В. В. Усенко, Е. В. Нагорная, Л. И. Марущенко, Ю. Н. Сидорина, Г. Т. Дждежая // Смирновский сборник – 2016. Ч. I. Проблемы минерации, экономической геологии и прогноза месторождений. – М.: МАКС Пресс, 2016. – С. 82–114.
24. Шатова Н. В. Геохронология щелочных магматических пород и метасоматитов Рябинового массива (Южная Якутия) на основе изотопно-геохимического (U-Pb, REE) исследования циркона / Н. В. Шатова, С. Г. Скублов, А. Е. Мельник, В. В. Шатов, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, С. А. Сергеев // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 69. – С. 33–48.
25. Шашорин Б. Н. Геолого-геофизическая модель Малмыжской рудно-магматической системы и возможности ее использования в прогнозировании (Сихотэ-Алинь) / Б. Н. Шашорин, Ф. И. Макаров, В. В. Руднев, Д. Е. Выдрич // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 2. – С. 9–16.
26. Ballard J. R., Palin M. J., Campbell I. H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce (IV)/Ce (III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2002. – Vol. 144, no. 3. – Pp. 347–364.
27. Bao X.-Sh. Geochemical discrimination between fertile and barren Eocene potassic porphyries in the Jinshajiang Cu-Au-Mo metallogenic belt, SW China: Implications for petrogenesis and metallogeny / X.-Sh. Bao, L.-Q. Yang, X. Gau, D. Groves, W.-Y. Hea, M.-M. Lia // Ore Geology Reviews. – 2020. – Vol. 116. – Pp. 1–16.
28. Burnham A. D., Berry A. J. An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as a function of oxygen fugacity // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2012. – Vol. 95. – Pp. 196–212.
29. Dilles J. H. Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas / J. H. Dilles, A. J. R. Kent, J. L. Wooden, R. M. Tosdal, A. Koleszar, R. G. Lee, L. P. Farmer // Economic Geology. – 2015. – Vol. 110. – Pp. 241–251.
30. Fu B. Ti-in-zircon thermometry: Applications and limitations / B. Fu, F. Z. Page, A. J. Cavosie, C. C. Clechenko, J. Fournelle, N. T. Kita, J. S. Lackey, S. A. Wilde, J. W. Valley // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2008. – Vol. 156. – Pp. 197–215.
31. Grebennikov A. V., Khanchuk A. I. Pacific-type transform and convergent margins: igneous rocks, geochemical contrasts and discriminant diagrams // International Geology Review. – 2020. – Vol. 63, no. 5. – Pp. 601–629. – DOI: 10,1080/00206814.2020.1848646.
32. Hoskin P. W. O. Minor and trace element analysis of natural zircon (ZrSiO₄) by SIMS and laser ablation ICP-MS: A consideration and comparison of two broadly competitive techniques // Journal of Trace and Microprobe Techniques. – 1998. – Vol. 16, no. 3. – Pp. 301–326.
33. Hou Z.-Q. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: produced by large-scale strike-slip faulting at Eastern Tibet / Z.-Q. Hou, H.-W. Ma, K. Zaw, Y.-Q. Zhang, M.-J. Wang, Z. Wang, G.-T. Pan, R.-L. Tang // Economic Geology. – 2003. – Vol. 98. – Pp. 125–145.
34. Hou Z.-Q. Re-Os age for molybdenites from the Gangdese porphyry copper belt in the Tibetan plateau: implication to mineralization duration and geodynamic setting / Z.-Q. Hou, X.-M. Qu, S.-X. Wang, A.-D. Du, Y.-F. Gao // Sci. China. – 2004. – Vol. 47. – Pp. 221–231.
35. John D. A. Porphyry copper deposit model / D. A. John, R. A. Ayuso, M. D. Barton, R. J. Blakely, R. J. Bodnar, J. H. Dilles, F. Gray et al. // Scientific Investigations Report 2010–5070-B, U. S. Geological Survey: Reston, Virginia. – 2010. – 169 p.
36. Loader M. A., Wilkinson J. J., Armstrong R. N. The effect of titanite crystallisation on Eu and Ce anomalies in zircon and its implications for the assessment of porphyry Cu deposit fertility // Earth and Planetary Science Letters. – 2017. – Vol. 472. – Pp. 107–119.
37. Lowell J. D., Guilbert J. M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits // Economic Geology. – 1970. – Vol. 65, no. 4. – Pp. 373–408.
38. Lu Y.-J. Zircon compositions as a pathfinder for porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits / Y.-J. Lu, R. R. Loucks, M. Fiorentini, T. C. Mc Cuaig, N. J. Evans, Z.-M. Yang, Z.-Q. Hou, Ch. L. Kirkland, L. A. Parra-Avila, A. Kobussen // Society Economic Geology Special Publication. – 2016. – No. 19. – Pp. 329–347.
39. Muller D., Groves D. I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization // Springer, the 4th Edition. – 2016. – 311 p.
40. Nasdala L. Zircon M257 – a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon / L. Nasdala, W. Hofmeister, N. Norberg, J. M. Mattinson, F. Corfu, W. Dörr, S. L. Kamo, A. K. Kennedy, A. Kronz, P. W. Reiners, D. Frei, J. Kosler, Y. Wan, J. Götz, T. Häger, A. Kröner, J. W. Valley // Geostandards and Geoanalytical Research. – 2008. – Vol. 32 (3). – Pp. 247–265.
41. Paolillo L., Chiaradia M., Ulianov A. Zircon Petrochronology of the Kışladağ Porphyry Au Deposit (Turkey) // Economic Geology. – 2022. – Vol. 117, no. 2. – Pp. 401–422. – DOI:10,5382/econgeo.4864.
42. Park J.-W. Chalcophile element fertility and the formation of porphyry Cu ± Au deposits / J.-W. Park, I. H. Campbell, S. P. K. Malaviarachchi, H. Cocker, H. Hao, S. M. Kay // Mineralium Deposita. – 2019. – Vol. 54. – Pp. 657–670.
43. Parra-Avila L. A. The long-lived fertility signature of Cu-Au porphyry systems: insights from apatite and zircon at Tampakan, Philippines / L. A. Parra-Avila, J. Hammerli, A. I. S. Kemp, B. Rohrlach, R. Loucks, Y. Lu, I. S. Williams, L. Martin, M. P. Roberts, M. L. Fiorentini // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2022. – Vol. 177, no.18. – Pp. 1–22. – DOI: 10,1007/s00410–021–01878–2.
44. Petrov O. V. Porphyry indicator zircons and geochronology of magmatic rocks from the Malmyzh and Pony Cu-Au porphyry ore fields (Russian Far East) / O. V. Petrov, A. I. Khanchuk, V. V. Ivanov, V. V. Shatov, R. Seltmann, A. V. Dolgoplova, A. A. Alenicheva, A. V. Molchanov, A. V. Terekhov, V. I. Leontev, B. V. Belyatsky, N. V. Rodionov, S. A. Sergeev // Ore Geology Reviews. – 2021. – Vol. 139. – Pp. 1–22.
45. Pizarro H. Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits / H. Pizarro, E. Campos, F. Bouzari, S. Rouse, T. Bissig, M. Gregoire, R. Riquelme // Ore Geology Reviews. – 2020. – Vol. 126. – DOI: org/10,1016/j.oregeorev.2020,103771.
46. Qu P. Apatite and zircon geochemistry for discriminating ore-forming intrusions in the Luming giant porphyry Mo deposit, Northeastern China / P. Qu, H.-C. Niu, Q. Weng, N.-B. Li, Y. Zhao, H.-J. Zhang // Ore Geology Reviews. – 2022. – Vol. 143. – Pp. 1–17. – DOI: org/10,1016/j.oregeorev.2022,104771.

