

Вестник Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

Серия 4

ГЕОЛОГИЯ

ТОМ 63 • № 2 • 2024 • МАРТ–АПРЕЛЬ

Издательство Московского университета

Выходит один раз в два месяца

СОДЕРЖАНИЕ

Дергачев А.Л., Шемякина Е.М. Запасы критического минерального сырья и дополнительные потребности в нем в эпоху энергетического перехода	3
Барабощин Е.Ю. Первая находка аммонита в верхнем сеномане (верхний мел) Крыма ..	17
Коротаев М.В., Правикова Н.В., Фокин П.А., Тверитинова Т.Ю., Чижова Е.Р., Кизяков А.И., Лыгина Е.А. Геомеханическое моделирование трещиноватости разреза горы Сувлу-Кая, Юго-Западный Крым	23
Тверитинова Т.Ю., Маринин А.В., Бондарь И.В. Особенности строения Пшихско-Адлерской флексурно-разрывной зоны Большого Кавказа по данным структурных исследований	32
Лыков Н.А., Закирьянов И.Г., Дронов А.В., Ростовцева Ю.В. Строение нижнеордовикских строматолитовых биогермов в опорном разрезе р. Мойеро (Тунгусская Синеклиза, Восточная Сибирь)	45
Бурмистров А.А., Самсонов А.А., Тельнов А.Е. Эколого-экономические аспекты разработки природных и связанных с ними техногенных рудных месторождений на примере джидинского вольфрам-молибденового комбината, Республика Бурятия ..	54
Лысенко В.И., Полудеткина Е.Н., Садыков С.А., Басырова С.И. Новые данные исследования холодных сипов и пляжных бактериальных построек в бухте Ласпи (южный берег Крыма)	65
Шишина П.Н., Большакова М.А., Соболева Е.В. Геолого-геохимическая история формирования состава нефти залежи покурской свиты Русского месторождения Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна	75
Овсянников Г.Н., Спиридонов Э.М., Филимонов С.В. Плагитоклаз интрузивных пород островодужного первомайско-аюдагского комплекса Горного Крыма — от плагитолерцолитов до плагиогранитов	85
Дроздова О.Ю., Алешина А.Р., Макарова М.А., Демин В.В., Липицкий С.А. Динамика трансформации коллоидов железа в болотных водах под влиянием биоты и инсоляции	96
Луканов Д.Д., Расторгуев И.А., Юрьев С.В. Оценка геофильтрационных параметров на основе одновременной калибровки серии профильных моделей	101
Кошурников А.В., Алексеев Д.А., Пушкарев П.Ю., Гунар А.Ю., Балихин Е.И. Теоретический анализ применения шумоподобных сигналов в морской импульсной электроразведке	108
Трофимов В.Т., Королев В.А., Харькина М.А. Экологические функции как фундаментальные интегральные характеристики особенностей абиотических сред экосистем — литосферы, педосферы, атмосферы и гидросферы	119
Кулешова М.Л., Шимко Т.Г., Данченко Н.Н., Дроздова О.Ю. Оценка эффективности применения пероксида кальция для очистки фильтрационных вод полигонов ТКО	129
Куликов В.А., Варенцов И.М., Иванов П.В., Ионичева А.П., Колодяжный С.Ю., Лозовский И.Н., Родина Т.А., Слинчук Г.Е., Яковлев А.Г. Результаты глубинных магнитотеллурических исследований по профилю Пушкинские Горы — Андреаполь	136

CONTENTS

<i>Dergachev A.L., Shemyakina E.M.</i> Reserves of critical mineral materials and additional demand for them in era of energy transition	3
<i>Baraboshkin E.Yu.</i> The first record of an ammonite in the upper Cenomanian (Upper Cretaceous) of the Crimea	17
<i>Korotaev M.V., Pravikova N.V., Fokin P.A., Tveritinova T.Yu., Chizhova E.R., Kizyakov A.I., Lygina E.A.</i> Geomechanical fracture modeling of the Suvlu-Kaya Mountain section, South-West Crimea	23
<i>Tveritinova T.Yu., Marinin A.V., Bondar I.V.</i> Structural features of the Pshekha-Adler fault zone of the Greater Caucasus according to structural studies	32
<i>Lykov N.A., Zakiryanov I.G., Dronov A.V., Rostovtseva Yu.V.</i> Lower Ordovician Stromatolites from the key Moyero section (Tunguska Syncline, Eastern Siberia)	45
<i>Burmistrov A.A., Samsonov A.A., Telnov A.E.</i> Ecological and economic aspects of the development of natural and associated technogenic ore deposits using the example of the Dzhida tungsten-molybdenum plant, Republic of Buryatia	54
<i>Lysenko V.I., Poludetkina E.N., Sadykov S.A., Basyrova S.I.</i> New data on cold seeps and beach bacterial structures study in Laspi Bay (Southern coast of Crimea)	65
<i>Shishina P.N., Bolshakova M.A., Soboleva E.V.</i> Geological and geochemical history of the formation of the oil composition of the Pokurskaya formation of the Russian deposit of the West Siberian oil and gas basin	75
<i>Ovsyannikov G.N., Spiridonov E.M., Filimonov S.V.</i> Plagioclase of intrusive rocks from the islandarc pervomay-ayudag complex (Mountain Crimea) — from plagioclazolites to plagiogranites	85
<i>Drozdova O.Yu., Aleshina A.R., Makarova M.A., Demin V.V., Lapitskiy S.A.</i> Dynamics of transformation of iron colloids in mire waters under the influence of biota and insolation	96
<i>Lukanov D.D., Rastorguev I.A., Yurev S.V.</i> Estimation of groundwater flow parameters based on simultaneous calibration for a series of vertical planar models	101
<i>Koshurnikov A.V., Alekseev D.A., Pushkarev P.Yu., Gunar A.Yu., Balikhin E.I.</i> Theoretical analysis of the application of pseudo-noise signals in marine pulse electromagnetic prospecting ...	108
<i>Trofimov V.T., Korolev V.A., Kharkina M.A.</i> Ecological functions as a fundamental integral characteristics of peculiarities of abiotic environments of ecosystem — lithosphere, pedosphere, atmosphere and hydrosphere	119
<i>Kuleshova M.L., Shimko T.G., Danchenko N.N., Drozdova O.Yu.</i> Effectiveness assessment of using calcium peroxide to purify landfill leachate from contaminants	129
<i>Kulikov V.A., Varentsov I.M., Ivanov P.V., Ionicheva A.P., Kolodyazhny S.Yu., Lozovsky I.N., Rodina T.A., Slinchuk G.E., Yakovlev A.G.</i> Results of deep magnetotelluric surveys along the Pushkinskiye Gory — Andreapol profile	136

УДК 553.04

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-3-16

ЗАПАСЫ КРИТИЧЕСКОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТРЕБНОСТИ В НЕМ В ЭПОХУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА

Александр Лукич Дергачев^{1✉}, Елизавета Михайловна Шемякина²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alderg51@yandex.ru ✉

² Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; shemyakina_em@pfur.ru

Аннотация. На основе компьютерной модели выполнена оценка будущей дополнительной потребности в минеральных материалах для производства ветровых турбин, солнечных панелей, систем накопления и хранения электроэнергии и электромобилей, необходимых для реализации сценария перехода к малоуглеродной энергетике, предложенного Международным энергетическим агентством. Спрос на некоторые критически важные металлы и индустриальные минералы был сопоставлен с их имеющимися промышленными запасами и ресурсами. Поставки критического минерального сырья для некоторых технологий энергетического перехода могут явиться новым вызовом устойчивому развитию минерально-сырьевой базы мировой экономики, а в перспективе оказаться сдерживающим фактором в использовании возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: энергетический переход, возобновляемые источники энергии, критическое минеральное сырье, запасы минерального сырья, минеральные ресурсы

Для цитирования: Дергачев А.Л., Шемякина Е.М. Запасы критического минерального сырья и дополнительные потребности в нем в эпоху энергетического перехода // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 3–16.

RESERVES OF CRITICAL MINERAL MATERIALS AND ADDITIONAL DEMAND FOR THEM IN ERA OF ENERGY TRANSITION

Alexander L. Dergachev^{1✉}, Elizaveta M. Shemyakina²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alderg51@yandex.ru ✉

² RUDN University, Moscow, Russia; shemyakina_em@pfur.ru

Abstract. Based on a computer model, an assessment was made of the future additional demand for minerals for the production of wind turbines, solar panels, energy storage systems and electric vehicles necessary to implement the IEA 2DS scenario for the transition to low-carbon energy. Demand for some critical metals and industrial minerals has been compared to their available economic reserves and resources. The supply of critical mineral materials for some energy transition technologies may pose a new challenge to the sustainable development of the mineral base of the world economy, and in the future become a deterrent to the use of renewable energy sources.

Keywords: energy transition, renewable energy sources, critical mineral materials, reserves of mineral raw materials, mineral resources

For citation: Dergachev A.L., Shemyakina E.M. Reserves of critical mineral materials and additional demand for them in era of energy transition. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 3–16. (In Russ.).

Введение. В ноябре 2022 г. истекли шесть лет после вступления в силу Парижского соглашения по климату. Согласно Ст. 2, его целью является активизировать осуществление Рамочной конвенции ООН по изменению климата, и в частности, удержать рост глобальной средней температуры «намного ниже» 2°C сверх доиндустриальных уровней и «приложить усилия» для ограничения роста температуры величиной 1,5°C [Парижское ..., 2016].

Для достижения этой цели 196 сторон Соглашения обязались стремиться к прохождению пика глобальной эмиссии парниковых газов «настолько скоро, насколько это окажется возможным» и к построению климатически нейтрального мира к 2050 г.

По данным Международного энергетического агентства (IEA), в 2017 г. 41% эмиссии углекислого газа в атмосферу (13,6 млрд т в год) был обусловлен применением ископаемого топлива (уголь, нефть, природный газ) в электрогенерации [IEA, 2019]. Это делает актуальной задачу построения декарбонизированной экономики. Как следствие, в гражданском обществе и средствах массовой информации нередко высказывается мнение, что в низкоуглеродном будущем минеральные ресурсы будут постепенно утрачивать свое бывшее значение.

Однако анализ показывает, что «зеленая» энергетика, основанная на возобновимых источниках энергии (ВИЭ), характеризуется намного большей

емкостью в отношении минеральных материалов (металлов, промышленных минералов), чем тепловая электроэнергетика. В связи с этим переход к преимущественно низкоуглеродным источникам энергии должен быть поддержан увеличением добычи по крайней мере некоторых видов полезных ископаемых, а следовательно, увеличением нагрузки на невозобновляемые минеральные ресурсы. Любое замедление в динамике их запасов и отставание темпов роста добычи критически важных видов минерального сырья от спроса на них, возрастающего в связи с энергетическим переходом, означало бы уменьшение их предложения на мировом рынке. Следствием стали бы не только замедление темпов роста и масштабов использования тех или иных видов генерации, альтернативных тепловой электроэнергетике, но и возросшие риски в достижении целей Парижского соглашения, ограничение доступа к электроэнергии для значительной части человечества и угроза энергетической безопасности.

Публикации, в которых рассматриваются ближайшие последствия дополнительного потребления минеральных материалов, связанного с переходом к низкоуглеродной энергетике в 2021–2050 гг., пока еще немногочисленны и оставляют много вопросов. В них анализируются в основном будущие потребности некоторого комплекса «чистых» энергетических технологий в минеральных материалах, но не сама возможность их удовлетворения и не цена, которую придется заплатить за нее. В этом смысле они скорее представляют собой сигнал для инвесторов относительно будущего спроса на продукцию горнодобывающей промышленности. В то же время примеры инженерных расчетов, тем более анализа геологами достаточности существующей мировой минерально-сырьевой базы (МСБ) для удовлетворения будущего спроса на минеральное сырье, практически отсутствуют.

В предыдущих работах авторов уже рассматривался вопрос о том, какие именно минеральные материалы будут играть ключевую роль в развитии тех или иных технологий энергетического перехода [Дергачев, Шемякина, 2023]. Целью данного исследования является определить, в каких количествах они будут востребованы альтернативной энергетикой будущего, а также в какой мере нынешнее состояние мировой минерально-сырьевой базы экономики адекватно возрастающим потребностям в первичном минеральном сырье.

Основные предположения и методика расчетов потребления минерального сырья. Низкоуглеродная энергетика в период с 2021 по 2050 гг. в дальнейшем анализе рассматривается как условно-замкнутая система. В ней на фоне роста установленной мощности электрогенерации, емкости систем для накопления и хранения электроэнергии (СНЭ) и численности электромобилей изменяются технологии, соотношения между субтехнологиями и их металлоемкость. В конце службы соответствующих

устройств образуется определенное количество лома, из которого извлекается часть металлов, и вторичные металлы полностью используются в этой же системе.

Для достижения целей исследования была разработана компьютерная модель, которая позволяла рассчитывать потребление промышленных минералов и металлов в электрогенерации, СНЭ и электромобильном транспорте как относящееся к определенному году, так и суммарное за 2021–2050 гг.

Составление модели потребовало выбора технологий и субтехнологий, которые обеспечивали бы выполнение выбранного сценария энергетического перехода и определения соотношения между ними. Вводимые в модель исходные данные включали прежде всего возрастающие со временем установленные мощности электрогенерации каждого вида, суммарную емкость разнообразных СНЭ и количество электромобилей в каждый год рассматриваемого периода. Для каждой из выбранных технологий был определен перечень минеральных материалов, имеющих критическое значение. Учитывалось также удельное потребление материалов в разнообразных технологиях, срок службы устройств для генерации, накопления и хранения энергии и электромобилей, доля металлов в составе лома, извлекаемая для повторного использования. Вместе с тем модель предусматривает возможность учета изменений в соотношениях между субтехнологиями и их удельной материалоемкости в рассматриваемый период.

Выбор сценария перехода к низкоуглеродной электроэнергетике из известных в настоящее время [World Bank, 2017] при составлении модели имел принципиальное значение. Наиболее широко обсуждаемые сценарии разработаны Международным энергетическим агентством (IEA) (сценарии 4DS, 2DS, RTS, B2DS) [IEA, 2016, 2017] и Международным агентством по возобновляемым источникам энергии (IRENA) (сценарии Ref и REmap) [IRENA, 2019]. Важнейшим различием между сценариями является верхний предел роста средней глобальной температуры к 2100 г. Наиболее амбициозными являются сценарии B2DS (1,75 °C) и REmap («намного ниже 2 °C»). Сценарий 4DS нередко используется для сравнения с другими [World Bank, 2020], он предусматривает сохранение нынешнего тренда в электроэнергетике и вообще не требует практически никакого сдвига в сторону ВИЭ. Кроме того, сценарий 4DS и оба сценария IRENA учитывают лишь изменения в производстве электроэнергии, требуемые для выполнения Парижского соглашения, но не в СНЭ или электромобильном транспорте.

В дальнейшем анализируется сравнительно консервативный сценарий IEA 2DS, в котором рост средней глобальной температуры с 50%-ной вероятностью не превысит 2 °C до 2100 г. [World Bank, 2020]. При этом предполагается рост установленной мощности электрогенерации в мире с 7576 ГВт в 2020 г. примерно до 14 000 ГВт в 2050 г. при одновременном

увеличении доли ВИЭ с 37% до 74% установленной мощности электрогенерации [World Bank, 2017; IRENA, 2021] (рис. 1). Кроме того, в этом сценарии в 2021–2050 гг. должна быстро возрасти глобальная емкость стационарных и мобильных аккумуляторных систем, а также численность гибридов и электромобилей.

Количество разнообразных минеральных материалов, которые могут дополнительно потребоваться в связи с переходом к технологиям «зеленой» энергетики, в модели определялось по годам отдельно для каждой технологии и субтехнологии и для каждого из используемых в них металлов и промышленных минералов.

Выбор технологий основывался на предположении, что до 2050 г. в электрогенерации, накоплении и хранении электроэнергии и электрическом транспорте будут использоваться технологии и субтехнологии, известные в 2020 г., хотя, возможно, и в изменяющихся пропорциях. Поскольку предугадать соотношения между ними не представляется возможным, результаты моделирования следует рассматривать как иллюстративные. При этом по сценарию IEA 2DS в 2021–2050 гг. значительно возрастет установленная мощность солнечной и ветровой электрогенерации (примерно в 6,2 и 4,2 раза соответственно).

В ветроэнергетике моделью предусмотрено изменение соотношений между двумя субтехнологиями. Доля высоко-среднескоростных установок с редукторами в 2020 г. составляла 80% из 732 ГВт установленной мощности ветровой электрогенерации [IRENA, 2020]. Согласно сценарию 2DS она будет возрастать на 4,7% в год и в 2050 г. ее доля составит 75% (табл. 1). Установленная мощность генерации ветрогенераторов с прямым приводом, использующих сильные постоянные магниты, в течение 30 лет (2021–2050 гг.) будет возрастать в среднем примерно на 5,7%. Такими же темпами предполагается и рост количества минеральных материалов, необходимых для расширения генерирующих мощностей в соответствующих субтехнологиях.

В фотовольтаике на солнечные панели из кристаллического кремния (с-Si) в 2020 г. приходилось 95% из 710 ГВт установленной мощности электростанций на солнечных батареях. Доли более тонких, легких, эффективных и дешевых солнечных элементов второго поколения, использующих в качестве полупроводниковых соединений аморфный кремний с изовалентной примесью Ge (a-SiGe), теллурид кадмия (CdTe) и диселенид меди-индия-галлия (CIGS), составляли примерно по 1,7%. В модели предполагается, что к 2050 г. на панели из кристаллического кремния будет приходиться 50% из 3780 ГВт установленной мощности электростанций на солнечных панелях (рост на 3,5% в год). Установленная мощность тонкопленочных панелей будет возрастать на 14,2% в год, при этом панели, использующие в качестве полупроводниковых со-

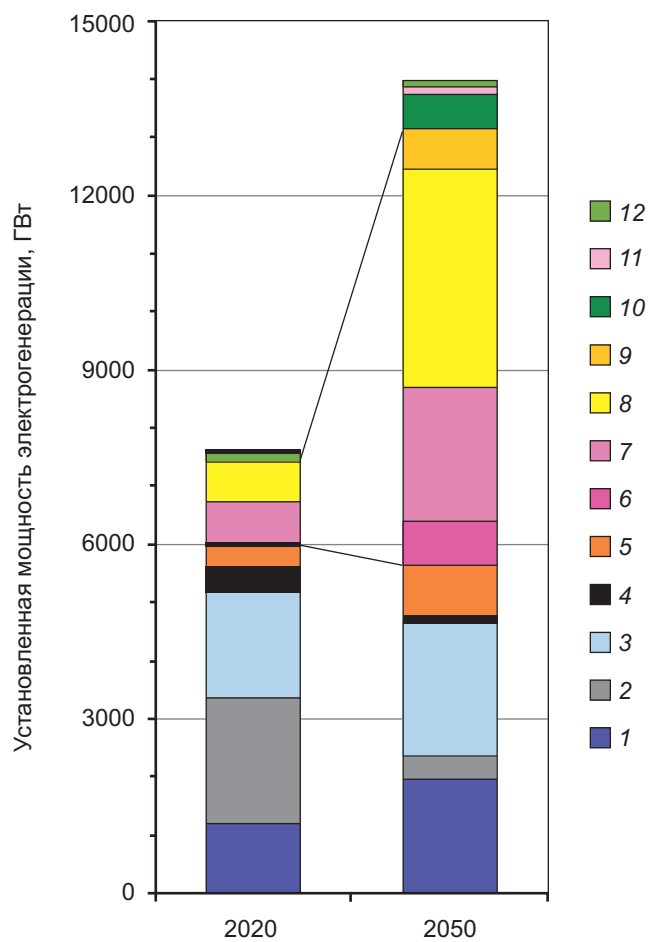


Рис. 1. Структура установленной мощности электрогенерации в мире в 2020 и 2050 гг. по сценарию IEA 2DS (по [IEA, 2016]). 1 — гидроэнергетика; 2–4 — тепловая электроэнергетика: 2 — уголь, 3 — природный газ, 4 — нефть; 5 — ядерная энергетика; 6–7 — ветровая энергетика: 6 — низкоскоростные турбины, 7 — высоко-среднескоростные турбины; 8–9 — гелиоэнергетика: 8 — солнечная фотовольтаика, 9 — концентрационные солнечные системы; 10 — биоэнергетика; 11 — геотермальная энергетика; 12 — приливная и волновая электроэнергетика

единений a-SiGe, CdTe и CIGS, будут вносить в нее равные доли (по 16,7%).

Предполагается, что в солнечной электрогенерации возрастающее распространение будут получать солнечные системы концентрирующего типа. В 2020 г. на долю оборудования с параболическими зеркалами и линейными отражателями Френеля приходилось соответственно 90% и 10% из 6,5 ГВт установленной мощности солнечных систем концентрирующего типа. Базовый вариант расчетов на основе модели предполагает, что в 2021–2050 гг. их установленная мощность будет возрастать на 16,7% в год и достигнет в конце периода 670 ГВт (15% установленной мощности солнечной электрогенерации) при сохранении соотношения 9:1 между субтехнологиями [IEA, 2016; 2017].

Для оценки материалоемкости низкоуглеродной энергетики важно, что использование электроэнергии из непостоянных источников требует исполь-

Таблица 1

Динамика развития технологий в альтернативной энергетике и смежных областях

Технологии / субтехнологии	Установленная мощность генерации ¹				Рост	
	2020		2050		%	
	ГВт	%	ГВт	%	в год	
Солнечная электрогенерация						
Солнечные панели всего	709,7	100	3780	100	5,7	
c-Si	674	95	1890	50	3,5	
CIGS	11,8	1,7	631,3	16,7	14,2	
CdTe	11,8	1,7	631,3	16,7	14,2	
a-Si	11,8	1,7	631,3	16,7	14,2	
Солнечные системы концентрирующего типа (CSP) всего	6,5	100	670	100	16,7	
	с параболическими зеркалами	5,8	90	603	90	16,7
	с линейными отражателями Фринеля	0,7	10	67	10	16,7
Ветровая электрогенерация						
Ветровые установки всего	732,4	100	3080	100	4,9	
	с высокоскоростными генераторами	585,9	80	2310	75	4,7
	с низкоскоростными генераторами	146,5	20	770	25	5,7
Накопление и хранение электроэнергии ²						
Технологии / субтехнологии	Суммарная емкость, ГВт-час				Рост (% в год)	
	2020		2050			
Автомобильные аккумуляторы, стационарные сетевые и децентрализованные аккумуляторные системы	2930		22270		7,0	
Электромобили ³						
Технологии / субтехнологии	Численность электромобилей, млн ед.			Рост (% в год)		
	2020	2030	2050			
Моторы и силовая электроника	12,9	150	1000	10–27,7 ⁴		

Примечания. ¹ По [World Bank, 2017]. ² По [IEA, 2017]. ³ По [Grandell et al., 2016]. ⁴ Нижний и верхний пределы диапазона отвечают периодам 2031–2050 гг. и 2021–2030 гг. соответственно.