47. Richards J. P., Kerrich R. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis // *Economic Geology*. – 2007. – Vol. 102. – Pp. 537–576.
48. Schuth S. Early Proterozoic U-Pb Zircon Ages from Basement Gneiss at the Solovetsky Archipelago, White Sea, Russia / S. Schuth, V. I. Gornyy, J. Berndt, S. S. Shevchenko, S. A. Sergeev, A. F. Karpuzov, and T. Mansfeldt // *International Journal of Geosciences*. – 2012. – Vol. 3, no. 2. – Pp. 289–296.
49. Shen P. Oxidation condition and metal fertility of granitic magmas: Zircon trace-element data from porphyry Cu deposits in the Central Asian Orogenic Belt / P. Shen, K. Hattori, H. Pan, S. Jackson, E. Seitmuratova // *Economic Geology*. – 2015. – Vol. 110. – Pp. 1861–1878.
50. Shu Q. Zircon trace elements and magma fertility: Insights from porphyry (-skarn) Mo deposits in NE China / Q. Shu, Zh. Chang, Y. Lai, X. Hu, H. Wu, Y. Zhang, P. Wang, D. Zhai, Ch. Zhang // *Mineralium Deposita*. – 2019. – Vol. 54. – Pp. 645–656.
51. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems // *Economic Geology*. – 2010. – Vol. 105, no. 1. – Pp. 3–41.
52. Sinclair W. D. Porphyry deposits // *Mineral Deposits of Canada: Geological Association of Canada Special Publication 5*. – 2007. – Pp. 223–243.
53. Soloviev S. G. The superlarge Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, eastern Russia: Igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and fluid inclusion characteristics / S. G. Soloviev, S. G. Kryazhev, S. S. Dvurechinskaya, V. E. Vasyukov, D. A. Shumilin, K. I. Voskresensky // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – Vol. 113. – Pp. 1–27.
54. Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2006. – Vol. 151. – Pp. 413–433.
55. Wiedenbeck M. Further characterization of the 91 500 zircon crystal / M. Wiedenbeck, J. M. Hanchar, W. H. Peck, P. Sylvester, J. Valley, M. Whitehouse, A. Kronz, Y. Morishita, L. Nasdala et al. // *Geostandards Newsletter*. – 2004. – Vol. 28. – Pp. 9–39.
56. Williams I. S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. // Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes / Eds.: M. A. McKibben, W. C. Shanks III, W. I. Ridley // *Rev. Econ. Geol.* – 1998. – Vol. 7. – Pp. 1–35.
57. Zheng Y. Progress in porphyry copper exploration from the Gangdise belt, Tibet, China / Y. Zheng, J. Duo, S. Cheng, S. Gao, F. Dai // *Frontiers Earth Science China*. – 2007. – Vol. 1. – Pp. 226–232.
5. Krasnobaev A. A. Tsrirkon kak indikator geologicheskikh protsessov. Moscow, Nauka, 1986, 134 p.
6. Krivtsov A. I., Zvezdov V. S., Migachev I. F. et al. Medno-porfirovye mestorozhdeniya. Seriya: Modeli mestorozhdeniy blagorodnykh i tsvetnykh metallov. Moscow, Izdatel'stvo TsNIGRI, 2001, 232 p.
7. Malyshev Yu. F., Goroshko M. V., Rodionov S. M. et al. Glubinnoe stroenie i perspektivy poiskov krupnykh i sverkhkrupnykh mestorozhdeniy na Dal'nem Vostoke. *Krupnye i sverkhkrupnye mestorozhdeniya: zakonornosti razmeshcheniya i usloviya obrazovaniya*. Moscow, 2005, pp. 423–430.
8. Migachev I. F., Girfanov M. M., Shishakov V. B. Medno-porfirovye mestorozhdenie Peschanka. *Rudy i metally*, 1995, no. 3, pp. 48–58.
9. Nosyrev M. Yu., Didenko A. N., Gil'manova G. Z. Geofizicheskaya model' Malmyzhskogo rudnogo uzla po dannym magnitnogo i gravitatsionnogo anomal'nykh poley (Sikhote-Alin'). *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 2022, vol. 506, no. 2, pp. 227–235, DOI: 10.31857/S2686739722800015.
10. Petrov O. V., Khanchuk A. I., Ivanov V. V. et al. U-Pb SIMS geokhronologiya rudosnykh magmaticheskikh porod zoloto-medno-porfirovykh proyavleniy Malmyzhskogo i Poniyskogo rudnykh poley (Nizhnee Priamur'e). *Regional Geology and Metallogeny*, 2020, no. 83, pp. 41–56.
11. Petrov O. V., Kiselev E. A., Morozov A. F. et al. Gosudarstvennoe geologicheskoe kartografirovanie – effektivnyy put' k otkrytiyu mestorozhdeniy-liderov. *Regional Geology and Metallogeny*, 2015, no. 64, pp. 5–10.
12. Petrov O. V., Molchanov A. V., Terekhov A. V. et al. Karta zakonornostey razmeshcheniya zoloto-medno-porfirovykh mestorozhdeniy Rossii mashtaba 1 : 2 500 000 (na osnove obobshcheniya rezul'tatov rabot po sostavleniyu komplektov gosudarstvennykh geologicheskikh kart mashtaba 1 : 1 000 000 tret'ego pokoleniya). *Regional Geology and Metallogeny*, 2020, no. 84, pp. 5–24.
13. Petrov O. V., Kiselev E. A., Shpikerman V. I. et al. Prognoz razmeshcheniya mestorozhdeniy zoloto-medno-porfirovogo tipa v vulkano-plutonicheskikh poyasakh vostochnykh rayonov Rossii po rezul'tatam rabot sostavleniya listov Gosgeolokarty-1000/3. *Regional Geology and Metallogeny*, 2019, no. 80, pp. 50–74.
14. Petrov O. V., Kiselev E. A., Khanchuk A. I. et al. Raspredelenie elementov-primesy (REE+Y, Hf, U, Th, Pb) v tsirkone kak indikator rudosnosti magmaticheskikh porod Au-Cu-porfirovykh proyavleniy Malmyzhskogo i Poniyskogo rudnykh poley (Nizhnee Priamur'e, Dal'niy Vostok). *Regional Geology and Metallogeny*, 2020, no. 84, pp. 55–70.
15. Ryazanova E. I. Noveyshee otkrytie Dal'nego Vostoka Rossii – zoloto-medno-porfirovye mestorozhdenie Malmyzh. *Geologiya v razvivayushchemsya mire*, 2015, pp. 52–55.
16. Skublov S. G., Lobach-Zhuchenko S. B., Guseva N. S. et al. Raspredelenie redkozemel'nykh i redkikh elementov v tsirkonakh iz miaskitovykh lamproitov Panozerskogo kompleksa Tsentral'noy Karelii. *Geochemistry*, 2009, no. 9, pp. 958–971.
17. Fedotova A. A., Bibikova E. V., Simakin S. G. Geokhimiya tsirkona (dannye ionnogo mikrozonada) kak indikator genezisa minerala pri geokhronologicheskikh issledovaniyakh. *Geochemistry*, 2008, no. 9, pp. 980–997.
18. Khanchuk A. I., Ivanov V. V., Ignat'ev E. K. et al. Al'b-senomanskiy magmatizm i mednyy rudogenez Sikhote-Alinya. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 2019, vol. 488, no. 3, pp. 69–73.
19. Khanchuk A. I. Paleogeodinamicheskii analiz formirovaniya rudnykh mestorozhdeniy Dal'nego Vostoka Rossii. *Rudnye mestorozhdeniya kontinental'nykh okrain*. Vladivostok, Dal'nauka, 2000, pp. 5–34.
20. Khanchuk A. I., Kruk N. N., Golozubov V. V. et al. Priroda kontinental'noy kory Sikhote-Alinya (po dannym izotopnogo sostava Nd v porodakh Yuzhnogo Primor'ya).

REFERENCES

1. Bukhanova D. S. Pervye dannye o vozraste Malmyzhskogo zoloto-medno-porfirovogo mestorozhdeniya, Khabarovskiy kray. *Materialy konferentsii «Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya»*. Moscow, 2018, pp. 81–82.
2. Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii. In 2 books. Ed. A. I. Khanchuk. Vladivostok, Dal'nauka, 2006, 981 p.
3. Glebovitskiy V. A., Samorukova L. M., Sedova I. S. et al. Geokhimiya tsirkonov anatekticheskoy i diatekticheskoy stadiy formirovaniya migmatitov Severo-Zapadnogo Priladozh'ya. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 2008, vol. 420, no. 6, pp. 813–817.
4. Ivanov V. V., Kononov V. V., Ignat'ev E. K. Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rudnoy mineralizatsii v metasomatitakh zoloto-mednogo rudnogo polya Malmyzh (Nizhnee Priamur'e). *Materialy Vserossiyskoy konferentsii: VIII Kosygin'skie chteniya «Tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya Vostoka Azii»*. Khabarovsk, 2013, pp. 258–261.

- Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 2013, vol. 451, no. 4, pp. 441–445, DOI: 10.7868/S0869565213220179.
21. Khanchuk A. I., Grebennikov A. V., Ivanov V. V. Al'b-senomanskiy okrainno-kontinental'nyy orogennyy poynas i magmaticheskaya provintsiya Tikhookeanskoy Azii. *Tikhookeanskaya geologiya*, 2019, vol. 38, no. 3, pp. 4–37.
22. Chitalin A. F., Efimov A. A., Voskresenskiy K. I. et al. Malmyzh – novaya krupnaya zoloto-medno-porfirovaya sistema mirovogo klassa na Sikhote-Aline. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2013, no. 3, pp. 65–69.
23. Chitalin A. F., Nikolaev Yu. N., Baksheev I. A. et al. Porfirovo-epitermal'nye sistemy Baimskoy rudnoy zony, Zapadnaya Chukotka. *Smirnovskiy sbornik – 2016. Chap. I. Problemy mineragenii, ekonomicheskoy geologii i prognoza mestorozhdeniy*. Moscow, MAKS Press, 2016, pp. 82–114.
24. Shatova N. V., Skublov S. G., Mel'nik A. E. et al. Geokhronologiya shchelochnykh magmaticheskikh porod i metasomatitov Ryabinovogo massiva (Yuzhnaya Yakutiya) na osnove izotopno-geokhimicheskogo (U-Pb, REE) issledovaniya tsirkona. *Regional Geology and Metallogeny*, 2017, no. 69, pp. 33–48.
25. Shashorin B. N., Makarov F. I., Rudnev V. V. et al. Geologo-geofizicheskaya model' Malmyzhskoy rudno-magmaticheskoy sistemy i vozmozhnosti ee ispol'zovaniya v prognozirovaniy (Sikhote-Alin'). *Razvedka i okhrana nedr*, 2018, no. 2, pp. 9–16.
26. Ballard J. R., Palin M. J., Campbell I. H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce (IV)/Ce (III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, vol. 144, no. 3, pp. 347–364.
27. Bao X.-Sh., Yang L.-Q., Gau X. et al. Geochemical discrimination between fertile and barren Eocene potassic porphyries in the Jinshajiang Cu-Au-Mo metallogenic belt, SW China: Implications for petrogenesis and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 116, pp. 1–16.
28. Burnham A. D., Berry A. J. An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as a function of oxygen fugacity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, vol. 95, pp. 196–212.
29. Dilles J. H., Kent A. J. R., Wooden J. L. et al. Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, pp. 241–251.
30. Fu B., Page F. Z., Cavosie A. J. et al. Ti-in-zircon thermometry: Applications and limitations. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2008, vol. 156, pp. 197–215.
31. Grebennikov A. V., Khanchuk A. I. Pacific-type transform and convergent margins: igneous rocks, geochemical contrasts and discriminant diagrams. *International Geology Review*, 2020, vol. 63, no. 5, pp. 601–629, DOI: 10.1080/00206814.2020.1848646.
32. Hoskin P. W. O. Minor and trace element analysis of natural zircon (ZrSiO₄) by SIMS and laser ablation ICP-MS: A consideration and comparison of two broadly competitive techniques. *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 1998, vol. 16, no. 3, pp. 301–326.
33. Hou Z.-Q., Ma H.-W., Zaw K. et al. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: produced by large-scale strike-slip faulting at Eastern Tibet. *Economic Geology*, 2003, vol. 98, pp. 125–145.