зования систем накопления и хранения электроэнергии как стационарных (сетевых масштаба и децентрализованных), так и мобильных (для электромобилей и гибридов). Сценарий IEA 2DS потребует роста глобальной емкости аккумуляторов разных типов по мере перехода к ВИЭ с 4108 ГВт-час в 2025 г. до 22270 ГВт-час в 2050 г., причем 90% глобальной емкости СНЭ будет приходиться на мобильные аккумуляторы [World Bank, 2020; IEA, 2017]. Соответствующий темп роста (7,0% в год) в модели распространяется на весь период с 2021 по 2050 г.

Потребление металлов в СНЭ зависит от соотношения между применяемыми субтехноло-

гиями — типами аккумуляторов: использование кислотно-свинцовых аккумуляторов в настоящее время сокращается, а внедрение проточных окислительно-восстановительных батарей, использующих в качестве электролита раствор солей ванадия, только начинается. Поэтому в модели предусмотрено резкое доминирование Li-ионных автомобильных аккумуляторов и стационарных СНЭ. В 2020 г. на них приходилось 14,5% из 2930 ГВт-час глобальной емкости СНЭ всех типов (в том числе 5% емкости мобильных и 100% стационарных аккумуляторов). Однако в модели, начиная с 2021 г., доля Li-ионных устройств возрастает на 10% в год, и к 2031 г. они полностью вытеснят доминирующие в настоящее время свинцово-кислотные аккумуляторы.

Базовый вариант расчетов на основе модели предусматривает, что совокупная емкость применяемых в настоящее время литий-ионных аккумуляторов распределена неравными долями между литий-никель-марганец-кобальт-оксидными (60%), литий-марганец-оксидными (20%), литий-никель-кобальт-алюминий-оксидными (15%) и литий-железо-фосфатными аккумуляторами (5%) [Vaalma et al., 2018]. Данные об использовании минеральных материалов в аккумуляторах в литературе приводятся не для разных типов СНЭ, а только для нынешнего сочетания перечисленных субтехнологий (60:20:15:5). Модель по необходимости предусматривает сохранение до 2050 г. сложившегося к настоящему времени соотношения между субтехнологиями. Однако в одном из вариантов расчетов предусматривается постепенное вытеснение их требующими меньше цветных металлов Li-S аккумуляторами.

Анодным материалом в Li-ионных аккумуляторах служит графит, который потребляется в количестве 1000 т/ГВт-час емкости СНЭ. В настоящее время 45% всего применяемого для этих целей графита является природным сырьем, а остальные 55% получают искусственно путем многоэтапной термомеханической обработки состава из антрацитового или нефтяного кокса и пека. Синтезированное сырье по ряду причин предпочтительнее, однако масштабы замещения им природного графита трудно предсказуемы. В дальнейшем предполагается, что искусственное и природное сырье в течение всего рассматриваемого периода в любом варианте расчетов будут продолжать использоваться в соотношении 55:45.

В электромобилях критические материалы используются не только в аккумуляторах, но и в моторах, силовой электронике и кабелях. По данным IEA, в 2020 г. в мире насчитывалось 12,9 млн электромобилей. Согласно сценарию IEA 2DS, их численность возрастет до 150 млн к 2030 г. (рост в среднем на 27,7% в год в 2021–2030 гг.) и почти до 1000 млн к 2050 г. (рост на 10% в год в 2031–2050 гг.). Дополнительное количество металлов, используемых в электромобилях, зависит от мощности их двигателей. В электронной модели принято, что

Таблица 2

Потребление металлов в альтернативной энергетике и смежных областях

Солнечная электрогенерация ¹ (т / ГВт)														
Технологии / субтехнологии	Al	Cu	Ag	Ga	Ge	In	Se	Cd	Te	Pb	Zn	Mo	Sn	Сталь
Солнечные панели: c-Si a-Si CIGS CdTe	7500	4600	20 (4) ²							72,4			124,1	67900
	7500	4600			41 (13)	5,3							103,1	67900
	7500	4600		9 (2)		28 (7)	41 (17)	0,9	4,7		30,0	36,8	5,95	67900
	7500	4600	* ³	*		8		70 (19)	60 (17)	*	*		83,9	67900
Системы концентрирующего типа ⁴ параболические желоба отражатели Френеля														
	*		3,8											*
	*		13,8											*
Ветровая электрогенерация ¹ (т / ГВт)														
	Al	Cu	Cr	Ni	Mn	Dy	Pr	Nd	Tb	B	Zn	Mo	Чугун	Сталь
Средне-высокоскоростные турбины с редуктором	1500	1400	470	440	780	2	0	12	1	1	5500	99	18000	113000
Низкоскоростные турбины прямого привода	500	3000	525	240	780	27	35	180	7	6	5500	109	20100	119500
Накопление и хранение электроэнергии ⁴ (т / ГВт-час)							Электромобили и гибриды ⁵ (т / млн ед.)							
	Al	Cu	Li	Co	Ni	Mn	Dy	Pr	Nd	Tb	Ga	In	Ge	Ag
Стационарные и автомобильные Li-ионные аккумуляторы ⁶ , моторы и силовая электроника электромобили и гибриды	220	220	113 (411)	124 (0)	415(0)	406(0)	150	85	255	15	0,76	0,04	0,04	5

Примечания. ¹ По [Moss et al., 2011; Ohrlund, 2012; Nassar et al., 2016; World Bank, 2017; Dominish et al., 2019; et al., Carrara et al., 2020].
² В скобках указывается ожидаемое потребление материалов в 2050 г. ³ Опубликованные данные отсутствуют. ⁴ По [Dominish et al., 2019]. ⁵ По [Grandell et al., 2016]. ⁶ В скобках указывается потребление материалов в новой субтехнологии (литий-серных аккумуляторов).

в рассматриваемый период суммарные емкости аккумуляторов электромобилей малой (< 50 КВт) и повышенной (> 50 КВт) мощности, различающихся по металлоемкости [Grandell et al., 2016; Dominish et al., 2019], будут находиться в соотношении 50:50.

Срок службы электромобилей и устройств для генерации, накопления и хранения энергии является одним из важнейших факторов, определяющих потребление металлов в этих областях — его увеличение может привести к снижению металлоемкости альтернативной энергетики. Однако в дальнейшем предполагается, что в обозначенный период сроки службы оборудования останутся неизменными и составят для солнечных концентраторов и фотовольтаики 30 лет, ветровых установок — 20, электромобилей — 15, а для устройств накопления и хранения энергии, в том числе автомобильных аккумуляторов — 10 лет [World Bank, 2020].

Удельное потребление материалов в расчете на 1 ГВт установленной мощности электрогенерации или 1 ГВт-час емкости СНЭ, а также на один электромобиль в базовом варианте расчетов на основе электронной модели в 2021–2050 гг. принимается

постоянным. При этом используются усредненные значения металлоемкости, рассчитанные по опубликованным данным (табл. 2) [Moss et al., 2011; Ohrlund, 2011; Grandell et al., 2016; Dominish et al., 2019; Carrara et al., 2020]. Полученные оценки массы используемых материалов являются достаточно консервативными, а в конечном счете несколько завышенными, поскольку общая тенденция к снижению металлоемкости продукции должна затронуть и малоуглеродную энергетику. При строительстве ветровых парков в наибольших масштабах потребляются также обычные и относительно дешевые неметаллические материалы (тыс. т / ГВт): цемент (363,3), стеклоуглеродные композиты, синтетические материалы (4,6); при строительстве электростанций на солнечных панелях кроме цемента (60,7) и синтетического материала (8,6) применяется также стекло (46,4).

Использование ценных вторичных металлов по истечении сроков службы техники позволяет за счет сбора и переработки образующегося лома снизить потребность в первичном минеральном сырье, и таким образом, уменьшить нагрузку на недра. Од-

Таблица 3

Доля металлов, извлекаемая для повторного использования при переработке лома в конце срока службы оборудования (%), по [Grandell et al., 2016; Dominish et al., 2019]

Солнечные панели и системы концентрирующего типа	Все технологии							CIGS			CdTe		c-Si
	Al	Cu	Ag	Zn	Mo	Sn	Сталь, чугун	Ga	In	Se	Cd	Te	Pb
в настоящее время	77	34	45	14	30	73	48	0	0	0	77	77	94
к 2030 г.	81	81	81	14	30	73	48	81	81	81	81	81	94
Ветровые установки	Al	Cu	Dy	Pr	Nd	Tb	Mo	Mn	Cr	Ni	Zn		
в настоящее время	80	95	0	0	0	0	30	49	81	42	17		
к 2030 г.	95	95	95	70	80	50	30	49	81	95	95		
Аккумуляторы всех типов	Al	Cu	Li	Co	Ni	Mn							
в настоящее время	70	70	0	60	90	0							
к 2030 г.	95	95	60	95	95	95							
Электромобили	Dy	Pr	Nd	Tb	Ga	Ge	In	Ag					
в настоящее время	0	0	0	0	0	0	0	0					
к 2030 г.	95	70	80	50	81	0	81	81					

нако в настоящее время из отходов их производства в очень ограниченных масштабах извлекаются лишь некоторые важнейшие металлы, например, Ga, Te, Cd. Предполагается, что рентабельные технологии извлечения металлов из лома отслужившего свой срок оборудования могут появиться к 2030 г. Однако в базовом варианте расчетов считалось, что в 2021–2050 гг. сохранятся неизменными текущие показатели извлечения из лома важнейших для альтернативной энергетики металлов (Al, Cu, Ag, Ga, Ge, In, Se, Te, Cd, PЗЭ, Li, Co, Ni, Mn). Соответствующие данные, рассчитанные как произведение доли собираемого для переработки лома, на коэффициент извлечения некоторого металла при переработке этого лома, были собраны из публикаций (в частности, Grandell et al., 2016; Dominish et al., 2019) и приведены в табл. 3. При отсутствии аналогичных данных для некоторых других металлов (Mo, Zn, Fe, Pb, Sn, Cr, Ge) использованы усредненные сведения о доле этих металлов, извлекаемой из лома и используемой повторно в экономике в целом [Sibley, 2011].

Достаточность первичных ресурсов. Самый распространенный подход к оценке обеспеченности первичными минеральными материалами, применяемый в большинстве исследований по критическим металлам (в частности, [Speirs et al., 2015]), заключается в сравнении ожидаемой потребности в них с их глобальными запасами, извлекаемыми из недр при добыче, и глобальными ресурсами по данным на 2020 г. (например, по материалам Геологической службы США — USGS [Mineral, 2022]). Поскольку под запасами понимается часть ресурсов полезных ископаемых, отработка которой в настоящий момент экономически оправдана, оценки запасов могут меняться со временем по мере развития технологий, колебаний спроса и цен, а также под влиянием социальных и политических факторов.

Однако такой подход не учитывает, что не все 100% металла в запасах могут быть извлечены из до-

бытых руд при обогащении и из концентратов при металлургическом переделе. В результате масштабы дополнительного истощения недр при переходе к «зеленой» энергетике оказываются сильно недооцененными. Поэтому в дальнейшем полученные на основе модели результаты расчетов суммарного потребления минеральных материалов в технологиях альтернативной энергетики и глобальное (во всех отраслях) использование их в 2021–2050 гг. сравнивались с частью имевшихся в 2020 г. извлекаемых из недр запасов полезных ископаемых, которая может быть извлечена в товарную продукцию металлургического производства при нынешнем состоянии горных, обогатительных и металлургических технологий. С этой целью использовался усредненный коэффициент извлечения (R), получаемый как произведение извлечения металла в товарную продукцию при обогащении и извлечения металла из концентратов в товарную продукцию при металлургическом переделе. Вслед за [Zhang et al., 2021] для всех 24 видов полезных ископаемых, учтенных в исследовании, первый показатель принимается равным 0,90.

Для графита в связи с отсутствием металлургического передела использовалась поправка $R=0,9$. Для 17 металлов на основе данных USGS по рудничному и металлургическому производству первичных металлов (Pb, Zn, Cu, Ni, Co и др.) в 2014–2019 гг. установлено, что извлечение металлов из концентратов изменяется от 87,5% для Co до 98,7% для Zn, а среднее значение составляет около 94%. Таким образом, извлекаемая в конечную продукцию часть запасов рассчитывалась умножением промышленных извлекаемых при добыче запасов (по данным на 2020 г.) на коэффициент $R = 0,846$. Для 6 металлов, извлекаемых попутно из руд Zn, Cu и бокситов, соответствующие коэффициенты рассчитывались с учетом извлечения их в товарную продукцию металлургического производства, которое состав-

ляло (%) для Cd — 42, Ge — 1,1, In — 59, Se — 25,6, Te — 8,4, Ga — 1,6.

Глобальное потребление минеральных материалов в 2021–2050 гг. определялось сложением потребления некоторого вида сырья в «зеленой» энергетике и в остальных отраслях экономики. Первое слагаемое рассчитывалось на основе электронной модели. При этом учитывалось, что спрос на графит на 55% будет удовлетворяться за счет искусственного материала, а 30% необходимого Ge будет извлекаться как и в настоящее время из золы и зольных уносов от сжигания углей.

Потребление минерального сырья в остальных отраслях рассчитывалось методом экстраполяции по данным о рудничной добыче металлов и промышленных минералов до начала широкомасштабного строительства солнечных электростанций и ветровых парков. Так, потребление Ni возросло (% в год) на 2,1, Co — 2,6, Te — 5,7, Ga — 3,6, Ag — 2,3 и т.д. При этом средний темп роста их потребления в 2005–2015 гг. распространялся на весь период с 2021 до 2050 г.

Результаты моделирования и их обсуждение.

На основе составленной электронной модели были выполнены несколько вариантов расчетов, учитывающих перечисленные основные предположения. В качестве базового принят вариант, предусматривавший сохранение нынешних технологий, их металлоемкости, а также уровня использования вторичных металлов, достигнутых в 2020 г. Во втором варианте расчетов учитывалось постепенное повышение уровня использования вторичных металлов с 2030 г. (табл. 3), в третьем — снижение материалоемкости технологий, а в четвертом — возможный переход к использованию новых технологий (табл. 2).

Исследование модели показало, что распространение чистых энергетических технологий для достижения целей Парижского соглашения приведет к значительному повышению материалоемкости электрогенерации и электромобильного транспорта будущего, а значит, и мировой экономики в целом по сравнению с электроэнергетикой, основанной на ископаемом топливе, и транспортом с двигателями внутреннего сгорания.

Для реализации сценария IEA 2DS в 2021–2050 гг. требуется дополнительно израсходовать около 1963,1 млн т суммарно первичного и вторичного минерального сырья, а также искусственно получаемых материалов. Незначительную часть из них составляют (%) стеклоуглеродные композиты (1,0) и продукты органического синтеза (1,9), например, этиленвинилацетат (герметик). Для получения почти всех остальных материалов необходимо расширенное использование твердых полезных ископаемых, извлекаемых из недр Земли.

В количественном отношении среди материалов для «зеленой» энергетики резко доминируют цемент (1039 млн т, или 52,9%), сталь и чугун (581 млн т,

или 29,6%) и стекло (143 млн т, 7,2%). Однако для реализации сценария IEA 2DS в 2021–2050 гг. потребуется от 15 до 70 млн т цемента в год, т.е. от 0,4 до 1,7% его производства в 2020 г. За весь 30-летний период на нужды новых энергетических технологий будет израсходовано лишь 4% чугуна и менее 30% стали, произведенной только в 2020 г. При этом дополнительно потребуется извлечь из недр всего 1% огромных мировых запасов железа, представленных, в основном, очень крупными месторождениями железистых кварцитов. Остальные 5,8% массы материалов (113,3 млн т) приходятся на долю 22 черных (кроме Fe), цветных, редких и благородных металлов, различающихся по масштабам применения и роли в энергетическом переходе (рис. 2). На 90,7% это первичные металлы, извлекаемые из руд, и именно их запасы и добыча из недр (рудничная добыча) и будут анализироваться в дальнейшем (табл. 4).

На основе составленной электронной модели определялись потребности во всех перечисленных выше видах минерального сырья. Многие из них, в том числе Cu, Al, Cr, Mo, Mn, Sn будут востребованы в низкоуглеродных энергетических техно-

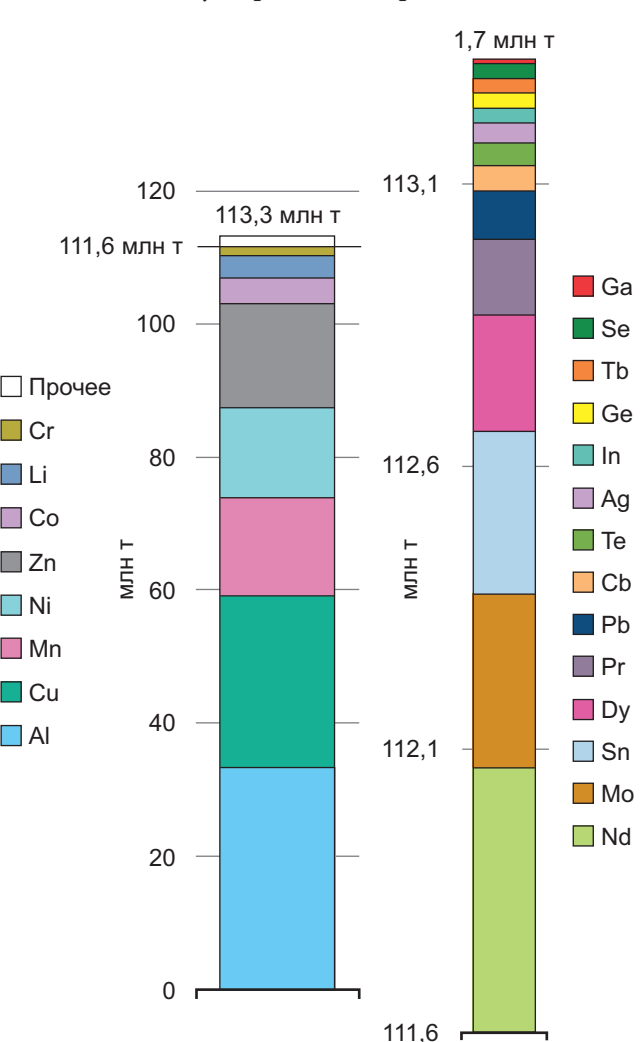


Рис. 2. Использование черных (кроме железа в стали и чугуне), цветных, редких и благородных металлов (суммарно первичных и вторичных) при реализации сценария IEA 2DS в 2021–2050 гг.

Таблица 4

Дополнительное потребление первичных минеральных материалов в связи с энергетическим переходом по сценарию IEA 2DS в 2021–2050 гг.

Металл / минерал	Мировые запасы ¹	Мировая рудничная добыча ² (2020)	Потребление первичного минерального сырья			
			2050		2021–2050	
	тыс. т	тыс. т	тыс. т	доля рудничной добычи в 2020 г. (%)	тыс. т	доля мировых извлекаемых запасов в 2020 г. (%)
Fe	85000000	1522559	43429	3	552543	0,8
Al	5984000	65352	2827	5	31058	0,6
Cu	880000	20788	2044	10	23463	3,2
Zn	250000	12608	1049	9	14969	7,1
Mn	1500000	19277	1190	7	14426	1,1
Графит	320000	940,5	1158	123	13755	4,8
Ni	95000	2492	718	31	9501	11,8
Li	22000	87	291	357	3454	18,6
Co	7600	129	236	194	2955	46,0
Cr	570000	8186	75	1	1178	0,2
Nd	8000	20	40	215	466	6,9
Mo	16000	284	23	9	293	2,2
Sn	4900	277	25	10	290	7,0
Dy	480	2	19	1243	206	50,7
Pr	2000	6	12	222	131	7,8
Pb	90000	4746	5	0,1	88	0,1
Cd	1250	25	6	22	44	9,3
Te	31	0,4	5	1143	40	241,0
Ag	530	26	3	11	36	8,1
In	25	0,9	3	344	26	145
Ge	125	0,1	2	2348	18	1439,6
Se	100	3	3	96	25	20,0
Tb	300	0,32	2	739	25	10,0
Ga	1600	0,3	1	260	7	25,5

Примечания. ¹ По [Mineral ..., 2022]. ² Для Se, Te, Cd, In, Ga, Ge учитывается металлургическое производство первичного металла (по [Mineral..., 2022]).

логиях и электромобилях в больших количествах. Суммарное дополнительное потребление, связанное с энергетическим переходом, за 30-летний период достигает максимума для Al (31 млн т), а для других первичных цветных металлов составляет 23,5 млн т Cu (120% рудничной добычи металла в 2020 г.), 15 млн т Zn (124%), 290 тыс. т Sn (111%) и т.д. Намного большее дополнительное потребление, выраженное в долях рудничной добычи в 2020 г., демонстрируют, например, Ni (9,5 млн т, 406%), графит (13,8 млн т, 1463%), Co (3,0 млн т, 2437%), Li (3454 тыс. т, 4237%), а также РЗЭ, входящие в состав магнитных сплавов в ветровых электрогенераторах и моторах электромобилей, в частности, Pr (131 тыс. т, 2362%), Nd (466 тыс. т, 2479%), Tb (25 тыс. т, 8311%) и Dy (206 тыс. т, 13697%). Высоким предполагается также дополнительный спрос на металлы для полупроводниковых материалов в солнечных панелях (в долях металлургического производства металлов в 2020 г.): Cd (44 тыс. т, 187%), Se (3,3 тыс. т, 750%), Ga

(6,5 тыс. т, 1469%), In (25,6 тыс. т, 2712%), Te (40 тыс. т, 9009%) и Ge (17,8 тыс. т, 17810%). Эти и некоторые другие виды минерального сырья имеют наибольшее значение для технологий энергетического перехода. Успех реализации сценария IEA 2DS при оговоренных основных предположениях будет зависеть от возможности удовлетворить спрос на них.

Обеспеченность технологий энергетического перехода запасами критического сырья. Расчеты показали, что суммарная дополнительная рудничная добыча некоторых критических металлов в 2021–2050 гг. только для нужд технологий энергетического перехода сопоставима (например, для Co и Ga) с их добычей за всю историю промышленного использования этих металлов, а для Ge, Te, In существенно превышает ее (в 3,6 раза для Ge и Te, в 1,6 раза для In).