34. Hou Z.-Q., Qu X.-M., Wang S.-X. et al. Re-Os age for molybdenites from the Gangdese porphyry copper belt in the Tibetan plateau: implication to mineralization duration and geodynamic setting. *Sci. China*, 2004, vol. 47, pp. 221–231.
35. John D. A., Ayuso R. A., Barton M. D. et al. Porphyry copper deposit model. *Scientific Investigations Report 2010–5070-B*, U. S. Geological Survey: Reston, Virginia, 2010, 169 p.
36. Loader M. A., Wilkinson J. J., Armstrong R. N. The effect of titanite crystallisation on Eu and Ce anomalies in zircon and its implications for the assessment of porphyry Cu deposit fertility. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, vol. 472, pp. 107–119.
37. Lowell J. D., Guilbert J. M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 1970, vol. 65, no. 4, pp. 373–408.
38. Lu Y.-J., Loucks R. R., Fiorentini M. et al. Zircon compositions as a pathfinder for porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits. *Society Economic Geology Special Publication*, 2016, no. 19, pp. 329–347.
39. Muller D., Groves D. I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. *Springer, the 4th Edition*, 2016, 311 p.
40. Nasdala L., Hofmeister W., Norberg N. et al. Zircon M257 – a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2008, vol. 32 (3), pp. 247–265.
41. Paolillo L., Chiaradia M., Ulianov A. Zircon Petrochronology of the Kışladağ Porphyry Au Deposit (Turkey). *Economic Geology*, 2022, vol. 117, no. 2, pp. 401–422, DOI:10.5382/econgeo.4864.
42. Park J.-W., Campbell I. H., Malaviarachchi S. P. K. et al. Chalcophile element fertility and the formation of porphyry Cu ± Au deposits. *Mineralium Deposita*, 2019, vol. 54, pp. 657–670.
43. Parra-Avila L. A., Hammerli J., Kemp A. I. S. et al. The long-lived fertility signature of Cu-Au porphyry systems: insights from apatite and zircon at Tampakan, Philippines. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2022, vol. 177, no. 18, pp. 1–22, DOI: 10.1007/s00410–021–01878–2.
44. Petrov O. V., Khanchuk A. I., Ivanov V. V. et al. Porphyry indicator zircons and geochronology of magmatic rocks from the Malmyzh and Pony Cu-Au porphyry ore fields (Russian Far East). *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 139, pp. 1–22.
45. Pizarro H., Campos E., Bouzari F. et al. Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 126, DOI: org/10.1016/j.oregeorev.2020.103771.
46. Qu P., Niu H.-C., Weng Q. et al. Apatite and zircon geochemistry for discriminating ore-forming intrusions in the Luming giant porphyry Mo deposit, Northeastern China. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 143, pp. 1–17, DOI: org/10.1016/j.oregeorev.2022.104771.
47. Richards J. P., Kerrich R. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, pp. 537–576.
48. Schuth S., Gornyy V. I., Berndt J. et al. Early Proterozoic U-Pb Zircon Ages from Basement Gneiss at the Solovetsky Archipelago, White Sea, Russia. *International Journal of Geosciences*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 289–296.
49. Shen P., Hattori K., Pan H. et al. Oxidation condition and metal fertility of granitic magmas: Zircon trace-element data from porphyry Cu deposits in the Central Asian Orogenic Belt. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, pp. 1861–1878.
50. Shu Q., Chang Zh., Lai Y. et al. Zircon trace elements and magma fertility: Insights from porphyry (-skarn) Mo deposits in NE China. *Mineralium Deposita*, 2019, vol. 54, pp. 645–656.
51. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 2010, vol. 105, no. 1, pp. 3–41.
52. Sinclair W. D. Porphyry deposits. *Mineral deposits of Canada: Geological Association of Canada Special Publication 5*, 2007, pp. 223–243.
53. Soloviev S. G., Kryazhev S. G., Dvurechinskaya S. S. et al. The superlarge Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, eastern Russia: Igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and

fluid inclusion characteristics. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 113, pp. 1–27.

54. Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, vol. 151, pp. 413–433.

55. Wiedenbeck M., Hanchar J. M., Peck W. H. et al. Further characterization of the 91 500 zircon crystal. *Geo-standards Newsletter*, 2004, vol. 28, pp. 9–39.

56. Williams I. S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. Eds.: M. A. McKibben, W. C. Shanks III, W. I. Ridley. *Rev. Econ. Geol.*, 1998, vol. 7, pp. 1–35.

57. Zheng Y., Duo J., Cheng S. et al. Progress in porphyry copper exploration from the Gangdise belt, Tibet, China. *Frontiers Earth Science China*, 2007, vol. 1, pp. 226–232.

Петров Олег Владимирович – чл.-корр. РАН, доктор геол.-минерал. наук, доктор экон. наук, ген. директор, ВСЕГЕИ¹. <OPetrov@vsegei.ru>

Шатов Виталий Витальевич – канд. геол.-минерал. наук, директор, Центр прогнозно-металлогенических исследований, ВСЕГЕИ¹. <vitaly_shatov@vsegei.ru>

Ханчук Александр Иванович – академик РАН, доктор геол.-минерал. наук, науч. руководитель, ДВГИ ДВО РАН². <axanchuk@mail.ru>

Иванов Владимир Викторович – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, руководитель лаборатории, ДВГИ ДВО РАН². <d159327@yandex.ru>

Змиевский Юрий Петрович – канд. геол.-минерал. наук, вед. специалист, ВСЕГЕИ¹. <yuri_zmievskii@vsegei.ru>

Шпикерман Владимир Иосифович – доктор геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <vladimir_shpikerman@vsegei.ru>

Петров Евгений Олегович – канд. геол.-минерал. наук, директор, Центр морской геологии, литогеодинимики и минерагении осадочных бассейнов, ВСЕГЕИ¹. <evgeniy_petrov@vsegei.ru>