Планирование колоссального по своим масштабам и значимости перехода к низкоуглеродной энергетике требует обсуждения вопроса об обеспеченности его запасами критически важных видов

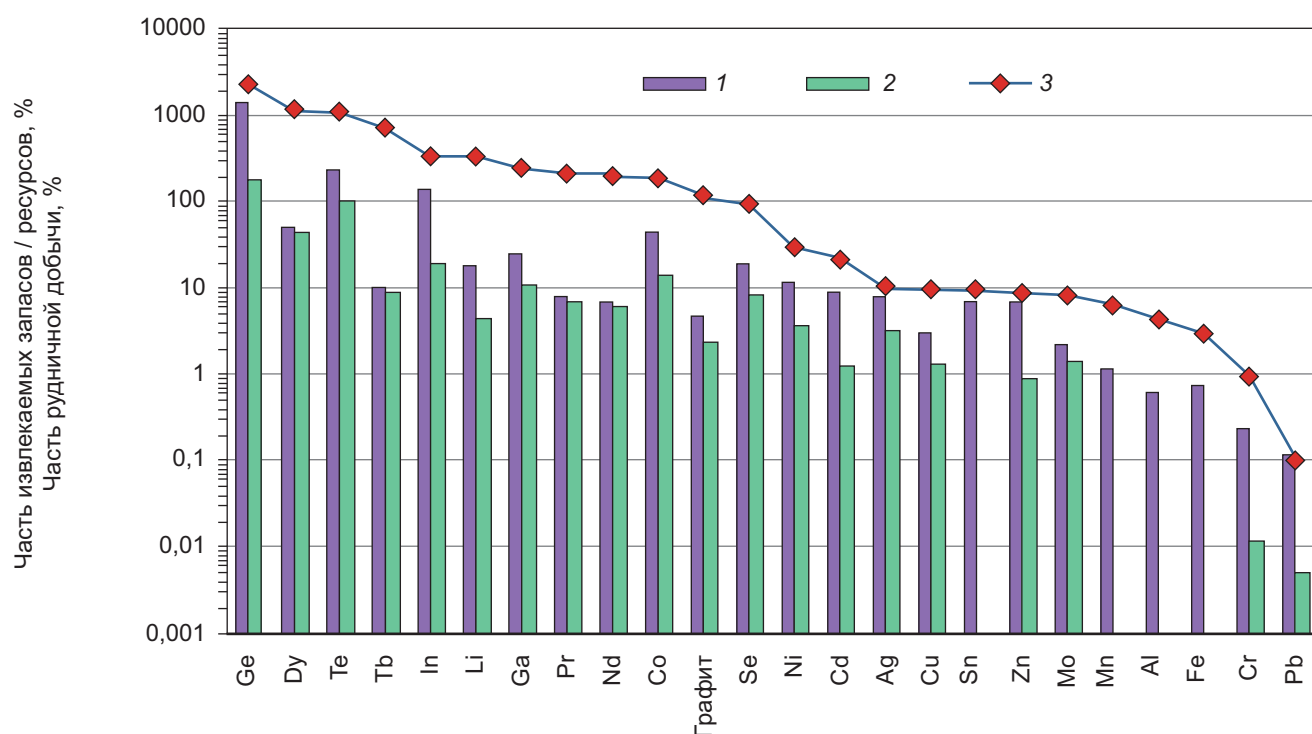


Рис. 3. Потребление первичных металлов и натурального графита в технологиях энергетического перехода: 1–2 — в 2021–2050 гг. в долях (%) мировых извлекаемых запасов (1) и ресурсов (2) (по данным на 2020 г.); 3 — в 2050 г. в долях (%) их глобальной рудничной добычи в 2020 г.

сырья. Сравнение их потребления с имеющимися запасами и ресурсами позволяет предполагать появление в будущем проблем с поставками критических минеральных материалов и выбирать оптимальные технологии.

В базовом варианте расчетов за 30 лет суммарный спрос в технологиях энергетического перехода на целый ряд первичных критических металлов (с учетом их сквозного извлечения в конечную продукцию металлургического производства) и промышленных минералов, по крайней мере теоретически, может быть удовлетворен за счет существенной части имевшихся в 2020 г. запасов. Эта часть сравнительно мала (%) для графита (5), Nd (7), Pr (8), Ag (8), Cd (9), Tb (10), Ni (12), но она намного больше для Li (19), Se (20), Ga (26), Co (46), Dy (51) (рис. 3). Наименее благополучно складывается ситуация с обеспечением растущего спроса запасами In, Te и Ge. С учетом сквозного извлечения этих металлов в металлургическую продукцию при современных технологиях для удовлетворения спроса на них в 2021–2050 гг. суммарно потребуется соответственно 145, 241 и 1440% известных в 2020 г. извлекаемых запасов. Иными словами, даже если бы эти металлы использовались исключительно в технологиях энергетического перехода в рамках сценария IEA 2DS при основных предположениях базового варианта расчетов, известные запасы In теоретически могли бы быть полностью истощены уже в 2048 г., Te — в 2043 г., а Ge — в 2031 г.

Однако более реалистичным является вариант расчетов, в котором ускоренный рост потребления критических металлов в «зеленых технологиях»

будет происходить на фоне возрастания использования их и в остальных секторах экономики темпами, достигнутыми в первом десятилетии XXI в. (до начала массового строительства солнечных электростанций и ветровых парков). Для обеспечения мировой экономики некоторыми видами минерального сырья даже без учета потребностей альтернативной энергетики к 2050 г. должны быть выявлены, разведаны и полностью отработаны запасы, многократно превышающие известные в настоящее время (рис. 4). Потребуется, например, 212% нынешних запасов Te, 389 и 551% запасов In и Ge соответственно.

Энергетический переход еще более усугубил бы ситуацию с обеспечением запасами некоторых критических видов сырья. В этом случае удовлетворение глобального спроса потребовало бы с учетом коэффициента сквозного извлечения отработать к 2050 г. (доля запасов по состоянию на 2020 г., %) 1991 запасов Ge, 534 In, 453 Te, 262 Ag, 226 P3Э, 146 Se, 141 Ni, 138 Co, 113 Cu, 90 Ga, 52 Li, 20 графита. При этом мировые запасы Ge, Ag, In, Zn, Sn, Pb, Te были бы полностью исчерпаны уже в 2026–2036 гг., запасы Cd, P3Э, Ni, Se, Cu — в 2038–2044 гг., а Cr, Co, Mo, Mn — в 2045–2049 гг.

При таком положении дел уже к середине 2030-х годов может оказаться, что цели сценария IEA 2DS не могут быть достигнуты даже при вполне реалистичных основных предположениях базового варианта расчетов. Это поставило бы мир перед выбором между энергетической безопасностью и климатическими обязательствами. Кроме того, рост спроса со стороны «зеленых» технологий и усиление конкуренции за критические минеральные материалы могли бы

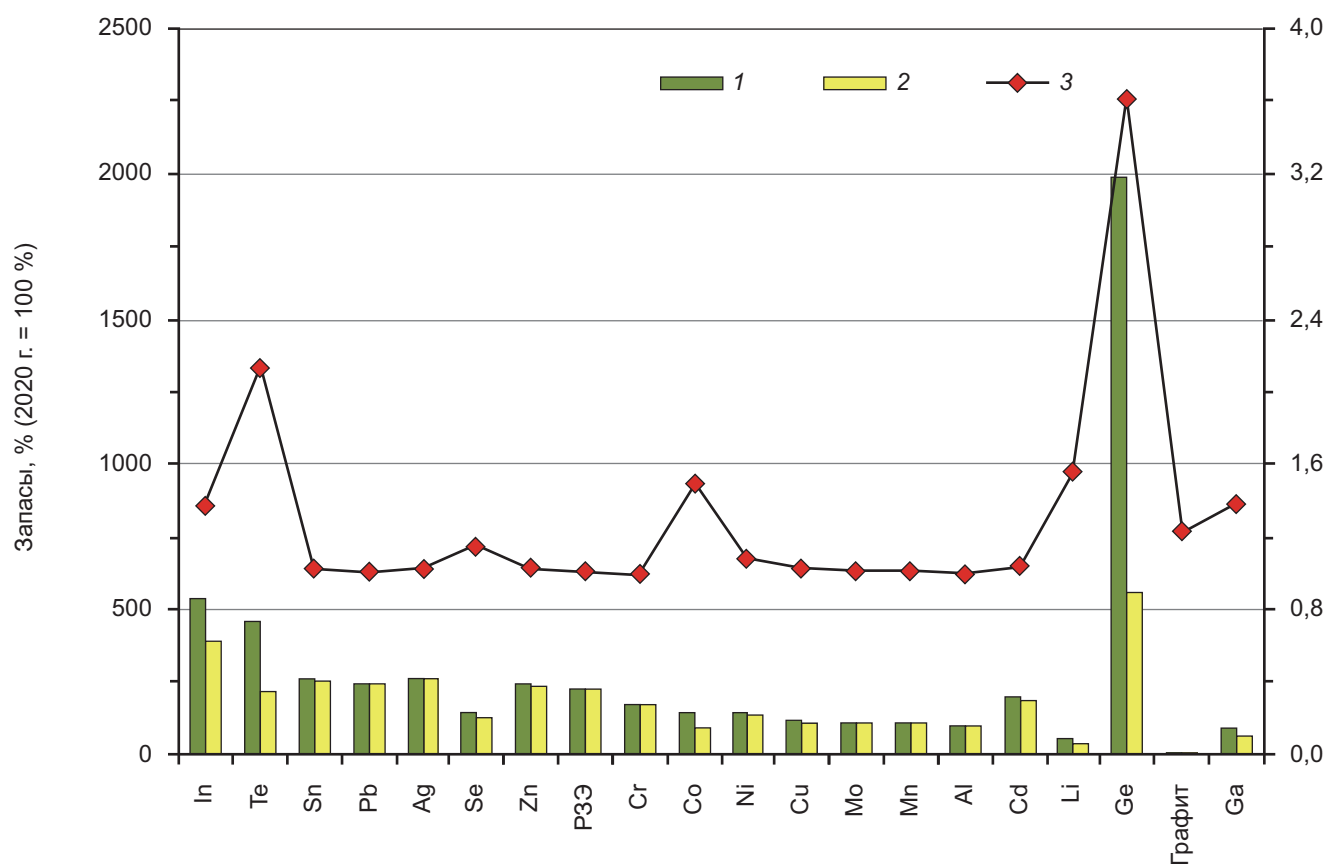


Рис. 4. Запасы минерального сырья, необходимые для удовлетворения потребностей мировой экономики с учетом (1) и без учета технологий энергетического перехода (2) и их соотношение (3) (шкала справа)

привести к повышению цен на них и, в конечном счете, к масштабной «зеленой» инфляции.

Острота вопроса об обеспечении технологий энергетического перехода запасами минерального сырья может быть снижена за счет реализации комплекса мер. Это, в частности, извлечение критических металлов из месторождений новых типов (например, получение Te из руд золото-теллуридных месторождений), повышение коэффициентов извлечения металлов (актуально, например, для Cd, In, Ge, Se, Te, Ga). Среди наиболее действенных мер следует рассматривать также снижение материалоемкости технологий, развитие минерально-сырьевой базы критических минеральных материалов и снижение нагрузки на невозобновляемые ресурсы за счет получения искусственного сырья, а также извлечения вторичных металлов из лома и отходов.

Ускорение темпов геологоразведочных работ. Совершенно ясно, что энергетический переход невозможен без разведки новых запасов целого ряда видов минерального сырья, кратно превышающих имевшиеся в 2020 г. Промышленные запасы полезных ископаемых могут быть пополнены за счет гранично-экономических запасов и непромышленных ресурсов, которые наряду с промышленными запасами, по классификации USGS, относятся к выявленным ресурсам. Они, по данным этого агентства, зачастую в несколько раз превышают разведанные

на сегодня промышленные запасы (например, в 6,3 раза для Ga, 3,3 раза для Co, 2,5 раза для графита, 2,4 раза для Li, 1,4 раза для P3Э).

Оценка возможностей наращивания запасов за счет открытия новых месторождений критических минералов и металлов требует углубленного металлогенического анализа и не входит в задачу нашего исследования. Однако ясно, что возможность совершить энергетический переход, по крайней мере, по выбранному сценарию будет не в последнюю очередь определяться успехом поисково-разведочных работ на критические для «зеленой» энергетики виды полезных ископаемых.

Концепция устойчивого развития предполагает по крайней мере поддержание на постоянном уровне обеспеченности мировой экономики запасами важнейших видов сырья. Нынешние промышленные запасы Co (7600 тыс. т), например, при достигнутых в 2020 г. масштабах рудничного производства (129 тыс. т), с учетом коэффициента извлечения металла при обогащении 0,9 достаточны для обеспечения металлом мировой экономики в течение 53 лет.

В 2010–2020 гг. запасы Co возросли с 7300 до 7600 тыс. т, а суммарное рудничное производство металла составило 1260 тыс. т, что потребовало отработки запасов 1400 тыс. т металла. Таким образом, за 11 лет были разведаны запасы 1700 тыс. т,

или в среднем 154,5 тыс. т Со в год (2,0% запасов металла в 2020 г.).

Для сравнения, с учетом среднего темпа роста добычи Со в начале века (2,6% в год) в 2050 г. глобальное потребление первичного металла без учета технологий, использующих ВИЭ, по расчетам достигло бы 278 тыс. т. К этому моменту с учетом сквозного извлечения металла ($R = 0,846$) были бы отработаны запасы 6968 тыс. т Со, или 92% запасов металла, имевшихся в 2020 г. Остаток запасов, необходимый для поддержания прежней обеспеченности экономики запасами при достигнутом в 2050 г. уровне добычи, должен был бы составить около 17416 тыс. т. Таким образом, за 30 лет необходимо было бы разведать запасы 16784 тыс. т. Со, что в 2,2 раза больше нынешних. Это означает, что ежегодно должно было бы разведываться в среднем 559,5 тыс. т Со (7,4% запасов в 2020 г.).

С учетом же потребностей новых энергетических технологий в 2050 г. глобальное потребление первичного металла, по расчетам, достигнет 514 тыс. т. К этому моменту должны быть отработаны запасы 10461 тыс. т Со (с учетом коэффициента сквозного извлечения), или 138% запасов металла в 2020 г., а остаток запасов, необходимый для поддержания прежней обеспеченности экономики при достигнутом уровне добычи, должен составить около 32201 тыс. т. Таким образом, за 30 лет должны быть разведаны запасы 37 586 тыс. т Со, что не только в 4,6 раза больше имевшихся в 2020 г., но и превышает в 1,4 раза нынешние ресурсы этого металла (25 000 тыс. т). Это означает, что в течение 30 лет в среднем ежегодно должны разведываться запасы 1169 тыс. т Со, т.е. 15,4% запасов металла в 2020 г. Аналогичная ситуация складывается и с запасами большинства других критических минеральных материалов. Такие темпы наращивания запасов в течение столь длительного времени беспрецедентны и мало реальны.

Предсказать, какая доля выявленных ресурсов в рассматриваемые сроки может реально превратиться в запасы по результатам разведки, не представляется возможным, однако ясно, что кумулятивное глобальное потребление с учетом коэффициента сквозного извлечения составило бы существенную часть ресурсов In, Co, Se (42–70%), и даже превысило бы нынешние мировые ресурсы Ag (в 1,1 раза), Te (в 1,9 раза) и Ge (в 2,6 раза).

Извлечение металлов из лома и отходов, получение искусственного сырья. Исследованиями модели установлено, что в базовом варианте расчетов в 2021–2050 гг. вторичное сырье составит заметную часть суммарного потребления (%) лишь для Mo (4,4), Fe (4,7), Al (6,6), Cu (9,6), Cr (12,9), и только двух критически важных металлов: Со (22,0) и Ni (31,0) (рис. 5). Кроме того, искусственное сырье на 55% удовлетворит потребность в графите, а 30% Ge будет получаться из золы и зольных уносов, образующихся на угольных электростанциях. Благодаря

этому будет сохранена в недрах существенная доля (%) нынешних мировых запасов Ge (608), Со (13), графита (5,8) и Ni (5,3) (с учетом коэффициента R).

Значение вторичного сырья возрастет, если к 2030 г. появятся рентабельные и эффективные технологии его переработки и извлечение металлов повысится (табл. 3). Важнейшим результатом при этом станет увеличение в суммарном потреблении доли (%) вторичных Mn (с 1,2 до 30,8), Zn (с 2,7 до 15,2), и что особенно важно, дорогостоящих Ni (до с 31,0 до 33,4) и Со (с 22,0 до 34,9). Кроме того, произойдет также частичное замещение первичного сырья вторичными Li (22), Dy (17,3), Pr (13,0), Nd (14,7), Tb (11,8). Это позволит уменьшить нагрузку на невозобновляемые природные ресурсы, сохранив в недрах за 30 лет (доля запасов, имевшихся в 2020 г., %) 20,6 Со и 5,7 Ni (вместо 13,0 и 5,3 соответственно в базовом варианте расчетов), 6,4 Dy, 4,1 Li, а также незначительную часть запасов других РЗЭ и Zn (по 1–2%) (с учетом коэффициентов сквозного извлечения металлов).

Однако и при внедрении перспективных технологий извлечения вторичных металлов не снижается острота проблемы низкой обеспеченности нынешними запасами Ge, In, Te, Ag, Cd, Co, Ni, Se, РЗЭ. И в целом влияние вторичных металлов на потребление невозобновляемых ресурсов в процессе энергетического перехода, которое подчеркивалось в более ранних аналогичных исследованиях (например, [World Bank, 2020]), в первые 30 лет оказывается очень слабым. Это объясняется не только низкими в настоящее время показателями извлечения большинства важнейших металлов из образующегося лома, но и быстрыми темпами роста большинства предусмотренных сценарием технологий энергетического перехода, а также длительными сроками полного износа оборудования в большинстве из них.

Снижение материалоемкости технологий. В базовом варианте расчетов удельное потребление материалов принималось неизменным на протяжении всех 30 лет реализации сценария IEA 2DS. Однако опыт последних полутора десятилетий показывает, что в 2021–2050 гг. можно ожидать значительного сокращения металлоемкости ветровых электрогенераторов и солнечных панелей разных типов.

В первом случае для учета этой тенденции вслед за [Carrara et al., 2020], предполагалось сокращение расхода Dy, Nd, Pr и Tb на 1 ГВт установленной мощности электрогенерации на 2% в год, или в 1,8 раза к 2050 г. Во втором случае учитывалось возможное линейное снижение потребления Ag, Ga, Ge, In, Se, Cd и Te в субтехнологиях фотовольтаики в 2,5–4 раза к 2050 г. до уровней, приведенных в табл. 2 (цифры в скобках).

Расчеты показали, что по сравнению с базовым вариантом расчетов постепенное снижение материалоемкости технологий с учетом коэффициента сквозного извлечения металлов позволит сохранить в недрах (доля запасов по состоянию на 2020 г., %)

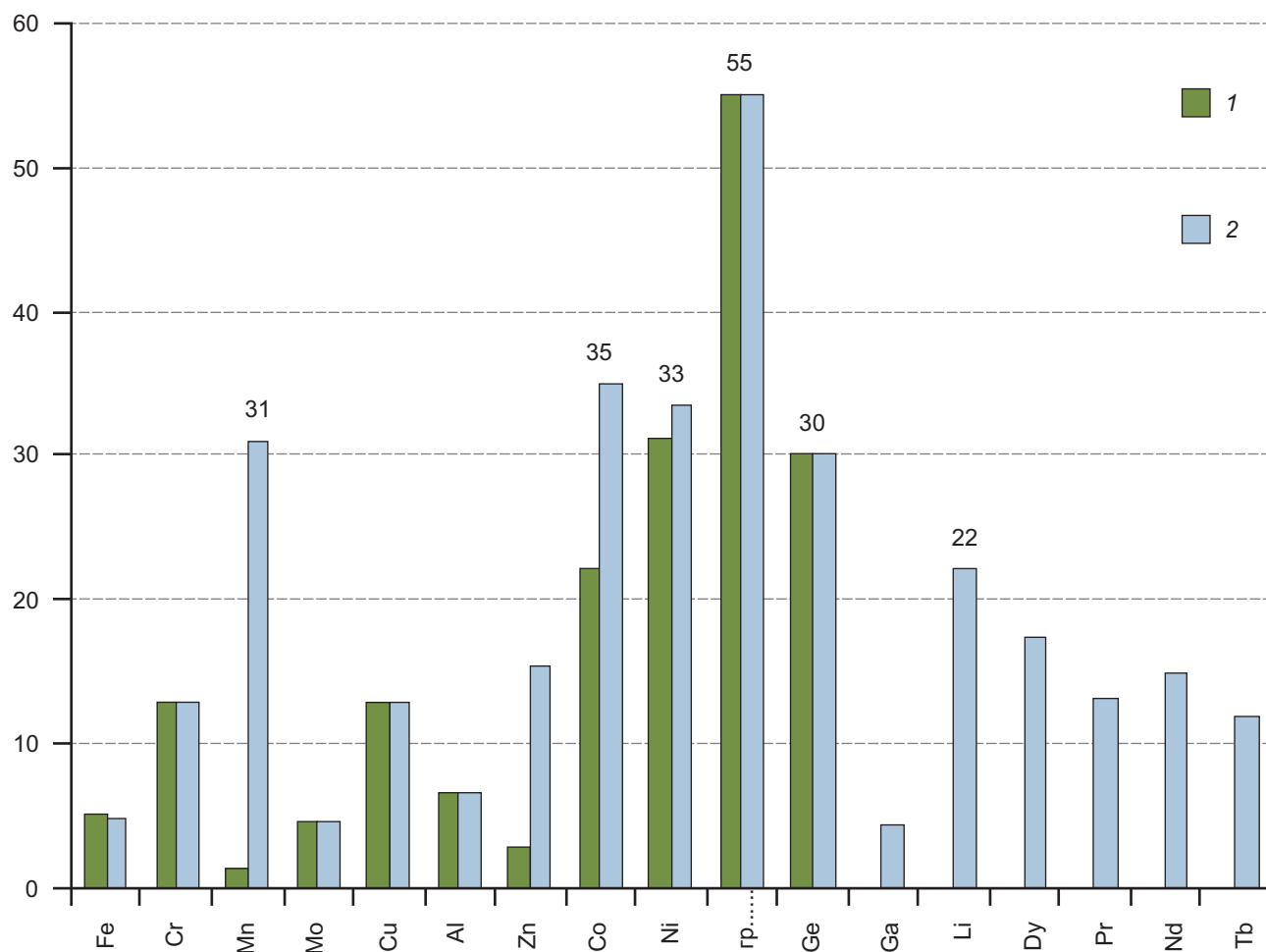


Рис. 5. Доля (%) металлов из лома и отходов и синтетического графита в суммарном потреблении в технологиях энергетического перехода в 2021–2050 гг. при реализации сценария 2DS в базовом варианте расчетов (1) и с учетом повышения извлечения вторичных металлов из лома к 2030 г. (2)

менее 1 Pr, Nd, и Tb, примерно 2 Dy, 3 Ag, 5 Cd, 9 Se, 13 Ga, 58 In, 126 Te и 800 Ge. Однако и в этом случае для обеспечения только потребностей технологий энергетического перехода потребовалось бы 670% нынешних запасов Ge, 115% Te, 87% In (с учетом коэффициента сквозного извлечения металлов).

Если же принять во внимание рост глобального спроса на металлы к 2050 г. в этом варианте расчетов должны быть отработаны (доля запасов, по состоянию на 2020 г., %) 1208 Ge, 476 In, 326 Te, 260 Ag, 225 PЗЭ, 187 Cd, 137 Se, 77 Ga. При этом сроки исчерпания известных в 2020 г. мировых запасов не только критически важных Ge, Ag, In, Te, Cd, PЗЭ, Se, но всех 24 учитываемых видов минеральных материалов остались бы практически неизменными по сравнению с базовым вариантом расчетов.