Снежко Виктор Викторович – канд. геол.-минерал. наук, директор, Центр информационных технологий по региональной геологии и металлогении, ВСЕГЕИ¹. <viktor_snezhko@vsegei.ru>

Шманяк Антон Васильевич – вед. геолог, Центр морской геологии, литогеодинимики и минерагении осадочных бассейнов, ВСЕГЕИ¹. <anton_shmanyak@vsegei.ru>

Молчанов Анатолий Васильевич – доктор геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ¹. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Халенев Владимир Олегович – канд. геол.-минерал. наук, директор, Центр научно-методического и организационного обеспечения государственного геологического картографирования, ВСЕГЕИ¹. <vladimir_khalenev@vsegei.ru>

Шатова Надежда Витальевна – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <narlin.ros@mail.ru>

Родионов Николай Викторович – канд. физ.-мат. наук, зав. сектором, Центр изотопных исследований, ВСЕГЕИ¹. <nickolay_rodionov@vsegei.ru>

Беляцкий Борис Владимирович – вед. инженер, Центр изотопных исследований, ВСЕГЕИ¹. <bbelyatsky@mail.ru>

Сергеев Сергей Андреевич – канд. геол.-минерал. наук, директор, Центр изотопных исследований, ВСЕГЕИ¹. <sergey_sergeev@vsegei.ru>

Petrov Oleg Vladimirovich – Corresponding Member of RAS, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Doctor Economic Sciences, Director General, VSEGEI¹. <OPetrov@vsegei.ru>

Shatov Vitaliy Vitalievich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of Prognostic-Metallogenic Research, VSEGEI¹. <vitaly_shatov@vsegei.ru>

Khanchuk Alexander Ivanovich – Academician of RAS, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Research Supervisor, FEGI FEB RAS². <axanchuk@mail.ru >

Ivanov Vladimir Victorovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Scientist, Head of Laboratory, FEGI FEB RAS². <d159327@yandex.ru>

Zmievskiy Yuriy Petrovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Expert, VSEGEI¹. <yuri_zmievskii@vsegei.ru>

Shpikerman Vladimir Iosifovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Scientist, VSEGEI¹. <vladimir_shpikerman@vsegei.ru>

Petrov Evgeniy Olegovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of marine geology, lithogeodynamics and metallogeny of sedimentary basins, VSEGEI¹. <evgeniy_petrov@vsegei.ru>

Snezhko Viktor Viktorovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of informational technologies on regional geology and metallogeny, VSEGEI¹, <viktor_snezhko@vsegei.ru>

Shmanyak Anton Vasilyevich – Leading Geologist, Centre of marine geology, lithogeodynamics and metallogeny of sedimentary basins, VSEGEI¹. <anton_shmanyak@vsegei.ru>

Molchanov Anatoly Vasilyevich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI¹. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Khalenev Vladimir Olegovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of scientific-methodological and organizational support of State geological mapping, VSEGEI¹. <vladimir_khalenev@vsegei.ru>

Shatova Nadezhda Vitalievna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, VSEGEI¹. <narlin.ros@mail.ru>

Rodionov Nikolay Viktorovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Sector, Centre of Isotopic Research, VSEGEI¹. <nickolay_rodionov@vsegei.ru>

Belyatskiy Boris Vladimirovich – Leading Engineer, Centre of Isotopic Research, VSEGEI¹. <bbelyatsky@mail.ru>

Sergeev Sergey Andreevich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of Isotopic Research, VSEGEI¹. <sergey_sergeev@vsegei.ru>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.

² Дальневосточный геологический институт ДВО РАН (ДВГИ ДВО РАН). Пр. 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, Россия, 690022.

Far East Geological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (FEGI FEB RAS). 159 Prospect 100-Letya Vladivostoka, Vladivostok, Russia, 690022.

Состоялось открытие памятника Е. А. Козловскому



12 мая 2023 г. на Троекуровском кладбище состоялась церемония открытия памятника Евгению Александровичу Козловскому – министру геологии СССР (1975–1989), заслуженному деятелю науки и техники РСФСР, крупному ученому, внесшему бесценный вклад в развитие отечественной геологической отрасли.

В церемонии открытия приняли участие Министр природных ресурсов и экологии Российской Федерации А. А. Козлов, руководитель Федерального агентства по недропользованию Е. И. Петров, вдова Е. А. Козловского Эльза Сергеевна Козловская, члены семьи и друзья, представители вузов, Российской академии наук, геологических музеев, компаний-недропользователей, подведомственных и геологических организаций.

С именем Евгения Александровича Козловского (7.05.1929–20.02.2022 гг.) связана эпоха интенсивного развития минерально-сырьевой базы СССР, геологической науки, масштабный научно-технический прогресс в отрасли и техническое перевооружение геологоразведочного производства.

В 1973 г. Е. А. Козловский встал во главе Всесоюзного научно-исследовательского института

экономики минерального сырья и геологоразведочных работ (ВИЭМС). Успешно решая производственные и научные проблемы, возглавляя различные крупные институты и подразделения Министерства геологии страны, он заслуженно завоевал известность и славу талантливого организатора.

В 1975 г. Е. А. Козловский был назначен министром геологии СССР. На период его руководства Министерством приходятся крупные открытия многих видов полезных ископаемых, существенно обогативших нашу Родину. Минерально-сырьевой потенциал страны вырос в 2 раза.

Это время по праву называют золотым веком геологии, а Евгения Александровича – легендой геологической отрасли. Е. А. Козловский лично принимал участие в открытии месторождений таких важнейших видов минерального сырья, как нефть в Западной Сибири, алмазы близ Архангельска, олово на Дальнем Востоке России. При его участии был основан мощный, хорошо оснащенный флот отрасли, базу которого сформировали на Чёрном море, в Мурманске и Владивостоке. По инициативе Козловского в правительственном масштабе была утверждена научно-практическая система исследования недр «Космос – воздух – земля – скважина», которая вывела их изучение на новый научный уровень. Благодаря применению принципиально новой отечественной технологии, научных методов управления и организации работ оказалась возможной проходка уникальной Кольской сверхглубокой скважины.

За большой вклад в развитие минерально-сырьевой базы страны Козловский удостоен звания лауреата Ленинской (1964 г.) и Государственных премий РФ (1998 и 2002 г.), почетных званий «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР», «Заслуженный геолог России», «Почетный разведчик недр», «Почетный нефтяник», «Почетный работник газовой промышленности», «Почетный работник угольной промышленности». Он награжден орденами Ленина и Трудового Красного Знамени, «Знак Почета», «За заслуги перед Отечеством» III и IV степеней, знаком «Шахтерская слава» трех степеней. Е. А. Козловский избирался депутатом Верховного Совета СССР (1976–1989 гг.), кандидатом в члены ЦК КПСС (1976–1989 гг.), членом ЦК профсоюза рабочих геологоразведочных работ.

Благодаря высокому авторитету в геологии и обществе, основанному на огромном жизненном опыте, объективности, честности и смелости суждений, твердой гражданской позиции, бескорыстном служении Родине, Евгений Александрович Козловский входит в плеяду выдающихся геологов

России и навсегда останется в истории российской геологии. Его кончина – это огромная утрата для всей страны.

По инициативе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации и Федерального агентства по недропользованию в ближайшие годы будет реализован ряд мероприятий, направленных на увековечивание памяти Е. А. Козловского. В частности будут установлены мемориальные доски на фасаде здания

Минприроды и на здании школы, где учился Е. А. Козловский; создана мемориальная экспозиция в Государственном геологическом музее им. В. И. Вернадского и в Российском государственном геологоразведочном университете им. Серго Орджоникидзе; выпущен документальный фильм. Также имя министра геологии Е. А. Козловского будет присвоено одному из крупнейших месторождений нефти Западной Сибири и Дальнего Востока.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Порядок направления, рецензирования и опубликования статей

Редакция в своей деятельности руководствуется правилами издательской этики и предотвращения недобросовестной практики публикаций. Перед отправкой рукописи в редакцию автору необходимо ознакомиться с условиями опубликования статьи в журнале, в том числе с данными Правилами для авторов и Этическими принципами научных публикаций, размещенными на сайте журнала.

Статьи должны соответствовать профилю журнала. К рукописи статьи прилагаются сопроводительное письмо организации и акт экспертизы (для русскоязычных статей) о возможности публикации в открытой печати. Статья должна быть предоставлена в издательство в двух вариантах: для рецензентов (см. п. 10) и редакции (см. пункты 1, 5, 7, 8) – с целью дальнейшего опубликования в журнале после внесения всех необходимых замечаний и исправлений.

Редакция осуществляет рецензирование всех поступивших материалов с целью их экспертной оценки. Окончательное решение принимает редколлегия, опираясь на результаты независимого рецензирования. Рецензии хранятся в редакции журнала в течение 5 лет. При поступлении запроса редакция направляет копию рецензии в Министерство образования и науки РФ. Статьи, требующие доработки, высылаются авторам. Если статья

не принимается редколлегией к публикации, редакция журнала направляет авторам мотивированный отказ. Оригиналы статей не возвращаются.

Статьи от зарубежных авторов принимаются и публикуются на английском языке. Фамилия, имя, название статьи, аннотация, ключевые слова, список литературы должны быть представлены на двух языках – английском и русском.

Статья должна быть подписана автором (соавторами) перед списком литературы. К статье обязательно прилагаются сведения обо всех авторах на русском и английском языках: фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, ученое звание, должность, полное название организации, ее почтовый адрес, e-mail автора.

Плата за публикацию с авторов (в том числе аспирантов и соискателей) не взимается. Гонорары не выплачиваются.

Требования к оформлению авторских оригиналов статей

При подготовке статей редакция просит авторов руководствоваться следующими правилами:

1. Максимальный объем статьи не более 40 страниц, включая таблицы, графику и список литературы (или объем текста, равный 40 тыс. знаков (с пробелами), графических материалов – 3000 см²).

Статья (с индексом УДК) должна быть представлена на электронном носителе (CD, эл. почта, сеть) в формате Word Document (*.doc) с желательным приложением распечатки в одном экземпляре на бумаге формата А4.

2. Распечатка должна полностью соответствовать электронной версии. Шрифт текста Times New Roman, размер 12 пт, междустрочный интервал 1,5, абзацный отступ 1,25 см, форматирование по ширине, все поля по 20 мм. Страницы статьи должны быть пронумерованы.