Появление новых технологий. В базовом варианте расчета использованы существующие технологии, в том числе получающие распространение в самое последнее время. Внедрение новых технологий может заметно изменить потребность в тех или иных видах сырья. Так, на смену Li-ионным аккумуляторам могут прийти цинк-воздушные, твердотельные литиевые или новые технологии,

использующие вместо Li в 100 раз более дешевый Na, для которого практически отсутствуют ограничения по масштабам добычи и запасам. В качестве иллюстрации влияния новых технологий выполнен расчет потребления материалов в СНЭ при замене Li-ионных более экономичными, например, Li-S аккумуляторами. Предполагается, что их доля в суммарной емкости СНЭ может с 2030 по 2050 г. линейно возрастать во времени и достичь 50% к концу периода [Carrara et al., 2020]. Расчеты показали, что в результате кумулятивное потребление Li в технологиях энергетического перехода в 2021–2050 гг. возрастет с 18,6 до 29,7%, а глобальное потребление металла — с 52 до 63,1% его нынешних запасов. Постепенное сокращение использования дорогостоящих Ni и Co позволит уменьшить долю нынешних запасов этих металлов, потребляемую в технологиях энергетического перехода в 2021–2050 гг., с 46% в базовом варианте расчетов до 26,7% для Co и с 11,8 до 6,9% для Ni. Однако трудно прогнозировать появление в будущем новых рентабельных технологий и субтехнологий и их параметры, в том числе материалоемкость, и рассчитывать на них при планировании фунда-

ментальных сдвигов в развитии мировой энергетики не представляется допустимым.

Заключение. Важнейшая роль в развитии цивилизации, которую до сих пор играли минеральные ресурсы, сохранится за ними и в эпоху перехода к преимущественному использованию ВИЭ. Сокращение использования ископаемого топлива будет, по крайней мере, частично компенсироваться расширенным применением твердых полезных ископаемых: руд металлов и промышленных минералов.

Планы энергетического перехода, опубликованные ИЕА и другими международными агентствами, составлены в парадигме бесконечности минеральных ресурсов и отсутствия ограничений на масштабы их добычи, а выбранные темпы перехода к преимущественному использованию ВИЭ не вполне обоснованы инженерными расчетами. Вопрос о достаточности существующих запасов и ресурсов критического сырья для обеспечения технологий энергетического перехода по тому или иному сценарию вообще не обсуждается с участием геологов, равно как и возможности мирового горно-металлургического комплекса добыть и переработать достаточное количество полезных ископаемых.

Кумулятивный дополнительный спрос на некоторые виды критического минерального сырья, вызванный слишком быстрым распространением низкоуглеродных энергетических технологий, только в период до 2050 г. составит существенную часть, а для Ge, In и Te многократно превысит нынешние их мировые запасы, извлекаемые в металлургическую продукцию, и даже их ресурсы. Такое соотношение между глобальным спросом на критическое минеральное сырье и его запасами и ресурсами ставит под сомнение возможность реализации даже относительно консервативного сценария IEA 2DS при

выбранных основных предположениях, соответствующих современным реалиям.

Для обеспечения технологий энергетического перехода критическими минеральными материалами в предстоящий период потребуются разработка и массовое внедрение промышленных технологий, обеспечивающих повышение сквозного извлечения металлов из руд, а также ускоренное наращивание запасов за счет интенсификации геологоразведочных работ. Расширяющееся использование вторичного и искусственного сырья, снижение материалоемкости существующих и разработка ресурсосберегающих новых технологий позволят уменьшить нагрузку на природные ресурсы и снизить риск прекращения или ограничения поставок первичных критических металлов по причине их недостаточности. Однако перечисленные факторы могут рассматриваться только как вспомогательные и в целом в ближайшие 30 лет не окажут большого влияния на обеспечение технологий энергетического перехода и электроомобилистического критическим сырьем.

В предстоящий период возможность внедрения современных технологий, использующих ВИЭ, и соотношения между субтехнологиями будут зависеть от наличия достаточного количества критических материалов и цен на них. Распространение технологий энергетического перехода, и, как следствие, ускоренный рост потребления критического сырья и конкуренция за доступ к необходимым ресурсам повлекут рост мировых цен на минеральное сырье, при его удорожании возрастут затраты на производство электроэнергии, а значит, и ее стоимость для конечного потребителя. Таким образом, достижение целей Парижского соглашения по сценарию IEA 2DS не только приведет к повышению материалоемкости электрогенерации, а значит, и мировой экономики в целом, но и ожидаемо внесет вклад в ускорение инфляционных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дергачев А.Л., Шемякина Е.М. Критическое минеральное сырье для малоуглеродной энергетики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 3. С. 3–10.

Парижское соглашение (Париж, 12 декабря 2015 года) // United Nations Treaty Series, No. 54113 (2016). <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/No%20Volume/54113/Part/I-54113-0800000280458f37.pdf> (дата обращения: 01.01.2023).

Carrara S., Alves Dias P., Plazzotta B., Pavel C. Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system // Brussels: European Parliament. 2020. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET\(2011\)471604_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET(2011)471604_EN.pdf) (дата обращения: 01.01.2023).

Dominish E., Teske S., Florin N. Responsible minerals sourcing for renewable energy // Sydney: Institute for sustainable futures, University of Technology. 2019. URL: https://earthworks.org/assets/uploads/2019/04/MCEC_UTS_Report_lowres-1.pdf (дата обращения: 14.06.2022).

Grandell L., Lehtila A., Kivinen M., et al. Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies // Renewable Energy. 2016. Vol. 95. P. 53–62.

IEA (International Energy Agency) 2016. Energy technology perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems // Paris: IEA. 2016. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2016> (дата обращения: 17.03.2022).

IEA 2017. Energy technology perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations // Paris: IEA. 2017. URL: <https://www.iea.org/topics/energy-technology-perspectives> (дата обращения: 10.01.2022).

IEA 2019. CO₂ emissions from fuel combustion 2019 // Paris: IEA. 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuelcombustion-2019> (дата обращения: 30.12.2022).

IRENA (International Renewable Energy Agency) 2019. Global energy transformation: A roadmap to 2050. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_A_Roadmap_to_2050.pdf

Transformation_2019.pdf?rev=6ea97044a1274c6c8ffe4a116ab17b8f (дата обращения: 30.12.2022).

IRENA 2020. International renewable capacity statistics 2020. URL: https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf?rev=1a7674fe44044cfc8788af909f28496e

IRENA 2021. International renewable capacity statistics 2021. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021> (дата обращения: 30.12.2022).

Mineral Commodities Summaries 2022. URL: <https://doi.org/10.3133/mcs2022> (дата обращения: 09.09.2022).

Moss R.L., Tzimas E., Kara H., et al. Critical metals in strategic energy technologies: Assessing rare metals as supply — chain bottlenecks in low-carbon energy technologies // Publications Office of the European Union. 2011. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2239d6b7-cda8-4570-a9f0-13ad60ce3f11/language-en> (дата обращения: 05.04.2022).

Nassar N., Wilburn D., Goonan T. Byproduct metal requirements for U.S. wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios // Applied Energy. Vol. 183. 2016. P. 1209–1226.

Öhrlund I. Future metal demand from photovoltaic cells and wind turbines: Investigating the potential risk of disabling a shift to renewable energy systems // European Parliament.

2012. URL: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET\(2011\)471604_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET(2011)471604_EN.pdf) (дата обращения: 05.04.2022).

Sibley S. F. Overview of flow studies for recycling metal commodities in the United States // U.S. Geological Survey Circular 1196. 2011. P. AA1–AA25.

Speirs J., McGlade C., Slade R. Uncertainty in the availability of natural resources: fossil fuels, critical metals and biomass // Energy Policy. 2015. Vol. 87. P. 654–664.

Vaalma C., Buchholz D., Weil M., et al. A cost and resource analysis of sodium-ion batteries // Nature Reviews Materials. 2018. Vol. 3. P.18013.

World Bank 2017. The growing role of minerals and metals for a low carbon future // Washington, DC: World Bank. 2017. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/28312> (дата обращения: 10.01.2022).

World Bank 2020. Minerals for climate action: The mineral intensity of the clean energy transition // Washington, DC: World Bank. 2020. URL: <https://www.commdev.org/publications/minerals-for-climate-action-the-mineral-intensity-of-the-clean-energy-transition/> (дата обращения: 10.01.2022).

Zhang Z.-X., Hou D.-F., Aladejare A., et al. World mineral loss and possibility to increase ore recovery ratio in mining production // International Journal of mining, reclamation and environment. 2021. Vol. 35. № 9. P. 670–691.

Статья поступила в редакцию 07.03.2023,
одобрена после рецензирования 22.03.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 551.763.1:550.384(477.9)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-17-22

ПЕРВАЯ НАХОДКА АММОНИТА В ВЕРХНЕМ СЕНОМАНЕ (ВЕРХНИЙ МЕЛ) КРЫМА

Евгений Юрьевич Барабошкин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; EJBaraboshkin@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-4373-1543>

Аннотация. В разрезе горы Сельбухра в районе поселка Научный в Юго-Западном Крыму найден сеноманский аммонит *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell, 1822). Это первая находка аммонита в отложениях верхнего сеномана в Крыму и в России.

Ключевые слова: аммонит, *Calycoceras (Calycoceras) naviculare*, верхний мел, верхний сеноман, биостратиграфия, Юго-Западный Крым

Для цитирования: Барабошкин Е.Ю. Первая находка аммонита в верхнем сеномане (верхний мел) Крыма // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 17–22.

THE FIRST RECORD OF AN AMMONITE IN THE UPPER CENOMANIAN (UPPER CRETACEOUS) OF THE CRIMEA

Evgeniy Yu. Baraboshkin

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; EJBaraboshkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4373-1543>

Abstract. Cenomanian ammonoid *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell, 1822) (Acanthoceratidae, Ammonoidea) was found in the well-known section of Selbukhra Mountain in the vicinity of Nauchnyi Town of southwestern Crimea. This is the first find of the ammonoid in the upper Cenomanian deposits in the Crimea and in Russia.

Keywords: ammonite, *Calycoceras (Calycoceras) naviculare*, Upper Cretaceous, upper Cenomanian, biostratigraphy, South-Western Crimea

For citation: Baraboshkin E.Yu. The first record of an ammonite in the upper Cenomanian (Upper Cretaceous) of the Crimea. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 17–22. (In Russ.).

Введение. Как известно, находки аммонитов в сеноманских отложениях Крыма распределены крайне неравномерно. Наиболее часто они встречаются в отложениях нижнего сеномана, а также в узком интервале среднего сеномана, непосредственно выше поверхности перерыва в его основании [Найдин, Алексеев, 1980; Marciniowski, 1980; Алексеев, 1989]. Находки *Calycoceras* sp., упоминаемые из нижнесеноманских отложений Крыма, либо не изображены [Алексеев, 1989], либо имеют весьма плохую сохранность [Аркадьев, Богданова, 1997] и вызывают сомнения в правильности их идентификации.

В верхнесеноманских отложениях Крыма аммонитов до сих пор не находили. Поэтому встреченный нами экземпляр *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell) представляет безусловный интерес, тем более, что он относится к виду-индексу одноименной зоны. Данный аммонит найден автором в 2023 г. во время изучения известного разреза сеноманских отложений на южном склоне г.Сельбухра, примерно в 40 м восточнее промоины, в которой обычно описывают разрез, ниже большого одиночного дерева, хорошо заметного на склоне (рис. 1, 2). Это первая

находка верхнесеноманского аммонита, сделанная в Крыму, и она подтверждает возраст нижней части пачки VI [Алексеев, 1989], хотя и не уточняет положение границы среднего и верхнего сеномана.

Палеонтологическое описание. При описании использованы стандартные терминология и замеры раковин, приведенные в [Аркадьев, Богданова, 1997]. Коллекция хранится в Музее Землеведения МГУ имени М.В. Ломоносова (МЗ МГУ), № 158.

Отряд Ammonoidea Zittel, 1884

Подотряд Ammonitina Hyatt, 1889

Надсемейство Acanthoceratoidea de Grossouvre, 1894

Семейство Acanthoceratinae de Grossouvre, 1894

Подсемейство Acanthoceratinae de Grossouvre, 1894

Род и подрод *Calycoceras* Hyatt, 1900

***Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell, 1822)**

Рис. 3 а, б.

1822. *Ammonites navicularis*: Mantell, p. 198, pl. 22, fig. 5 (с ошибочной подписью *Ammonites catinus*).

1971. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell): Kennedy, p. 71, pl. 33, fig. 1A-B; pl. 34, fig. 1A-B; pl. 35, fig. 1–2; pl. 36, fig. 1–4; pl. 37, fig. 1–3; pl. 47, fig. 1, 3, 5 (с синонимикой).

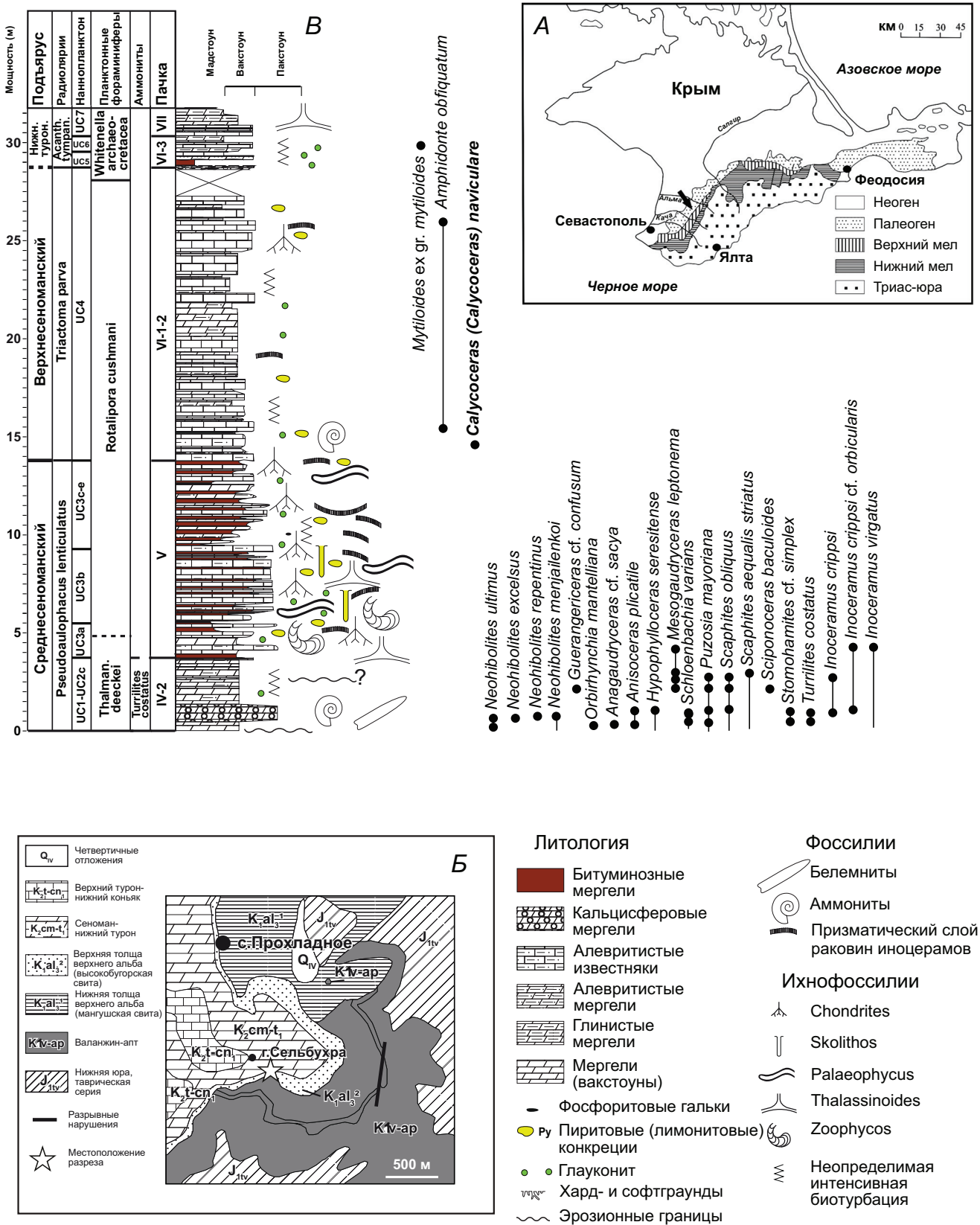




Рис. 2. Место находки аммонита (стрелка) на южном склоне г. Сельбухра в районе пос. Научный (фото М.Ю. Томаткина, МГУ)

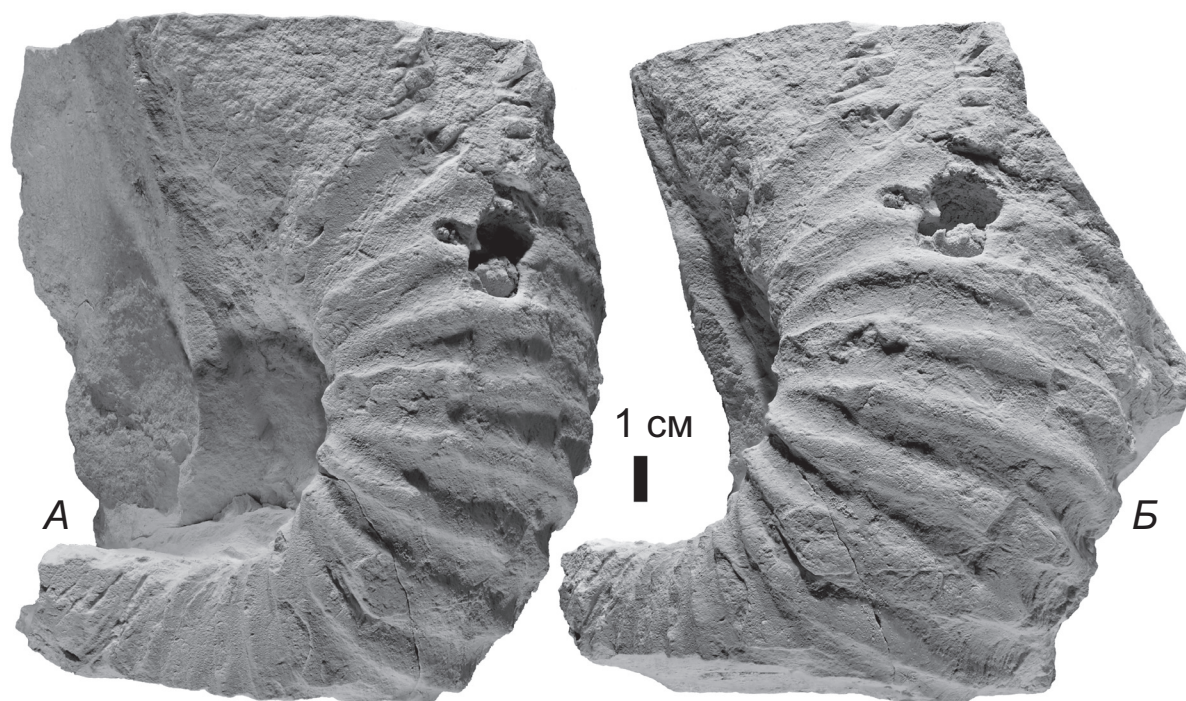


Рис. 3. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell), экз. № 158/2: А — сбоку, Б — с вентральной стороны; Верхний сеноман, южный склон г. Сельбухра в районе пос. Научный, Бахчисарайский район, Республика Крым

1981. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell): Wright, Kennedy, p. 34, pl. 4, pl. 5, fig. 1–3, text-fig. 13, 14c-e (с синонимикой до 1981 года).

1989. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell): Fischer, pl. 140, fig. 1, 2.

1990. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell): Wright, Kennedy, p. 236, pl. 61, fig. 1, pl. 62, fig. 1–6, pl. 63, fig. 1–3, text-fig. 88e, I, 89d, 110c (с дополнительной синонимикой до 1990 года).

1996. *Calycoceras naviculare* (Mantell): Kirkland, p. 79, pl. 10, fig. L, M.

1996. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell): Wright, Calloman, Howarth, p. 164, fig. 125a-f.

? 2008. *Calycoceras naviculare* (Mantell): Abdel-Gawad, p. 211, pl. 1, fig. 1 a-c, 2.

2009. *Calycoceras naviculare* (Mantell): Barroso-Barcenilla et al., fig. 8B.

2015. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell): Kennedy, Gale, p. 292, pl. XXII, fig. 6 (с дополнительной синонимикой).

2016. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell): Zaoui et al., pl. I, fig. 5a-b.

2017. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell): Wright et al., text-fig. 203G, H.

2018. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell): Zaoui et al., p. 345, fig. 7B.

2018. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell): Košťák et al., p. 156, fig. 5A-L (с дополнительной синонимикой).

? 2019. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell): Mendir et al., p. 244, pl. III, fig. 2a-b.

2020. *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell): Hoyez et al., pl. 16, fig. 7a-b.

2023. *Calycoceras naviculare* (Mantell): Benyoucef et al., fig. 11. D, E.

Голотип по монотипии, экз. BMNH 5681, оригинал Мانتелла [Mantell, 1822, pl. 22, fig. 5], из середины верхнесеноманских «Пленусовых мергелей» «Оффэма», Сассекс, Англия. Голотип переизображен в [Crick, 1919, p. 154, pl. 4; Kennedy, 1971, p. 71, pl. 33, fig. 1a, b; Wright, Kennedy, 1981, p. 35, pl. 4; Wright et al., 1996, p. 164, fig. 125a-b].

Описание. Найденный нами экземпляр представлен половиной оборота, относящегося к жилой камере. Образец сильно и несколько асимметрично сплюснен в спинно-брюшном направлении. Раковина полуинволютная, ее диаметр составлял не менее 100 мм. Хотя истинную форму сечения установить затруднительно, оно несомненно достаточно широкое и слегка угловатое при переходе от боков к ventру. Ребра прямые, двураздельные и интеркалирующие, а также одиночные. Они начинаются на пупковой стенке и ветвятся на пупковом перегибе с образованием вздутия, реже — небольшого бугорка. На половине оборота насчитывается 11 главных ребер. На уплощенной вентральной стороне число ребер достигает 16 на пол-оборота, они пересекают ventр не ослабляясь. На вентральном перегибе ребра чуть более утолщенные, что

придает им некоторую угловатость, хотя бугорков не образуется.

Сравнение. Данный образец предварительно был ошибочно определен как *C. (C.) cf. boulei* [Авенирова и др., 2023]. И это не удивительно, так как вид *C. (C.) boulei* Collignon, 1957 наиболее близок к виду *C. (C.) naviculare*, и предположительно является его предком [Kennedy, 1971]. Ребристость у *C. (C.) boulei* более тонкая и частая, с отчетливыми боковыми бугорками; сечение менее вздутое, слегка угловатое, а умбилик более узкий, чем у *C. (C.) naviculare*.

Замечания. Список литературы, в котором приведены описания или изображения *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mant.) или синонимичных форм, огромен. Детальная ревизия данного вида проведена в монографиях [Kennedy, 1971; Wright, Kennedy, 1981, 1990]. Автор следует пониманию вида *C. (C.) naviculare*, изложенному именно в этих работах. Дополнительная ревизия проведена в статье [Košťák et al., 2018].

Другие находки, не отмеченные предыдущими исследователями или опубликованные позже, приведены в списке синонимии. Экземпляры, которые могут быть отнесены к виду *C. (C.) naviculare*, даже несмотря на не всегда хорошую сохранность, здесь не комментируются, остальные формы рассмотрены ниже.

У небольшого обломка “*C. (C.) naviculare*” в работе [Mendir et al., 2019], несмотря на очень плохую сохранность, просматриваются спрямленные частые тонкие ребра, не характерные для данного вида. То же относится и к фрагменту аммонита в работе [Abdel-Gawad, 2008].

Распространение. *C. (C.) naviculare* — широко распространенный вид в верхнем сеномане, являющийся его видом-индексом. Встречается от зоны *Calycoceras (Proeucalycoceras) guerangeri* до нижней части зоны *Metoicoceras geslinianum* в разрезах Северной Америки (Канзас, Нью-Мексико, Техас, Колорадо, Орегон, Калифорния), Северной Африки (Алжир, Тунис, Ливия), Южной Африки (Ангола), Мадагаскара, Ближнего Востока, южной Индии, Японии, Европы (Англия, Франция, Испания, Португалия, Германия, Чехия), Крыма (рис. 4).

Материал. Один экземпляр МЗ МГУ № 158/2.

Обсуждение. Вид *C. (C.) naviculare* длительное время служил традиционным и основным видом-индексом верхнего сеномана [Hancock, 1960], однако в 1995 году на Брюссельском меловом симпозиуме было принято принципиальное решение о трехчленном делении верхнего сеномана и поиске иного вида-маркера подошвы верхнего сеномана [Tröger et al., 1996]. Краткое подведение итогов по стратиграфии сеноманского яруса приведено в работе [Kennedy, Gale, 2006], где для европейских разрезов предлагается проводить подошву верхнего сеномана по исчезновению *Acanthoceras rhotomagense* (Brongn.) — виду-индексу среднего сеномана, что происходит почти одновременно с появлением

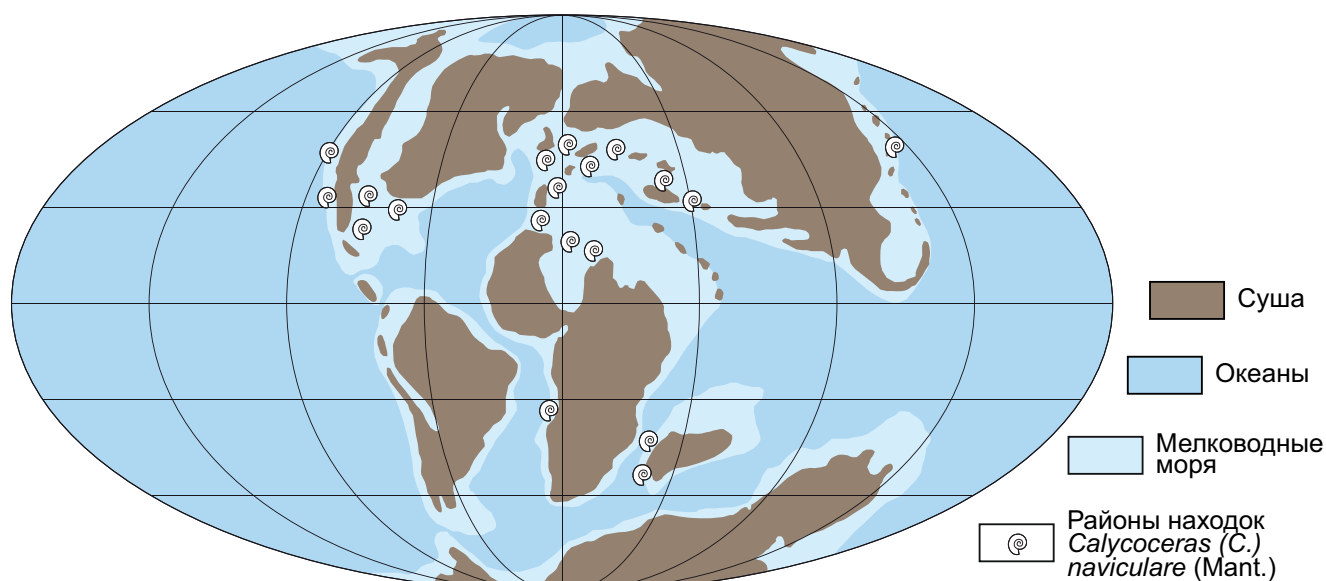


Рис. 4. Схема географического распространения *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mantell) на палеотектонической основе [по R. Blakey, с изменениями]

Calycoceras (Proeulcalycoceras) guerangeri (Spath) — видом-индексом верхнего сеномана. При таком определении границы *C. (C.) naviculare* становится менее пригодным в качестве вида-индекса, так как он появляется выше уровня исчезновения *Acanthoceras rhotomagense*. Проведение подошвы верхнего сеномана в основании зоны *Calycoceras (Proeulcalycoceras) guerangeri*, хотя и не утверждено международно, тем не менее принято в большинстве стратиграфических работ, включая общую шкалу верхнего мела России [Олферьев, Алексеев, 2002].

До настоящего времени подошва верхнего сеномана в разрезах Юго-Западного Крыма проводилась на основании микрофауны [Алексеев, 1989] по нижней границе пачки VI, однако четкие критерии ее проведения отсутствовали. По находкам устриц *Amphidonte obliquatum* (Pulteney) и аналогии с разрезами северной Германии, Э. Гейл с соавторами [Gale et al., 1999] наметили подошву верхнего сеномана примерно в 1 м выше основания пачки VI. Важным признаком подошвы верхнего сеномана является изотопный экскурс $\delta^{13}\text{C}$ «Джукс-Браун», выявленный недавно в этом же разрезе в верхних 1,1 м пачки V [Авенирова и др., 2023]. В Великобритании этот экскурс приходится на основание зоны *Calycoceras guerangeri* [Jarvis et al., 2006], где и маркирует ниж-

нюю границу верхнего сеномана. В разрезе Сельбухры уровень «Джукс-Браун» идентифицирован примерно в 1–1,5 м ниже находки *C. (C.) naviculare* (Mant.), что отвечает представлениям У. Кеннеди о появлении данного вида несколько выше уровня границы нижнего и верхнего сеномана [Tröger et al., 1996]. Сама же находка аммонита расположена примерно в 0,5 м выше подошвы пачки VI и в 1,5 м ниже характерного зеленоватого туфогенного прослоя, отмеченного всеми геологами.

Заключение. Таким образом, уникальная находка *Calycoceras (Calycoceras) naviculare* (Mant.) в разрезе сеномана г. Сельбухра, подтверждает справедливость проведения подошвы верхнего сеномана в основании пачки VI [Алексеев, 1989] и расширяет представление о географическом распространении этого важного биостратиграфического маркера.

Благодарности. Автор признателен А.Э. Олейнику (университет Флориды, США) и А.П. Ипполитову (ГИН РАН, Университет Виктории, Веллингтон, Новая Зеландия) за помощь в поисках литературы, а также М.Ю. Томаткину (МГУ) за предоставленные фотоматериалы.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00091, <https://rscf.ru/project/22-17-00091/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авенирова Е.С., Ртищев Н.А., Барабошкин Е.Ю. и др. Новые данные о хемо- и биостратиграфии сеноманских отложений г. Сельбухра // Вопросы палеонтологии и региональной стратиграфии фанерозоя Европейской части России: Мат-лы конф. Ундоры, Ундоровский палеонтологический музей, 2023. С. 116–118.

Алексеев А.С. Верхний мел // Геологическое строение Качинского поднятия Горного Крыма. Стратиграфия

мезозоя / Ред. О.А. Мазарович, В.С. Милеев. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. С. 123–157.

Аркадьев В.В., Богданова Т.Н. (Ред.). Атлас меловой фауны Юго-Западного Крыма. СПб.: Пангея, 1997. 357 с.

Брагина Л.Г., Брагин Н.Ю. Радиоларии сеномана и зональная стратиграфия в разрезе горы Сель-Бухра, республика Крым // Стратиграфия. Геол. Корреляция. 2023. Т. 31, № 4. С. 103–117.

Найдин Д.П., Алексеев А.С. Разрез отложений сеноманского яруса междуречья Качи и Бодрака (Крым) // Изв. ВУЗов. Геол. разведка. 1980. № 4. С. 11–25.

Олферьев А.Г., Алексеев А.С. Общая шкала верхнего отдела меловой системы // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2002. Т. 10, № 3. С. 66–80.

Щербинина Е.А., Гаврилов Ю.О. Зональное расчленение сеноманских-сантонских отложений Юго-Западного Крыма по наннопланктону // Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: Сб. науч. трудов. Симферополь: Черномор-пресс, 2016. С. 292–294.

Abdel-Gawad G.I. Late Cenomanian Ammonites from NE Libya and the Western Desert of Egypt // Geology of East Libya. 2008. Vol. 3. P. 201–218.

Barroso-Barcenilla F., Goy A., Segura M. Ammonite zonation of the upper Cenomanian and lower Turonian in the Iberian Trough, Spain // Newsl. Stratigr. 2009. Vol. 43. No.2. P. 139–164.

Benyoucef M., Salamon M., Ferré B., et al. Stratigraphy, palaeontology and sedimentology of the Upper Cretaceous of northern Tademaït (Sahara, Algeria) // Cret. Res. 2023. Vol. 149. 105547.

Crick G.C. On Ammonites navicularis, Mantell // Proc. Malacol. Soc. London, 1919. Vol. 13. P. 154–160.

Fischer J.-C. Fossiles de France et des régions limitrophes. 2e édition revue et augmentée. Paris, Milan, Barcelone, Mexico: Masson, 1989. 222 p.

Gale A., Hancock J.M., Kennedy W.J. Biostratigraphical and sequence correlation of the Cenomanian successions in Mangyshlak (W. Kazakhstan) and Crimea (Ukraine) with those in southern England // Bull. Inst. Roy. Sci. Nat. Belgique. Sci. de la Terre. 1999. Vol. 69. P. 67–86.

Hancock J.M. Les Ammonites du Cénomanien de la Sarthe // C. R. Congr. Soc. Savant. Paris et des Dépt., Dijon, 1959. Sect. Sci. Sous sect. Géologie. Colloque sur le Crétacé supérieur français. 1960. P. 249–252.

Hoyez B., Girard J., Cottard N. Le Cénomanien du littoral normand entre la Vallée de l'Antifer et le Cap de La Hève // Carnets Geol. 2020. 225 p.

Jarvis I.A.N., Gale A.S., Jenkyns H.C., et al. Secular variation in Late Cretaceous carbon isotopes: a new $\delta^{13}\text{C}$ carbonate reference curve for the Cenomanian–Campanian (99.6–70.6 Ma) // Geol. Mag. 2006. Vol. 143. No. 5. P. 561–608.

Kennedy W.J. Cenomanian ammonites from southern England // Palaeont. Assoc. Spec. Pap. in Palaeontology. 1971. No. 8. 133 p.

Kennedy W.J., Gale A.S. Late Turonian ammonites from Haute-Normandie, France // Acta Geol. Polon. 2015. Vol. 65, No. 4. P. 507–524.

Kennedy W.J., Gale A.S. The Cenomanian Stage // Proc. Geol. Assoc. 2006. Vol. 117. P. 187–205.

Kirkland J.I. Paleontology of the Greenhorn cyclothem (Cretaceous: late Cenomanian to middle Turonian) at Black Mesa, northeastern Arizona // New Mexico Mus. Nat. Hist. and Sci. Bull. 9. 1996. 131 p.

Košták M., Čech S., Uličný D., et al. Ammonites, inoceramids and stable carbon isotopes of the Cenomanian–Turonian OAE2 interval in central Europe: Pecínov quarry, Bohemian Cretaceous Basin (Czech Republic) // Cret. Res. 2018. Vol. 87. P. 150–173.

Mantell G. The Fossils of the South Downs, or Illustrations of the Geology of Sussex. London: L. Rolfe, 1822. xiv + 328 p.

Marcinowski R. Cenomanian ammonites from German Democratic Republic, Poland, and the Soviet Union // Acta Geol. Polon. 1980. Vol. 30. № 3. P. 215–325.

Mendir S., Salmi-Laouar S., Ferré B., et al. Les ammonites du Cénomanien des massifs de Hameimat (Tébessa, Atlas saharien oriental, Algérie): systématique et biostratigraphie // Rev. Paléobiol. 2019. Vol. 38. No. 1. P. 229–254.

Percival L.M.E., van Helmond N.A.G.M., Selby D., et al. Complex interactions between large igneous province emplacement and global-temperature changes during the Cenomanian–Turonian oceanic anoxic event (OAE 2) // Palaeoceanogr. Paleoclimat. 2020. Vol. 35. e2020PA004016.

Tröger K.-A., Kennedy W.J. (Comp.). The Cenomanian stage // Bull. Inst. Roy. Sci. Nat. Belgique. Sci. de la Terre. 1996. Vol. 66. P. 57–68.

Wright C.W., Callomon J.H., Howarth M.K. Cretaceous Ammonoidea. Treatise on Invertebrate Paleontology. Pt. L. Mollusca, revised. Vol. 4. University of Kansas, GSA: 1996. 362 p.

Wright C.W., Kennedy W.J. The Ammonoidea of the Lower Chalk. Part 3. Palaeontogr. Soc. Monograph 585. 1990. P. 219–294.

Wright C.W., Kennedy W.J., Hancock J.M., et al. The Ammonoidea of the Lower Chalk. Part 7. Palaeontogr. Soc. Monograph. 2017. № 171(648). P. 461–561.

Wright C.W., Kennedy W.J. The Ammonoidea of the Plenus Marls and the Middle Chalk // Palaeontogr. Soc. Monograph 560. 1981. 148 p.

Zaoui D., Meister Ch., Benyoucef M., et al. Cenomanian–Turonian ammonite successions in the Tinnert Basin (South-eastern Algeria): Revision and new data // Cret. Res. 2018. Vol. 88. P. 337–374.

Zaoui D., Tchenar S., Benyoucef M., et al. Le Cénomanien–Turonien dans la Hamada du Tinnert (Sahara, Algérie): résultats préliminaires // Rev. Paléobiol. 2016. Vol. 35. No. 2. P. 541–559.

Статья поступила в редакцию 07.11.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 550.82:004.94+55(477.75)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-23-31

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИНОВАТОСТИ РАЗРЕЗА ГОРЫ СУВЛУ-КАЯ, ЮГО-ЗАПАДНЫЙ КРЫМ

Максим Валерьевич Коротаев¹✉, Наталья Витальевна Правикова²,
Павел Анатольевич Фокин³, Татьяна Юрьевна Тверитинова⁴,
Екатерина Романовна Чижова⁵, Александр Иванович Кизяков⁶,
Екатерина Александровна Лыгина⁷

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; korm1111@yandex.ru✉, <https://istina.msu.ru/workers-beta/423979/>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; npravikova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5605-9261>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; fokinpav@rambler.ru, https://istina.msu.ru/profile/Fokin_PA/

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tvertat@yandex.ru, <https://istina.msu.ru/profile/TTveritinova/>

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; chizhova_er@mail.ru, <https://istina.msu.ru/profile/erchizhova/>

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; akizyakov@mail.ru, <https://istina.msu.ru/workers-beta/1272213/>

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ealygina@mail.ru, <https://istina.msu.ru/profile/LyginaEA/>

Аннотация. Выполнено моделирование трещиноватости в разрезе горы Сувлу-Кая, ЮЗ Крым. Построена трехмерная геологическая модель разреза, проведено геомеханическое моделирование, рассчитаны поля напряжений в трехмерной геологической структуре. Результаты моделирования сравнены с реальными замерами трещиноватости в поле.

Ключевые слова: геомеханика, моделирование, трещины, Юго-Западный Крым

Для цитирования: Коротаев М.В., Правикова Н.В., Фокин П.А., Тверитинова Т.Ю., Чижова Е.Р., Кизяков А.И., Лыгина Е.А. Геомеханическое моделирование трещиноватости разреза горы Сувлу-Кая, Юго-Западный Крым // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 23–31.

GEOMECHANICAL FRACTURE MODELING OF THE SUVLU-KAYA MOUNTAIN SECTION, SOUTH-WEST CRIMEA

Maksim V. Korotaev¹✉, Natalya V. Pravikova², Pavel A. Fokin³,
Tatyana Yu. Tveritinova⁴, Ekaterina R. Chizhova⁵, Aleksander I. Kizyakov⁶,
Ekaterina A. Lygina⁷

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; korm1111@yandex.ru✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; npravikova@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; fokinpav@rambler.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tvertat@yandex.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; chizhova_er@mail.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; akizyakov@mail.ru

⁷ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ealygina@mail.ru

Abstract. Fracture modeling in the section of Suvlu-Kaya Mountain, South-West Crimea, was made. A three-dimensional geological model of the section was constructed, geomechanical modeling was performed, and stress fields in the three-dimensional geological structure were calculated. The modeling results were compared with real measurements of fracturing in the field.

Keywords: geomechanics, modeling, fractures, South-Western Crimea

For citation: Korotaev M.V., Pravikova N.V., Fokin P.A., Tveritinova T.Yu., Chizhova E.R., Kizyakov A.I., Lygina E.A. Geomechanical fracture modeling of the Suvlu-Kaya Mountain section, South-West Crimea. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 23–31. (In Russ.).

Введение. Район исследований находится на северо-западной периклинали Качинского поднятия (антиклинория) Горнокрымского мегантиклинория,

в Бахчисарайском стратотипическом районе [Зернецкий и др., 2014]. Целью исследования является восстановление полей напряжения по трещинам

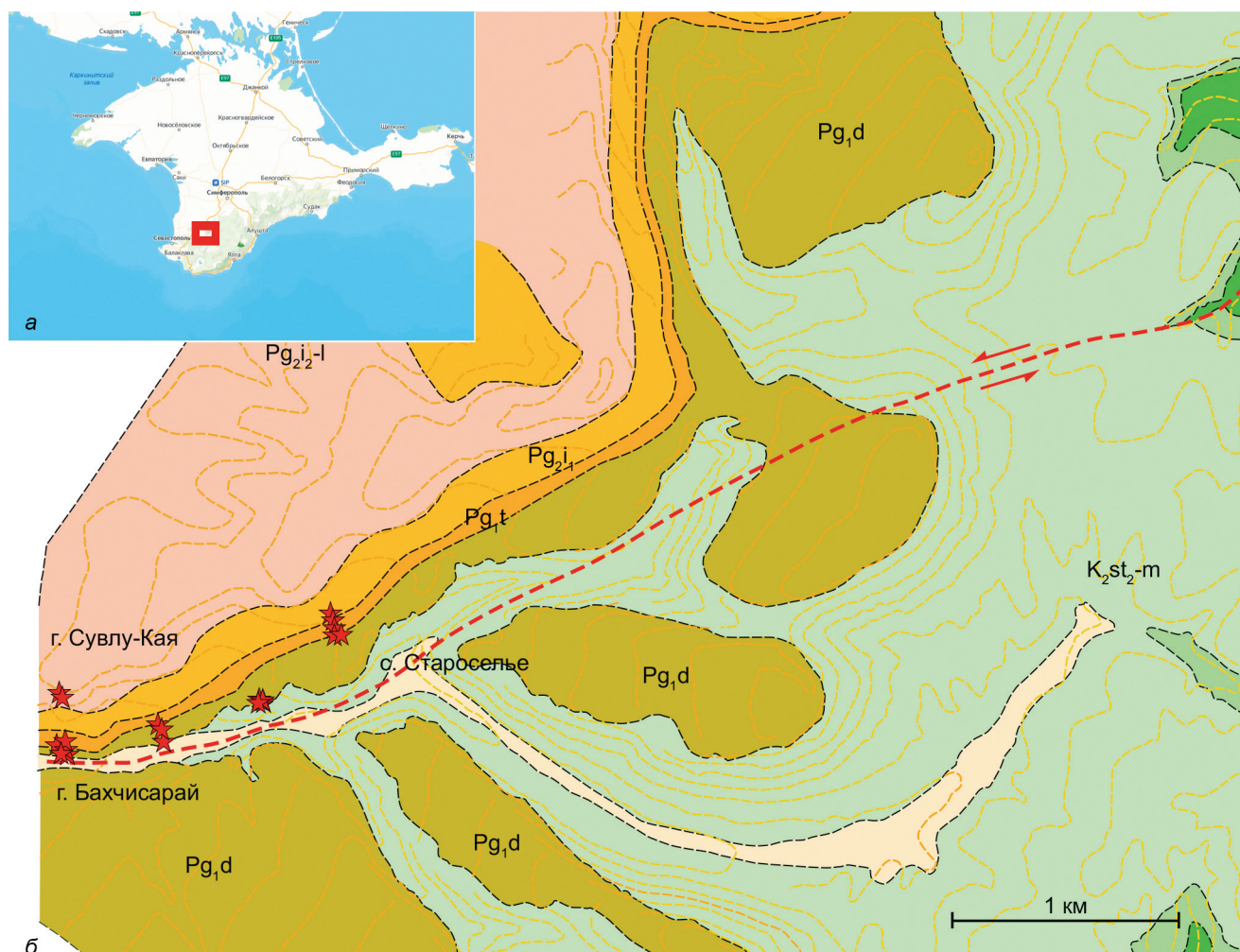


Рис. 1. Расположение разреза г. Сувлу Кая на топографической карте (а) и геологической карте (б). Красные звездочки — места замера трещин, красная пунктирная линия — предполагаемое продолжение Бодракского разлома

в карбонатных породах палеогенового возраста, восстановление структуры моноклинально залегающих слоев палеогена к додеформированному состоянию, трехмерное моделирование трещиноватости и корреляция результатов моделирования с региональными деформациями.

Восстановленные поля напряжений соответствуют условиям образования моноклинали и могут быть увязаны с ростом горноскладчатого сооружения. Полученные результаты указывают на изменение полей напряжения на альпийском этапе развития и позволяют выделить раннеэоценовые деформации.