Автор (соавторы) обязательно подписывает бумажную распечатку после предоставленных

о себе на русском и английском языках сведений (фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, ученое звание, должность, полное название организации и ее почтовый адрес, e-mail, контактный телефон).

3. К статье обязательно прилагается аннотация (не более 10 строк) и ключевые слова (не более 5–7) на двух языках – русском и английском. Фамилия, имя и место работы автора, название статьи также даются на двух языках.

4. При наборе недопустимо использование пробелов или табуляции вместо абзацных отступов, а также двойных (тройных и т. д.) пробелов между словами в тексте. Приводимые единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

Заголовки внутри статьи можно размещать по центру. Допускаются выделения полужирным или курсивным шрифтом. Для всего текста используются кавычки одного типа («елочки»).

Сложные формулы или отсутствующие в шрифте Arial символы следует вносить вручную. Для набора математических формул и химических символов рекомендуется использовать редактор формул Microsoft Equation. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в последующем тексте.

5. Каждый рисунок или таблица предоставляется отдельным файлом. Содержащие их файлы нумеруются в том порядке, в каком будут располагаться в тексте: например, Рис. 01, Рис. 02, Табл. 1, Табл. 2 и т. д. Рисунки, схемы, таблицы должны иметь свою сквозную нумерацию и ссылки в тексте, например (рис. 1) или (табл. 7).

6. Таблицы набираются шрифтом Arial, размер 9 пт, через один интервал и обязательно должны иметь название; слова в названиях таблиц не сокращаются. Максимальный размер таблицы не должен превышать формат журнальной полосы – 17×25 см. Однотипные таблицы строятся одинаково.

7. Каждый рисунок предоставляется отдельно без вложения в документ Word, без компрессии (сжатия) в форматах *.cdr (графический редактор Corel Draw до версии 15.0), *.eps, *.tif или *.jpg (в параметрах изображения качества выбирается наилучшее – 12). Фотографии и полутонные иллюстрации выполняются с разрешением не менее 300 dpi. Векторные иллюстрации передаются в формате файла графического редактора, в котором они были подготовлены, или в формате *.eps, и имеют разрешение не ниже 600 dpi. В случае предоставления рисунков с меньшим разрешением, автор дает письменное подтверждение об отсутствии претензий по их качеству.

Диаграммы должны быть выполнены только в графическом редакторе (не в Microsoft Office).

Размеры букв и цифр на рисунках должны быть не менее 2 мм, толщина линий – не менее 0,2 мм. Рекомендуется использовать стандартные шрифты (Arial, Symbol). При использовании специальных шрифтов автор передает их в отдельной папке одновременно со всеми материалами.

Цветные графические материалы должны быть ориентированы на четырехкрасочную печать (СМУК). Использование красок типа PANTONE не допускается. Черный цвет шрифта и линий всегда задается параметром 100 % Black.

Оригиналы рисунков должны иметь размеры по ширине, соответствующие их информативности: 8 см (на одну колонку) либо 17 см

(на две колонки), по высоте не превышать 25 см.

8. Все подрисовочные подписи предоставляются в отдельном текстовом файле. Подпись должна содержать слово «Рис.», номер рисунка и после точки его название.

9. Список литературы (не более 25–30 названий) составляется в алфавитном порядке и нумеруется. Публикации отечественных авторов в иностранной печати приводятся в списке иностранных работ. При ссылке в тексте на источник литературы указывается только его порядковый номер, заключающийся в квадратных скобки.

Не допускаются ссылки на неопубликованные работы (отчеты, авторефераты, диссертации и пр.), учебники, ГОСТы, ТУ и т. п. Ссылка на электронный источник оформляется как полнотекстовая ссылка с примечанием в скобках даты просмотра. Пример: (дата обращения: 28.07.2022).

После списка литературы на русском языке приводится его транслитерация латиницей.

10. К файлам текста, подрисовочным подписям и рисункам прикладывается единый файл в формате pdf, в котором рисунки с подрисовочными подписями и таблицы завершаются в текст по месту ссылок на них или помещаются в конец статьи.

11. Рекомендуем авторам ознакомиться с основными ГОСТами по издательскому делу, согласно которым оформляется любая рукопись:

– ГОСТ 7.89-2005 «Оригиналы текстовые авторские и издательские. Общие требования»;

– ГОСТ Р 7.0.83-2013 «Электронные издания. Основные виды и выходные сведения»;

– ГОСТ Р 7.0.100-2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления»;

– ГОСТ Н 7.80-2000 «Библиографическая запись. Заголовок. Общие требования и правила составления»;

– ГОСТ Р 7.0.12-2011 «Библиографическая запись. Сокращение слов и словосочетаний на русском языке. Общие требования и правила»;

– ГОСТ 7.11-2004 «Библиографическая запись. Сокращение слов и словосочетаний на иностранных европейских языках»;

– ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»;

– ГОСТ 7.79-2000 «Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом».

Адрес редакции: 199106, Санкт-Петербург, Средний пр., д. 74

Журнал «Региональная геология и металлогения»

Телефон редакции: 328-90-90 (доб. 23-23, 24-24). E-mail: izdatel@vsegei.ru