Материалы и методы. Строение палеогеновых отложений на восточной окраине г. Бахчисарай (с. Староселье, г. Сувлу-кая, Юго-Западный Крым). Горнокрымский ороген представляет собой область киммерийской складчатости с широко проявленными альпийскими деформациями [Муратов, 1973; Геологическое..., 1989], в пределах которого выделяется складчатый фундамент (верхнетриасово-юрские породы) и мел-миоценовый чехол. Последний залегает полого моноклинально с падением на запад, северо-запад под углами не более 10–12°, что

явилось следствием альпийского орогенеза. В этот период развития, как было показано ранее [Nikishin et al., 2014; Лыгина и др., 2019, 2022], деформации проходили в несколько этапов. Первый из них приходится на начало эоцена, фиксируется наиболее уверенно в Центральном Крыму продолжительным перерывом, формированием отдельных разломов и зон трещиноватости и увязывается с основной фазой складчатости в Понтидах (Северная Турция). Второй этап начинается в олигоцене [Никишин и др., 2006] — миоцене [Семенов, 2003], связан с общим поднятием горного сооружения, формированием моноклинали, а в ее пределах новых систем трещин и реактивацией старых. Структурные преобразования этого этапа проявлены по всему разрезу и повсеместно как наиболее молодые и выраженные.

Замеры трещин проводились на восточной окраине г. Бахчисарай и в с. Староселье, в датских и верхнеипрско-нижнелютетских отложениях (рис. 1). Здесь верхняя часть маастрихтских отложений и датские известняки формируют высокий отвесный уступ, мергели танета и глины нижнего ипра — пологий задернованный склон; нуммулитовые известняки верхнего ипра — нижнего лютета,

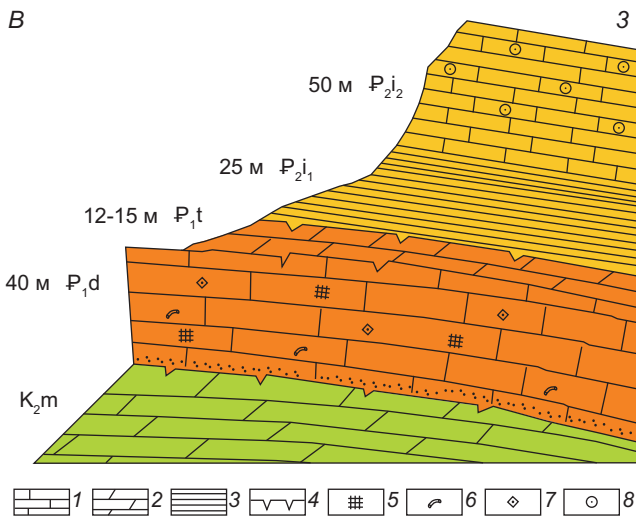


Рис. 2. Схематический геологический разрез г. Сувлу-Кая: 1 — известняки; 2 — мергели; 3 — глины; 4 — поверхность твердого дна; 5 — мшанки; 6 — серпулы; 7 — криноидеи; 8 — нуммулиты

являясь менее прочными, чем датские, формируют в рельефе выпуклые крутые склоны с участками бастионных форм выветривания (рис. 2). Слои имеют в целом западные углы падения (Аз.пд. 3-275, у.п.7°), с постепенным разворотом к северо-западным в восточном направлении.

В основании разреза палеогеновых отложений хорошо выражена поверхность размыва маастрихта — твердое дно со следами сверлений и ходами талассиноидных раков, заполненными карбонатным глауконит-кварцевым песком датского возраста. Отложения маастрихта здесь представлены мергелями алевритовыми, глауконитовыми с многочисленными рострами белемнитов и раковинами пектенид.

Основная часть датских отложений представлена известняками органогенно-обломочными криноидно-мшанковыми и серпулово-криноидно-мшанковыми, в нижней части с мергелями светло-серыми алевритистыми и с рыхлыми глауконит-кварцевыми песчаниками в основании. Общая мощность составляет 40 м.

Поверхность контакта датских и танетских отложений несогласная, неровная, с современным карстом, интерпретируется как каменное дно. Датские известняки в кровле разреза розоватого цвета, очень крепкие, массивные, со скоплениями перемытой битой и целой ракушки крупных толстостенных двустворок.

Танетские отложения представлены мергелями, в основании зеленовато-серыми алевритовыми глауконит-кварцевыми, выше светло-серыми с кремнистыми стяжениями, развивавшимися по губкам, сменяющимися мергелями серыми неслоистыми. Общая мощность составляет около 12–15 м.

Ипрские отложения залегают с четко выраженным несогласием на породах танета. Нижнеипрская часть представлена в основании песками глинистыми, глауконитовыми, с желваками фосфоритов

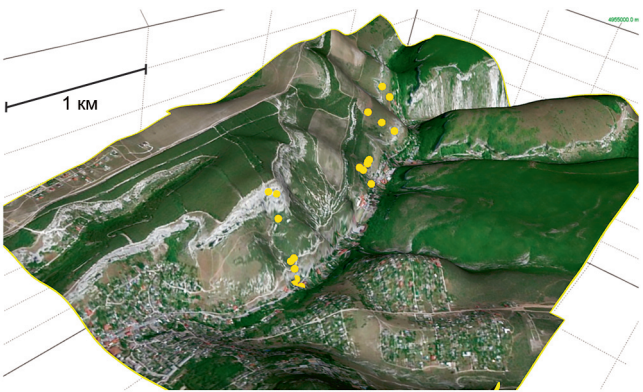


Рис. 3. Трехмерная модель рельефа г. Сувлу-Кая и точки замеров трещиноватости. Оранжевые точки — места замеров трещин

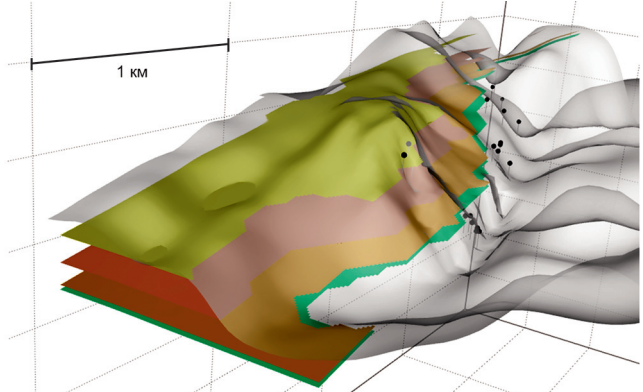


Рис. 4. Моноклиальная структура палеогеновых отложений и детальный рельеф г. Сувлу-Кая. Полупрозрачная поверхность — детальный рельеф, плоскости — поверхности подошв верхнего (желтый) и нижнего (коричневый) ипра, танета (оранжевый) и дания (зеленый). Черные точки — места замеров трещин

(0,5 м), выше сменяясь глинами коричневатого-серыми известковыми с нуммулитами, в нижней части слабо алевритовыми. Верхняя часть разреза нижнего ипра представлена постепенным, но довольно быстрым переходом от глин к нуммулитовым мергелям и еще выше к нуммулитовым известнякам верхнего ипра. Граница нижнего и верхнего ипра здесь согласная. Мощность отложений нижнего ипра около 25 м, верхнего ипра — нижнего лютета — более 50 м.

Трехмерная геологическая модель разреза Сувлу-Кая. Составлена трехмерная геологическая модель разреза Сувлу-Кая, включающая:

- 1) цифровой рельеф, совмещенный с космоснимком;
- 2) детальную цифровую модель рельефа, построенную по материалам стереосъемки с БПЛА;
- 3) 4 структурные поверхности подошв верхнего и нижнего ипра, танета и дания, построенные по элементам залегания и границам этих подразделений на поверхности (рис. 3, 4).

Замеры трещин. Для анализа полей напряжения были произведены замеры трещин в отложениях двух стратиграфических уровней: дания-танета и эоцена на северо-восточной окраине г. Бахчиса-

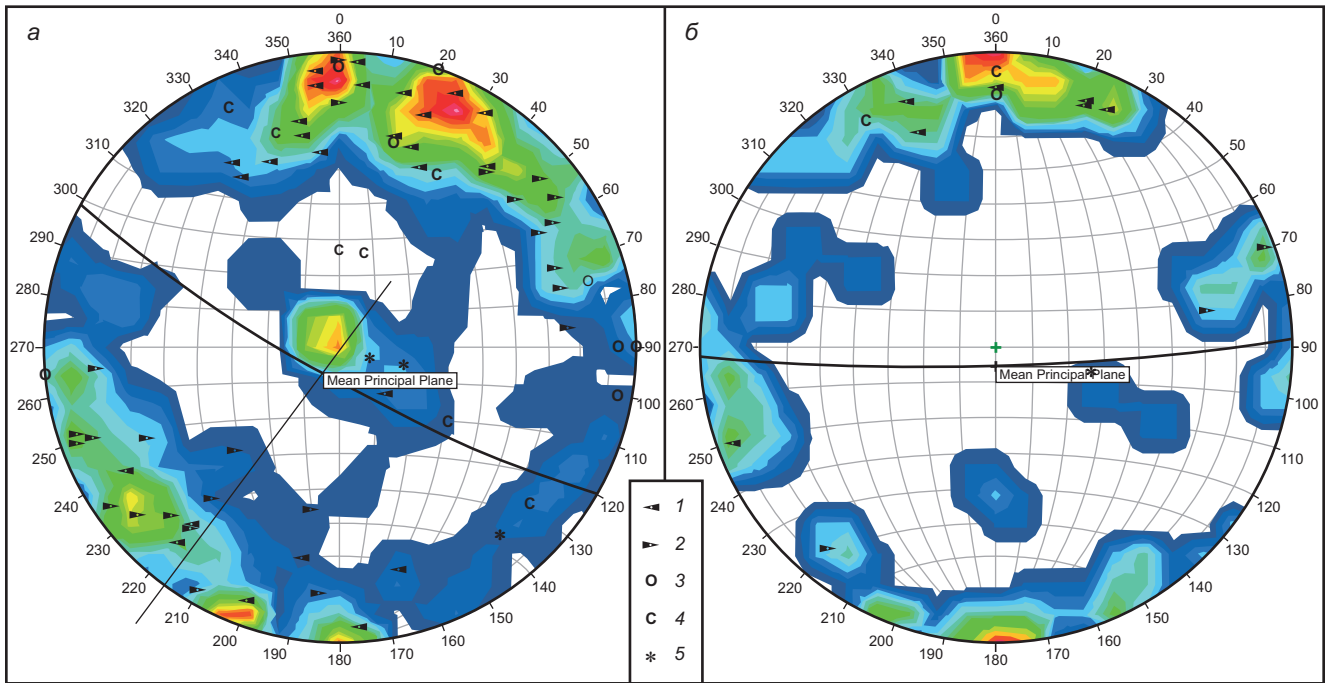


Рис. 5. Стереогаммы замеров трещиноватости (нижняя полусфера): а — в известняках и мергелях дания и танета; б — в нуммулитовых известняках верхнего ипра — нижнего лютета (нижняя полусфера). Сколы — левосдвиговой (1) и правосдвиговой (2) кинематики; 3 — отрывы; 4 — сколы сбросовой кинематики; 5 — кальцитовые жилы

рай и в районе с. Староселье (20 точек наблюдений, 476 замеров). Кинематический тип притертых трещин определялся по возможности, в основном — по особенностям строения зеркал скольжения, реже — по смещению реперных поверхностей и сопутствующим парагенезам. Практически все выявленные зеркала скольжения принадлежат сколам с пологой — 0–15°, до 30°, лишь в единичных случаях больше — ориентировкой тектонической

штриховки. Расположение точек замеров приведено на рис. 3 и 4. Стереогаммы замеров трещиноватости приведены на рис. 5. Поля трещин для этих уровней существенно различаются, что предполагает разные этапы и условия их формирования. Анализ трещиноватости и восстановленных по ним полей напряжения приводится в разделе *Анализ полей напряжения*.

Методика моделирования. Проведено геомеханическое моделирование в программном пакете Midland Valley Move по стандартной методике (рис. 6), включающей:

- восстановление моноклиальной структуры к додеформированному состоянию;
- расчет полей напряжений для исходного и восстановленного разрезов;
- распределение полей напряжений в трехмерном пространстве;
- моделирование зон трещиноватости в объеме;
- сравнение модельных зон трещиноватости с замерами и корректировка модели.

Методика геомеханического моделирования и моделирование трещиноватости. Модуль геомеханического моделирования — это инструмент, позволяющий деформировать или восстановить трехмерную геологическую структуру, используя поверхности и объемные модели. Модуль позволяет определить поля напряжений путем расчета гетерогенных (не плоскостных) смещений и может быть использован для проверки правильности модели и детального структурного анализа.

Модуль геомеханического моделирования использует метод «масс-на-пружинах» [Wang et al.,

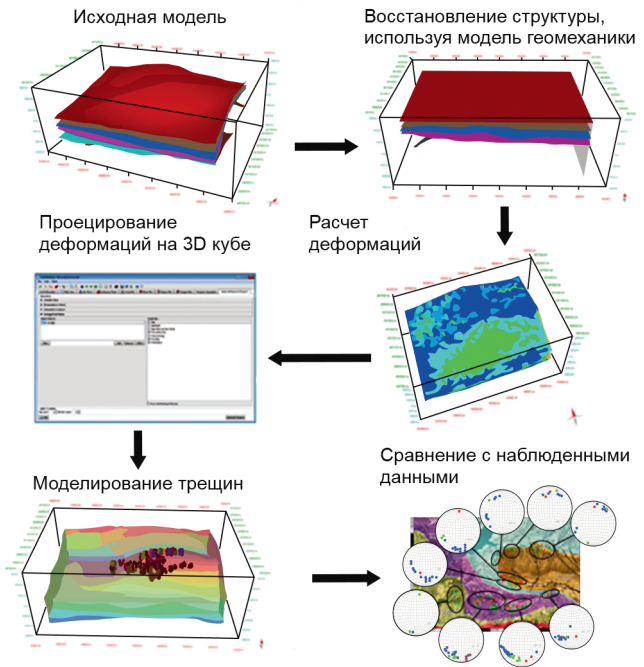


Рис. 6. Последовательность операций при геомеханическом моделировании и моделировании трещиноватости (www.mve.com)

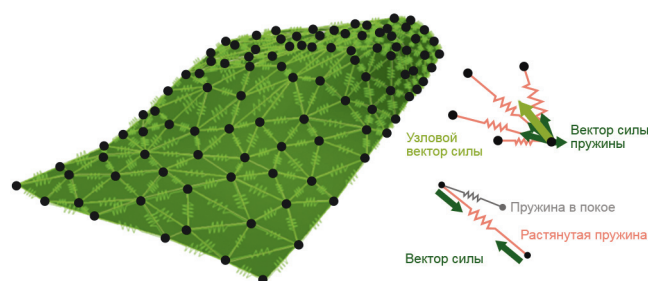


Рис. 7. Схема работы метода «масс-на-пружинах», его элементы и действующие силы (www.mve.com)

2006; www.mve.com]. Это упрощенная итеративная техника, использующая механические свойства пород (модуль Юнга и коэффициент Пуассона), слагающих горизонты модели, и определяющая их упругую реакцию (рис. 7).

Для поверхностей процесс берет исходную сетку и деформирует ее до современного состояния или уровня по высоте. Исходная сетка представляется как набор масс и пружинок. Пружинки традиционно располагаются вдоль краев треугольников, составляющих сетку, а массы — в углах сетки. Граничным условием модели является проекция целевой поверхности (современное состояние). Проекция изменяет форму поверхности, которая меняет длину треугольных краев, загружая пружинки модели. Пружинки используются, чтобы рассчитать силы на точках масс, которые управляют траекториями точек масс и моделируют физическое поведение поверхности под воздействием неоднородных сил.

Поверхности в геомеханическом моделировании постепенно проецируются на целевую поверхность за определенное пользователем количество «шагов проецирования» (P_n), что гарантирует, что силы в модели остаются стабильными на протяжении всего моделирования.

Инструмент «Моделирование трещиноватости» предназначен для анализа деформаций на восстановленных и смоделированных поверхностях и использования этих тензоров деформаций в качестве показателя интенсивности (плотности) и ориентации трещин путем применения концептуальных геологических моделей образования трещин.

При моделировании трещиноватости учитываются следующие параметры: область возникновения трещин, интенсивность, ориентировка и длина трещин, верхние и нижние ограничивающие пласты и соотношение сторон трещин, ширина их открытия.

Некоторые из этих параметров устанавливаются из анализа и понимания структурной истории, некоторые — как результат геомеханического моделирования и анализа полей напряжений. Для задания ориентировки трещин при моделировании можно использовать ориентацию деформаций, полученных при геомеханическом моделировании.

Результаты исследований и их обсуждение.

Результаты моделирования. В результате моделиро-

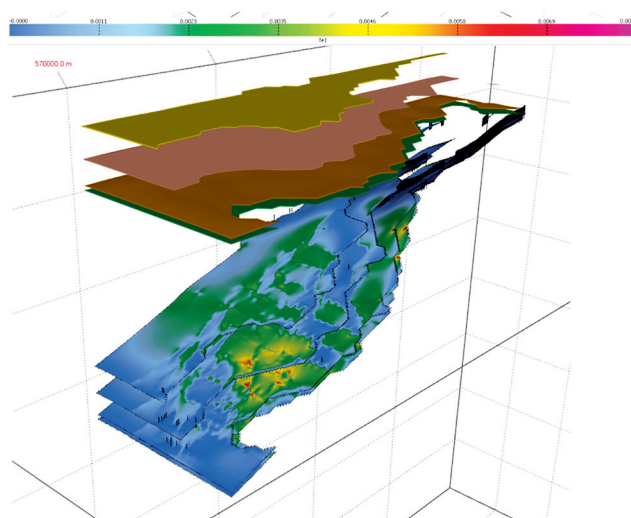


Рис. 8. Структурные поверхности подошв верхнего (желтый) и нижнего (коричневый) ипра, танета (оранжевый) и дания (зеленый), восстановленные к исходному додеформированному состоянию (вверху). Те же поверхности в современном моноклинальном залегании (внизу), цветом показана величина деформаций

вания подошвы дания и верхнего ипра восстановлены к додеформированному состоянию (рис. 8). В результате этого получены поля деформаций в трехмерном пространстве.

На основании определенных в результате геомеханического моделирования деформаций было произведено моделирование трещиноватости. В результате получены наборы трещин по всему объему модели (рис. 9).

Геомеханические свойства пород (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) выбраны из стандартных литотипов программы Move для глин (модуль Юнга = 32 500 МПа, коэффициент Пуассона = 0,3) и известняков (модуль Юнга 45 000 МПа, коэффициент Пуассона = 0,22). Плотность сети трещин ($0,0125 \text{ m}^2/\text{m}^3$), средний размер трещин (3,5–10 м). Ориентировка главных систем трещин определена по результатам геомеханического моделирования.

Анализ полей напряжений. Относительно легко дается интерпретация небольшого числа групп трещин в нуммулитовых известняках. Наиболее многочисленные субвертикальные широтные и субширотные трещины — в основном сколы с левосдвиговой кинематикой, и среди них вычлняются широтные трещины генерального сдвига и относительно них — еще две группы трещин, удовлетворяющие положению первичных и вторичных риделевских сколов. Все три группы сколов образуют парагенез широтной зоны левого сдвига, условий северо-восточного сжатия (рис. 10, а). Крутые сколы правосдвиговой кинематики или входят в тот же парагенез как антириделевские сколы, или образуют парагенез с широтными сколами согласно модели Кулона — Андерсона, с похожей ориентировкой СВ сжатия (рис. 10, б), хотя его ось и располагается в тупом углу между сколами.

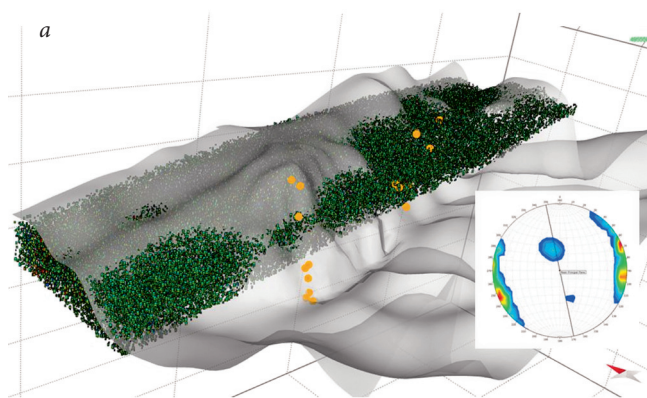
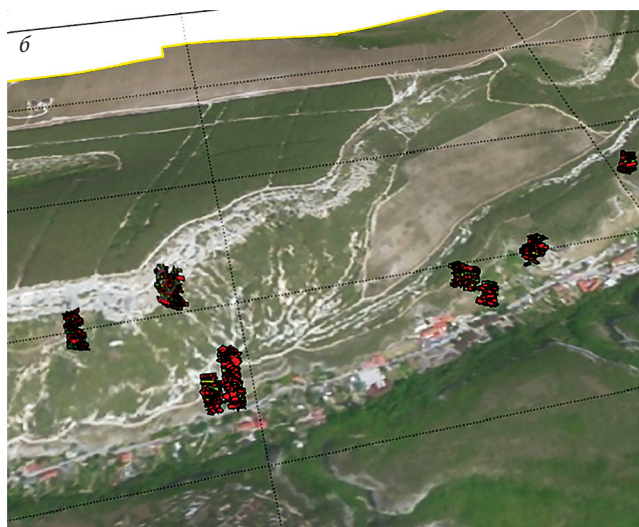


Рис. 9. Результаты моделирования трещиноватости: *а* — во всем массиве трехмерной модели, *б* — в местах замеров. На врезке — стереограмма полюсов трещин, сгенерированных на основе результатов геомеханического моделирования (нижняя полусфера)



Трещины прочих ориентировок не образуют явных парагенезов (рис. 10, *в*), однако расположение крутопадающих на СВ сколов с правосдвиговыми смещениями удовлетворяет ориентировкам сжатия от северо-северо-восточного до северо-западного. Еще двусмысленнее положение сбросов и отрывов широтного и северо-восточного простираения. Эти трещины обстановок растяжения могли формироваться в условиях СВ и широтного сжатия, однако при близких ориентировках обрывов и наличии под известняками пластичной «подушки» глин такие смещения по трещинам могут объясняться и боковым отпором.

Трещины в палеоценовых породах (в основном в известняках датского яруса) образуют больше групп, и часто одно сгущение полюсов образуют дизъюнктивы разной кинематики (рис. 10). Так, субвертикальные широтные трещины в датских известняках имеют как лево-, так и правосдвиговые смещения, отрывы и сколы со сбросовой кинематикой; совместные поля полюсов образуют крутые сколы разной кинематики СВ и СЗ простираения. Для части максимумов (рис. 10) кинематика трещин не была убедительно установлена, и они вынужденно были исключены из анализа.

Хорошо проявлены группы сколов с левосдвиговой кинематикой, очень близкие по ориентировке и типу смещения к трещинам в нуммулитовых известняках, так же образующие парагенез широтной зоны левого сдвига (рис. 10, *г*).

Трещины, кинематика которых отлична от выраженных в эоценовых известняках, вынесены на рис. 10, *д*. Чтобы разобраться в стрессовых условиях их возникновения, приходится предполагать, что структуры одного парагенеза с большей вероятностью будут наблюдаться в одной точке наблюдения. Так, трещины с левосдвиговым (СЗ простираения) и с правосдвиговым смещениями (СВ простираения) согласно модели Кулона–Андерсона образуют парагенез с субширотной осью сжатия (рис. 10, *е*). Широтные субвертикальные отрывы и сбросы, не

связанные с боковым отпором, могут входить в этот же парагенез или маркировать обстановки меридионального растяжения — широтного сжатия. Пара групп сколов СЗ простираения с правосдвиговыми смещениями образуют Y- и R-сколы парагенеза правого сдвига с ССВ сжатием (рис. 10, *ж*). В условиях субдолготного сжатия мог быть сформирован парагенез трещин право- и левосдвиговой кинематики; в этих же условиях или при СВ сжатии могли возникнуть и отрывы СВ простираения (рис. 10, *и*). Другие группы трещин менее надежно объединяются в парагенезы. Широтная (R-сколы) и две группы сколов СЗ простираения (Y- и R-сколы), с левосдвиговыми смещениями могут являться структурами зоны левого сдвига СЗ простираения, в условиях СВ сжатия (рис. 10, *з*). А присутствие долготных вертикальных отрывов (рис. 10, *е*) предполагает существование обстановок широтного растяжения — меридионального сжатия.

Система трещин, построенная программой Move (рис. 8 *а*, врезка) для условий формирования моноклинали и периклинального разворота слоев, к сожалению, не имеет кинематической интерпретации трещин. Малоамплитудные максимумы наклонных трещин СЗ и ЮВ падений соответствуют по положению паре кулоновских сколов условий ССЗ сжатия. Сравнение положения полюсов трещин смоделированной системы с замеренными в нуммулитовых известняках дает правосдвиговую кинематику субвертикальных сколов СЗ простираения. Интенсивный максимум вертикальных долготных трещин не имеет точного аналога среди трещин в эоценовых известняках; для наиболее близких по ориентировке кинематика не определена, но в датских известняках им соответствует максимум группы отрывов. Если эти трещины рассматривать как парагенез, то они так же могут быть результатом меридионального или субмеридионального сжатия.

При сравнении трещиноватости палеоценовых и эоценовых известняков очевидны сходные группы трещин. Это, в первую очередь, структуры модели

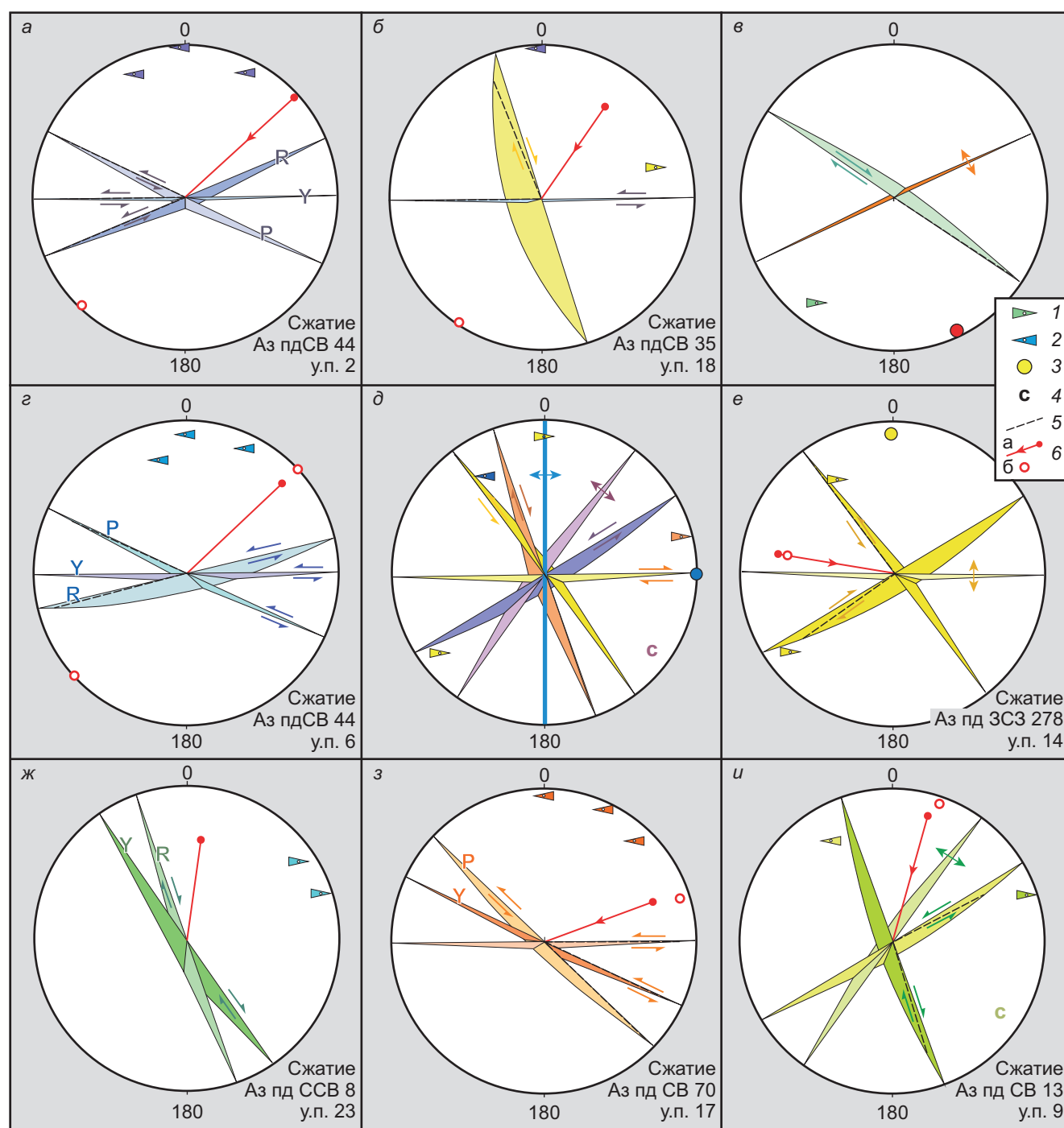


Рис. 10. Реконструируемые поля напряжений по трещинам в нуммулитовых известняках верхнего ипра — лютета (а–в) и палеоценовых породах (г–и). Полюса трещин (1–4): сколы с праводвиговой (1) и леводвиговой (2) кинематикой, 3 — отрывы, 4 — сколы со сбросовой кинематикой; 5 — ориентировка тектонической штриховки; 6 — положение оси главного сжатия, восстановленное по положениям плоскостей трещин (а) и с учетом положения штриховки (б). Стрелки отражают кинематику трещин

Риделя широтной зоны левого сдвига обстановок СВ сжатия. Многочисленные широтные Y-сколы ориентированы параллельно участку ущелья р. Чурюк-Су и логично считать, что долина проработана именно по зоне левого сдвига. Выраженность этих трещин в обоих компетентных интервалах свидетельствует о послелютетском времени их формирования.

Большее количество групп трещин и их разнообразие в палеоценовых породах связано, прежде всего, с большим количеством фаз деформаций,

проявившихся после их накопления. В меньшей степени влияние могла оказывать и толщина нижнеипрских глин между компетентными толщами, частично “гасившая” передачу напряжений верхней толще. Парагенезы широтного — субширотного сжатия есть в палеоценовых отложениях, но не проявлены в эоценовых известняках, т.е. такие напряжения могли отвечать стрессовому режиму долины раннеэоценового этапа деформаций в Горном Крыму [Никишин и др., 2006; Лыгина и др., 2019,

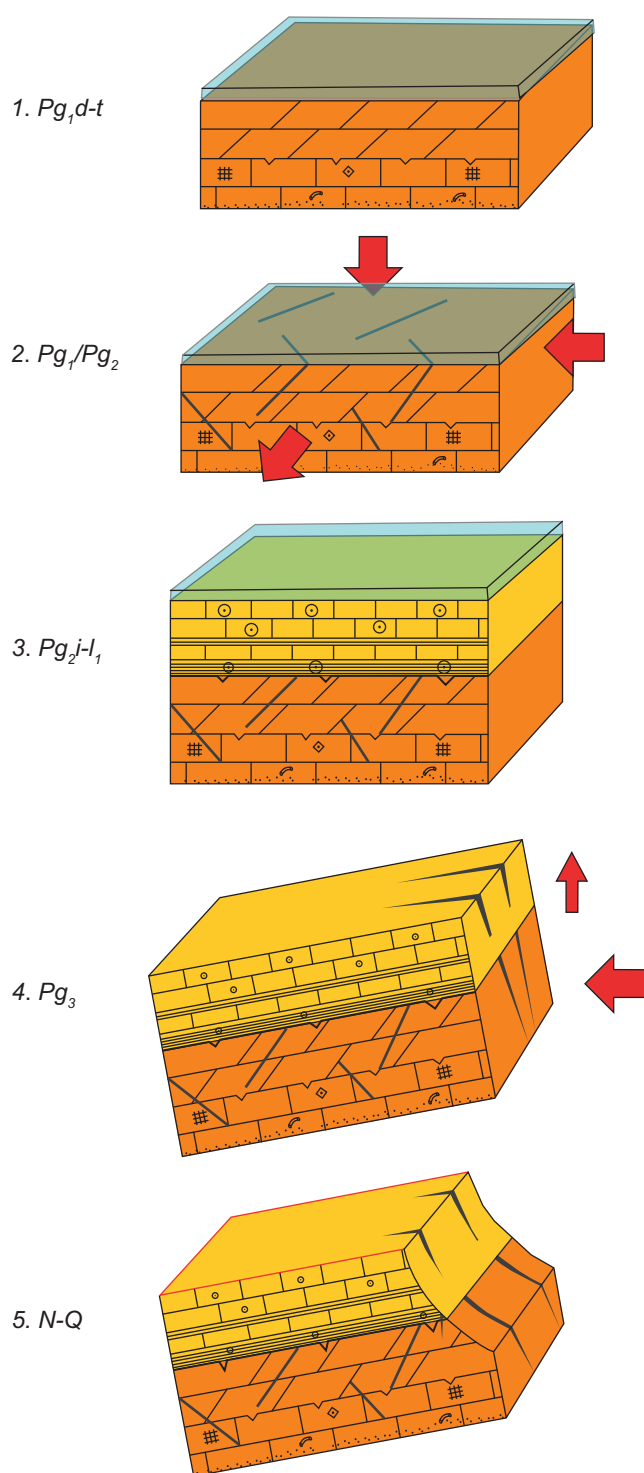


Рис. 11. Общая модель формирования трещиноватости разреза г. Сувлу-Кая

2022]. Сходные ориентировки напряжений для предсреднеэоценового этапа реконструированы в районе Белогорска [Лыгина и др., 2019], а в трещиноватости пород верхнего мела близ Чуфут-Кале [Фокин, 2023] обстановки субширотного сжатия проявились ранее, чем меридионального или северо-западного.

Предыдущими исследованиями [Курдин, Тверитинова, 1997; Вольфман, 2015; Курдин и др., 2017] определено доминирование меридиональных и СЗ напряжений сжатия на новейшем тектоническом этапе развития Крыма в целом и Горного Крыма

в частности. Однако в данном районе следы этих напряжений проявлены слабо; самыми значимыми становятся трещинные парагенезы с СВ ориентировкой оси главного сжатия. Для объяснения этого явления обратимся к разломной структуре фундамента ближних окрестностей Бахчисарая. Самым крупным разломом этого района является Бодракский разлом СВ простирания, разделяющий Горнокрымскую и Лозовскую структурные зоны фундамента. Смещения по нему устанавливаются для конца ранней и для средней юры и в кайнозое [Никишин и др., 2006]. Разлом обнажается северо-восточнее Бахчисарая, в районе с. Трудлюбовка, а на юго-запад по простиранию предположительно трассируется под меловыми отложениями в овраг. Кичик-Ашлама-Дере, а затем с плавным разворотом принимает широтную ориентировку, уходя в долину р. Чурюк-Су (рис. 1). Взбросо-левосдвиговые смещения по разлому на северо-востоке косвенно подтверждаются приразломными деформациями и по аналогии с левосдвиговыми смещениями разломов СВ простирания [Фокин, 2023]. Такие смещения у разлома СВ простирания будут реализовываться при сжатии в северных румбах.

На изгибе левого сдвига от северо-восточного простирания к широтному, субмеридиональное сжатие должно привести к возникновению транспрессии, с локальной переориентировкой сжатия на северо-восточное, которое в основном и зафиксировалось в трещиноватости компетентных палеогеновых пород в районе Бахчисарая.

Выводы. Проведенное моделирование и изучение реальной тектонической трещиноватости пород на СВ окраине Бахчисарая привели к следующим результатам и выводам.

I. Впервые выполнено трехмерное геомеханическое моделирование трещиноватости палеогеновых карбонатных толщ на стадии образования моноклиальной структуры в районе г. Сувлу-Кая. Модельная система дизъюнктивов только отчасти соответствует реальной, но ее формирование может быть описано ситуацией меридионального — северо-северо-западного сжатия — доминирующего стрессового режима для Горного Крыма на новейшем тектоническом этапе [Курдин, Тверитинова, 1997 и др.].

II. В замеренной трещиноватости палеоэоценовых и эоценовых карбонатных пород запечатлелись этапы деформаций с разной ориентировкой главного сжатия. Восстановлены поля доминировавших напряжений по замерам трещин.

III. Составлена принципиальная схема развития изученного региона (рис. 11) в палеоцене — квартере. Она включает в себя следующие этапы.

1. Даний — танет. Формирование известняков и мергелей.

2. Граница палеоцен/эоцен. Первый этап деформаций. Региональное сжатие параллелизуется с началом складчатости в Турции [Лыгина и др., 2019; 2022], но преобладающее сжатие ориентировано

субширотно. Это связано с передачей напряжений сжатия из области Большого Кавказа с участием механизма транспрессии [Фокин, 2023].

3. Ипр — ранний лютет. Накопление карбонатных глин и нуммулитовых известняков.

4. а) Оligocen — квартал. Второй, главный этап деформаций. Формирование моноклиальной структуры, связанное с ростом Качинского поднятия [Никишин и др., 2006]. Ранее возникшие дизъюнктивы в палеоценовых карбонатах реактивируются в условиях субмеридионального и северо-восточного сжатия. Первое повсеместно проявлено в Крымско-Кавказском регионе [Курдин и др., 2017]. Второе связано с механизмом локальной транс-

прессии вследствие левосдвиговых смещений по Бодракскому разлому. Системы трещин этого этапа в эоценовых и палеоценовых известняках образовывались в едином поле напряжения, но отдельно, из-за разделяющей их демпферной толщи глин.

б) Плиоцен — квартал. Продолжение формирования моноклинали и развитие систем трещин. Выработка современного рельефа.

Благодарности. Работа выполнена с использованием материалов ЦКП «Геопортал» МГУ имени М.В. Ломоносова. Авторы благодарят Midland Valley Exploration Ltd. за возможность использовать программное обеспечение Move в учебных и научных целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вольфман Ю.М. Деформационные режимы и кинематические обстановки новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма // Геофизический журнал. 2015. Т. 37, № 1. С. 100–120.

Геологическое строение Качинского поднятия Горного Крыма (стратиграфия кайнозоя, магматические, метаморфические и метасоматические образования): Учебное пособие / Под ред. О.А. Мазаровича, В.С. Милеева. М.: Изд-во МГУ, 1989. 160 с.

Зернецький Б.Ф., Рябоконь Т.С., Люльева С.А. Питання вивчення осадового комплексу палеоцену Кримського і Керченського півостровів // Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України Т. 7. 2014. С. 101–125.

Курдин Н.Н., Никитин М.Ю., Тверитинова Т.Ю. Разрывные нарушения мел-кайнозойского комплекса чехла Качинского антиклинория юго-западного Крыма // Полевые практики в системе высшего образования: Материалы 5-й Всероссийской конференции. СПб.: ООО «Изд-во ВВМ», 2017. С. 163–165.

Курдин Н.Н., Тверитинова Т.Ю. Тектодинамические условия формирования альпийской структуры Качинского поднятия Горного Крыма // Очерки геологии Крыма. Труды Крымского геологического научно-учебного центра им. проф. А.А. Богданова. Вып. 1. М.: Изд-во геол. ф-та МГУ, 1997. С. 131–151.

Лыгина Е.А., Никишин А.М., Тверитинова Т.Ю. и др. Эоценовые палеосейсмодислокации горы Ак-Кая (Белогорский район, Крым) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 1. С. 44–54.

Лыгина Е.А., Правикова Н.В., Чижова Е.Р. и др. Эоценовая сейсмичность и палеогеография Центрального Крыма // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 5. С. 68–77.

Муратов М.В. Руководство по учебной геологической практике в Крыму. Т. 2. Геология Крымского полуострова. М.: Недра, 1973. 192 с.

Никишин А.М., Алексеев А.С., Барабошкин Е.Ю. и др. Геологическая история Бахчисарайского района Крыма (учебное пособие по Крымской практике). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. 60 с.

Семененко В.Н. Верхнемиоценовые молассы Альминского прогиба // Геологический журнал. 2003. № 2. С. 31–58.

Фокин П.А. Системы дизъюнктивных нарушений в верхнемеловых породах на северо-восточном склоне плато Чуфут-Кале (Бахчисарайский р-н, Крым) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 3. С. 22–30.

Nikishin A.M., Okay A., Tüysüz O., et al. The Black Sea basins structure and history: New model based on new deep penetration regional seismic data. P. 2: Tectonic history and paleogeography // Marine and Petroleum Geology. 2014. P. 1–15.

Wang Y., Xiong Y., Xu K. A Mass-Spring model for surface mesh deformation based on shape matching: Proceedings of ACM Graphite. Kuala Lumpur, 2006. P. 376–380.

<http://www.mve.com/>

Статья поступила в редакцию 11.11.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 551.243

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-32-44

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ПШЕХСКО-АДЛЕРСКОЙ ФЛЕКСУРНО-РАЗРЫВНОЙ ЗОНЫ БОЛЬШОГО КАВКАЗА ПО ДАННЫМ СТРУКТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Татьяна Юрьевна Тверитинова^{1✉}, Антон Витальевич Маринин²,
Иван Владимирович Бондарь³

¹ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tvertat@yandex.ru ✉

² Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; marinin@ifz.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-1099-6492>

³ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; bond@ifz.ru

Аннотация. Проведенное в долине р. Белой исследование малых дизъюнктивных нарушений позволило установить тектодинамические условия формирования Пшехско-Адлерской поперечной зоны Большого Кавказа. В данной зоне показано наличие сдвиговых перемещений разного масштаба и преобладание обстановки горизонтального сдвига. При помощи метода катакlastического анализа установлены различия параметров напряженно-деформированного состояния в разных тектонических комплексах и структурах региона. Выявленные структурные парагенезы меридионального и северо-восточного сжатия, определяют региональную правосдвиго-раздвиговую природу меридиональной Пшехско-Адлерской зоны с развитием внутри зоны деформаций раздвиго-левосдвиговых структур северо-восточного простирания.

Ключевые слова: Пшехско-Адлерская зона, разрывные нарушения, поле напряжений, локальное стресс-состояние, тектонофизика, зеркала скольжения, структурный парагенез

Для цитирования. Тверитинова Т.Ю., Маринин А.В., Бондарь И.В. Особенности строения Пшехско-Адлерской флексурно-разрывной зоны Большого Кавказа по данным структурных исследований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 32–44.

STRUCTURAL FEATURES OF THE PSHEKHA-ADLER FAULT ZONE OF THE GREATER CAUCASUS ACCORDING TO STRUCTURAL STUDIES

Tatyana Yu. Tveritinova^{1✉}, Anton V. Marinin², Ivan V. Bondar³

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tvertat@yandex.ru ✉

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; marinin@ifz.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-1099-6492>

³ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; bond@ifz.ru

Abstract. The study of minor faults carried out in the valley of the Belaya River made it possible to establish the tectodynamic conditions for the formation of the Pshekha-Adler fault zone of the Greater Caucasus. In this zone, the presence of strike-slip displacements of different scales and the predominance of the situation of horizontal displacement are shown. Using the method of cataclastic analysis, differences in the parameters of the stress-and-strain state in different tectonic complexes and structures of the region have been established. The revealed structural pattern of meridional and northeastern compression determine the regional dextral strike-slip fault and extensional fault nature of the meridional Pshekha-Adler fault zone with the development of sinistral strike-slip faults and extensional faults of the northeastern strike inside the deformation zone.

Keywords: Pshekha-Adler fault zone, fault, stress field, local stress state, tectonophysics, slickenside, structural pattern

For citation. Tveritinova T.Yu., Marinin A.V., Bondar I.V. Structural features of the Pshekha-Adler fault zone of the Greater Caucasus according to structural studies. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 32–44. (In Russ.).

Введение. В структуре складчато-глыбового сооружения Большого Кавказа отчетливо выделяются сегменты, разделенные относительно узкими поперечными орогену флексурно-разрывными зонами субмеридионального и северо-восточного простирания, по которым изменяется ширина орогена, наб-

людаются флексурообразные изгибы продольных структурно-фациальных зон в плане, фациальные и металлогенические различия мезозойско-кайнозойских отложений [Хаин и др., 1962; Милановский, Хаин, 1963; Милановский, 1968; Шарданов, 1968; Резников, 1969, 1970; Несмеянов, Измайлов, 1995;

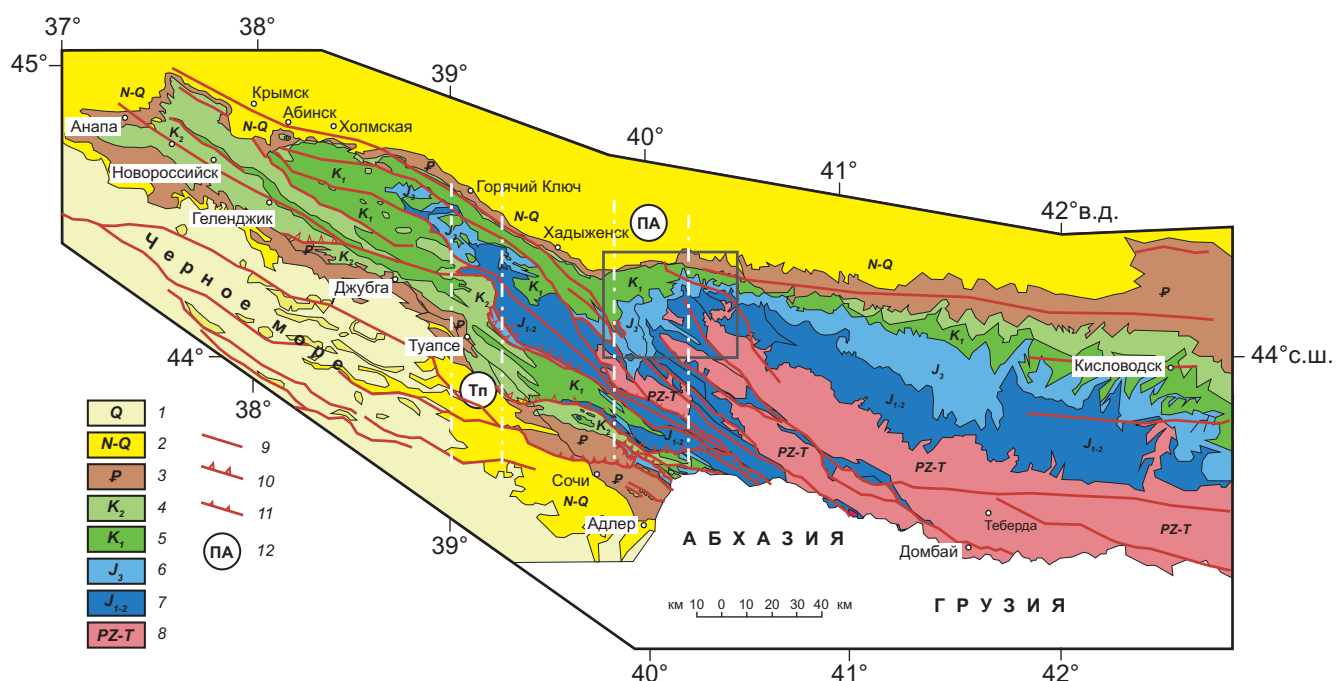


Рис. 1. Геологическая схема Западного Кавказа, составленная с учетом данных В.Е. Хаина, С.Г. Корсакова, В.А. Лаврищева: 1–8 — области развития отложений кватерна (1), неогена–кватерна (2), палеогена (3), верхнего мела (4), нижнего мела (5), верхней юры и келловая (6), нижней и средней юры (7), палеозоя и триаса (8); 9–11 — региональные разрывные нарушения, в том числе имеющие взбросо-надвиговую (10) и покровную (11) кинематику; 12 — флексурно-разрывные зоны (ПА — Пшехско-Адлерская, Тп — Туапсинская) показаны белым пунктиром. Рамкой выделена территория исследований

Гиоргобиани, 1999; Расцветаев, 1989; Расцветаев и др., 2010; 2011]. Крупные поперечные зоны выражены резкой перестройкой структур всего орогена Большого Кавказа и разным уровнем эрозионно-денудационного среза. При детальной геологической съемке [Корсаков и др., 2004; Лаврищев и др., 2011] и специальных структурных исследованиях [Расцветаев и др., 2010, 2011; Маринин, Тверитинова, 2016; Трихунков и др., 2018; 2019; Гайдаленок и др., 2021] выявляются подобные структуры меньшего масштаба. Морфологическое выражение этих зон различно. В одних присутствуют признаки квазипластического течения в зонах изгибов и вергентности продольных складчатых структур, другие проявляются малоамплитудными сбросо-сдвиговыми разрывами. Например, для Туапсинской поперечной зоны характерна концентрация раздвиго-правосдвиговых деформаций, обусловленных действием меридионального и северо-восточного горизонтального сжатия [Маринин, Тверитинова, 2016].

Одной из крупнейших поперечных к орогену Большого Кавказа структур является Пшехско-Адлерская зона субмеридионального простирания, разделяющая Центральный и Северо-Западный сегменты Большого Кавказа (рис. 1). Пшехско-Адлерская поперечная зона рассматривается в качестве «переходной зоны глубинных разломов и флексур» на западном погружении поперечного Транскавказского поднятия [Милановский, Хаин, 1963] или зоны поперечного дробления [Несмеянов, 2004]. На

геологической карте Пшехско-Адлерская зона выражена погружением доальпийских (допалеозойских и палеозойских) комплексов и ниже-среднеюрских отложений Лабино-Малкинской зоны прерывистой складчатости, перекрываемых келловей-эоценовыми отложениями Северо-Кавказской моноклинали. Ширина мегантиклинория по выходам юрских образований к востоку от зоны составляет 40–50 км, а к западу 5–10 км. Здесь заметно расширяется Кубанский краевой прогиб, а южные тектонические зоны косо срезаются Черноморской впадиной. Повидимому, зона имеет глубокое заложение и характеризуется длительным развитием, с ней связаны различия в аномальных гравитационном и магнитном полях. Известными структурами зоны являются давно выделенные Цицинский и Курджипский разломы [Милановский, Хаин, 1963]. В ее пределах выявлена Адыгейско-Лабинская антикавказская зона дислокаций, которая сопровождается грабенообразными прогибами в доюрском основании и широким проявлением сдвиговых перемещений вдоль разломов северо-северо-западного простирания [Корсаков и др., 2004]. В зоне расположен крупный меридионально ориентированный тектонический блок Лагонакского плато, возможно представляющий тектонический покров [Белоусов, 1952; Корсаков и др., 2004; Лаврищев и др., 2011]. В пределах зоны происходит Z-образный (правосдвиговый) изгиб в плане продольных кавказских складчато-разрывных зон с запад-северо-западного простирания на

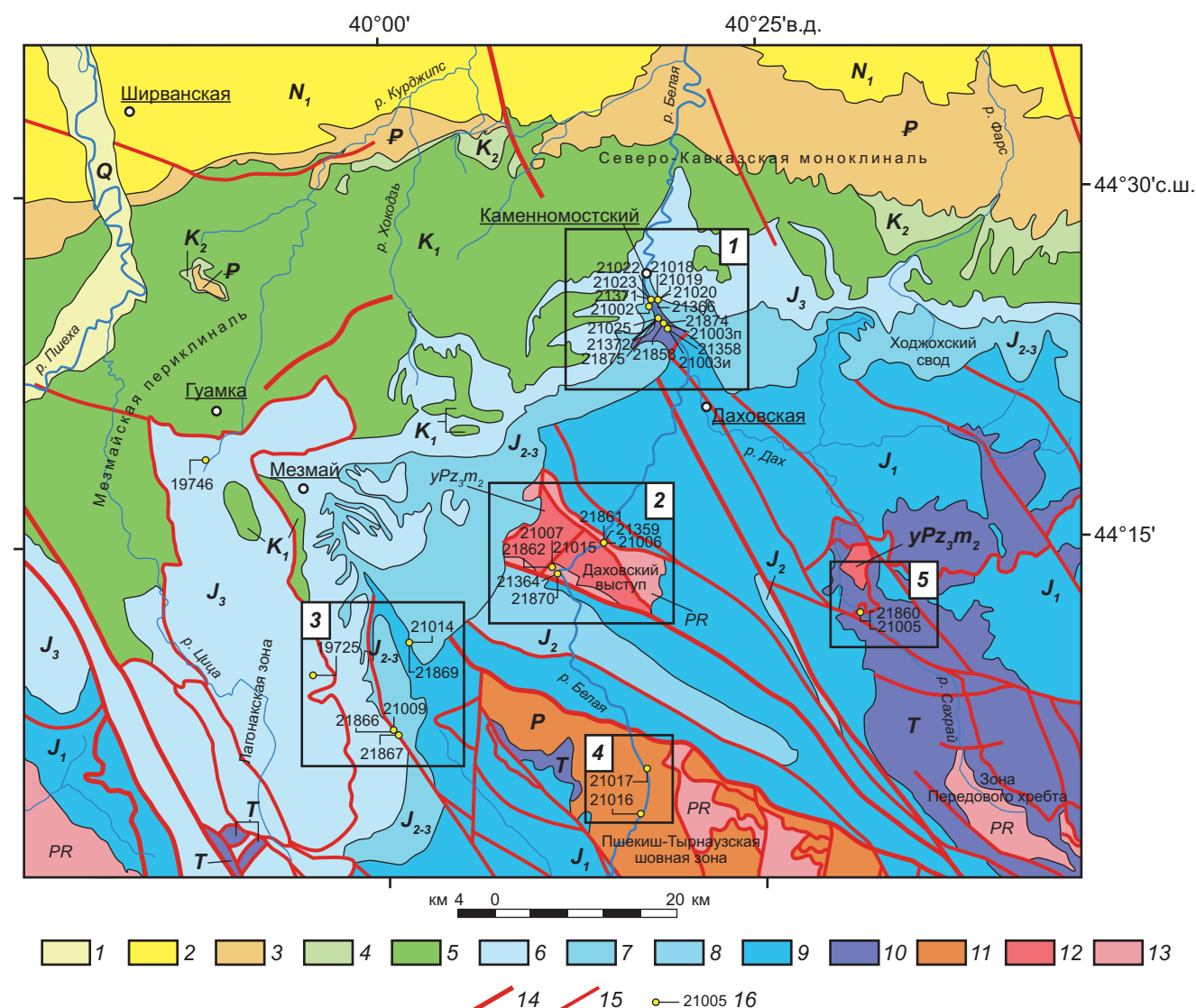


Рис. 2. Геологическая схема участков исследований Белореченского пересечения Большого Кавказа. Геологическая основа составлена с учетом данных [Корсаков и др., 2004; Лаврищев и др., 2011]. Условные обозначения: 1–13 — геологические подразделения (1 — квартер, 2 — неоген, 3 — палеоген, 4 — верхний мел, 5 — нижний мел, 6 — верхняя юра, 7 — келловей — верхняя юра, 8 — средняя юра, 9 — нижняя юра, 10 — триас, 11 — пермь, 12 — позднепалеозойские граниты малкинского комплекса, 13 — протерозой нерасчлененный); 14–15 — разрывные нарушения (главные (14), второстепенные (15)); цифры на линиях (16) — точки наблюдений и их номера. Прямоугольниками показаны участки структурных наблюдений: 1 — Ходжохская теснина; 2 — Даховский выступ; 3 — Лагонакская зона; 4 — Пшекиш-Тырнаузская зона; 5 — зона Передового хребта

северо-западное. Таким образом, Пшехско-Адлерская поперечная зона Большого Кавказа является структурным узлом, в котором сосредоточены разноориентированные зоны концентрации деформаций различного кинематического типа.

Материалы и методы исследований. Для установления кинематической природы выделенных зон концентрации деформаций Белореченского пересечения Большого Кавказа нами проведены структурные исследования малых дизъюнктивов на пяти участках (рис. 2). Основное внимание уделено изучению зеркал скольжения, отрывных трещин и стресс-стилолитов. Используемые методы парагенетического анализа малых дизъюнктивов Л.М. Расцветаева [1987] и катакlastического анализа разрывных нарушений Ю.Л. Ребецкого [Ребецкий,

2007; Ребецкий и др., 2017] позволили выявить основные системы разрывных нарушений и рассчитать параметры напряженно-деформированного состояния локальных стресс-тензоров в пределах изученной территории, а также провести выделение устойчивых структурных парагенезов рассматриваемой территории.

На Белореченском пересечении Большого Кавказа развиты доальпийские и разновозрастные альпийские комплексы отложений. Наиболее древние образования, обнажающиеся в эрозионных окнах ниже-среднеюрского комплекса, представлены протерозойскими метаморфитами и прорывающими их позднепалеозойскими гранитоидами (участок «Даховский выступ»). К доальпийским относят также палеозойские складчатые комплексы зоны

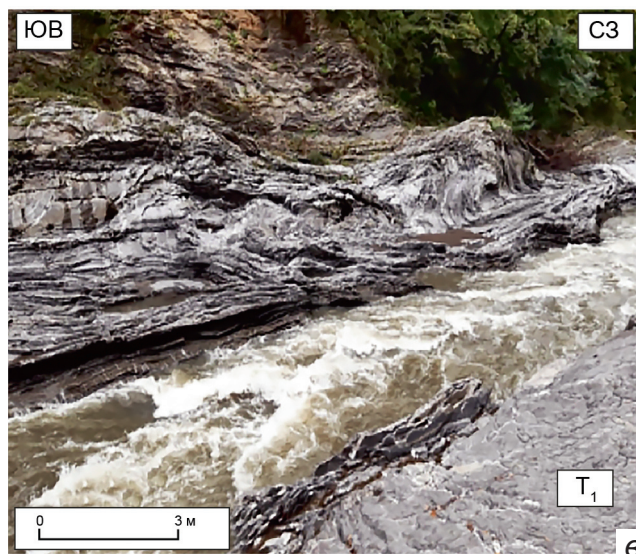
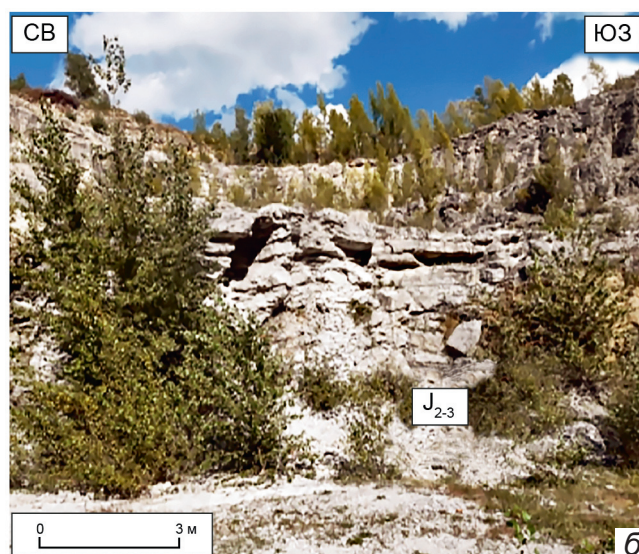
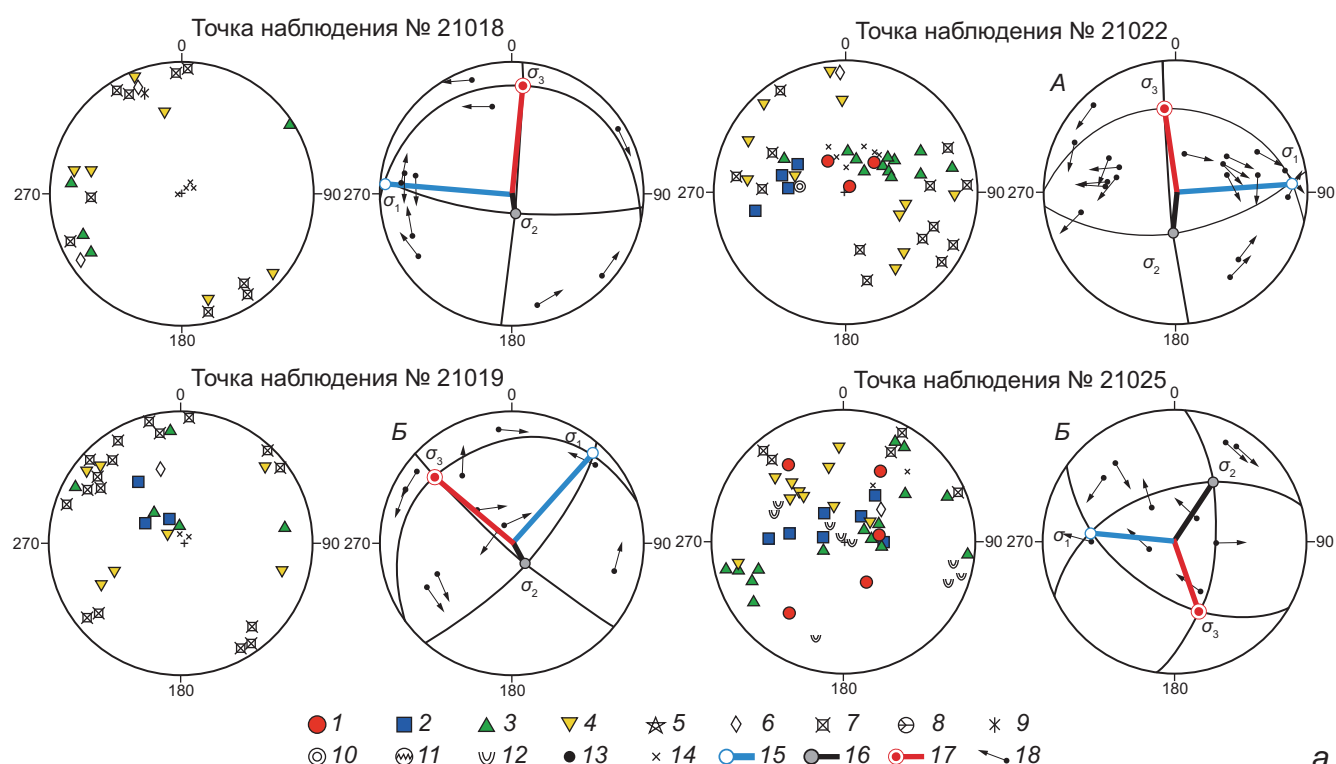


Рис. 3. Участок «Ходжохская теснина». а — круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показаны полюса плоскостей тектонических трещин разного типа (слева) и положение осей главных напряжений (справа). 1–11 — полюса тектонических трещин с преимущественным типом перемещений: 1 — взбросы, 2 — сбросы, 3 — правые сдвиги, 4 — левые сдвиги, 5 — взбросо-сбросы, 6 — сдвиги, 7 — отрывы, 8 — «перьевые» отрывные структуры, 9 — жилы, 10 — зоны дробления, 11 — стресс-стилолиты; 12 — шарниры мелких складок; 13 — сколы; 14 — элементы залегания слоистости; 15–17 — оси главных нормальных напряжений: 15 — минимальных, 16 — промежуточных, 17 — максимальных сжимающих; 18 — направление перемещения висячего блока в полюсах трещин (зеркал скольжения) со структурно-кинематическими данными, которые были использованы при реконструкции; б — карбонатные моноклинально залегающие толщи верхней юры; в — карбонатные складчатые толщи триаса

Передового хребта (одноименный участок) и Пшекиш-Тырнаузской шовной зоны (одноименный участок), а также преимущественно карбонатные триасовые отложения Ходжохского свода (участок «Ходжохская теснина»). К альпийским образованиям относятся верхнеюрские отложения Северо-Кавказской моноклинали (участки «Ходжохская теснина» и «Лагонакская зона»).

Результаты структурных наблюдений и определение палеонапряжений на участках исследования. *Ходжохская теснина* (ущелье р. Белой к югу от ст. Каменноостской) прорезает терригенно-карбонатные отложения средней-верхней юры, которые с угловым несогласием залегают на смятых в сложные складки известняковых толщах триаса. Здесь в районе Ходжохского свода происходит раз-

ворот верхнеюрской моноклинали на сменяющую ее к западу Мезмайскую периклинали (рис. 3). В полого залегающих юрских отложениях с падением на северо-запад под углами $5-10^\circ$ выявляются крутопадающие отрывы и сдвиги, а также пологие зеркала скольжения (рис. 3, б). Среди левых сдвигов преобладают крутопадающие структуры северо-восточного и северо-западного простирания, среди правых — северо-западного и меридионального. Система сбросовых структур имеет северо-западное падение плоскостей сместителя. Главные структурные парагенезисы обусловлены северо-западным сжатием — северо-восточным растяжением и меридиональным сжатием — широтным растяжением при сдвиговом типе деформирования (обстановка горизонтального сдвига). Отрывные структуры указывают на обстановку северо-западного растяжения.

Для комплекса триасовых отложений характерны сложные складки северо-восточного и широтно-го простирания, формирование которых вероятно было связано с докелловейскими покровно-надвиговыми деформациями. В трещиноватости выявлены как крутопадающие, так и пологие зеркала скольжения, отражающие квазипластический характер деформаций. Наряду с зеркалами скольжения развиты также хрупкие структуры в виде субвертикальных отрывов меридионального и северо-восточного простирания (рис. 3, в). Основные системы дизъюнктивов представлены левыми сдвигами северо-восточного простирания, правыми сдвигами северо-западного простирания, относительно пологими взбросами и сбросовыми структурами. Правые сдвиги образуют характерный центральный пояс течения (структуры одного простирания с разными углами падения). Главная обстановка формирования большинства трещинных структур различного кинематического типа определяется условиями субмеридионального сжатия — субширотного растяжения. По ориентировке осей напряжения в пространстве устанавливается обстановка горизонтального сдвига и его сочетания с горизонтальным сжатием и растяжением.

Даховский выступ представлен выходами в долине р. Белая кристаллических пород протерозойского балканского метаморфического комплекса и прорывающего их позднепалеозойского массива гранитоидов малкинского комплекса среди нижне-среднеюрских песчано-глинистых толщ Лабино-Малкинской зоны прерывистой складчатости. В гранитном массиве для северной его краевой зоны (рис. 4, а) характерны преимущественно сдвиговые зеркала скольжения. Левые сдвиги северо-восточного простирания образуют левосдвиговый пояс течения. Вместе с тем по сдвиговым зеркалам скольжения намечается деформация сдвигового вращения (то есть на диаграмме (рис. 4, верхний ряд) полюса сдвигов распределены по всей ее периферии).

Кроме того, наблюдаются пологие зеркала, скольжения, отражающие наличие покровных структур, которые выявлены при картировании палеозойских комплексов [Ненахов и др., 2019]. Главные структурные парагенезисы определяются меридиональным (до северо-западного) направлением максимальных сжимающих напряжений и широтной/субвертикальной ориентировкой минимальных сжимающих напряжений (растяжения), а также соответственно преобладанием обстановок горизонтального сдвига и горизонтального сжатия. В южной краевой зоне массива также развиты различно ориентированные зеркала скольжения с главной системой взбросо-сдвиговых структур юго-восточного падения (рис. 4, нижний ряд) и определяется обстановка субмеридионального (северо-северо-западного) максимального сжатия и субширотного (восток-северо-восточного) растяжения. Структурные рисунки трещиноватости в гранитоидах по широкому разбросу ориентировок трещин различного кинематического типа в максимумах указывают на формирование трещинных зон в условиях катаклического течения.

Лагонакская зона. В структуре Северо-Кавказской моноклинали рядом исследователей выделяется Лагонакский покров [Белоусов, 1952; Корсаков и др., 2004], представленный рифовыми известняками верхней юры — берриаса и продуктами их разрушения. Северный фланг предполагаемого покрова надвинут на меловые отложения моноклинали, южный — на юрские деформированные комплексы складчато-глыбового поднятия Главного хребта. Внутренняя его структура представляет полого (до $10-12^\circ$) падающую на север моноклинали, осложненную на отдельных участках мелкими складками и серией правых сдвигов северо-западного простирания. Формирование покрова возможно было связано со срывом преимущественно карбонатных масс Северо-Кавказской моноклинали с относительно поднятого блока Лабино-Малкинской зоны и перемещением их к западу — в сторону Мезмайской периклинали.

Проведенные замеры в верхнеюрских известняках автохтона показали, что в относительно полого залегающих известняковых толщах развиты преимущественно крутопадающие различно ориентированные сдвиги и отрывы (рис. 5). Наиболее представительна система левых сдвигов северо-западной ориентировки, отражающая субширотное сжатие. Меридиональные правые и широтные левые сдвиги формировались при северо-восточном сжатии в условиях сдвигового типа деформирования. В относительной близости к предполагаемому аллохтону выявлены и пологие структуры (диаграмма 21009), представленные пологими зонам дробления. На удалении от поверхности срыва (диаграмма 21014) формируются редкие структуры отрывного типа,

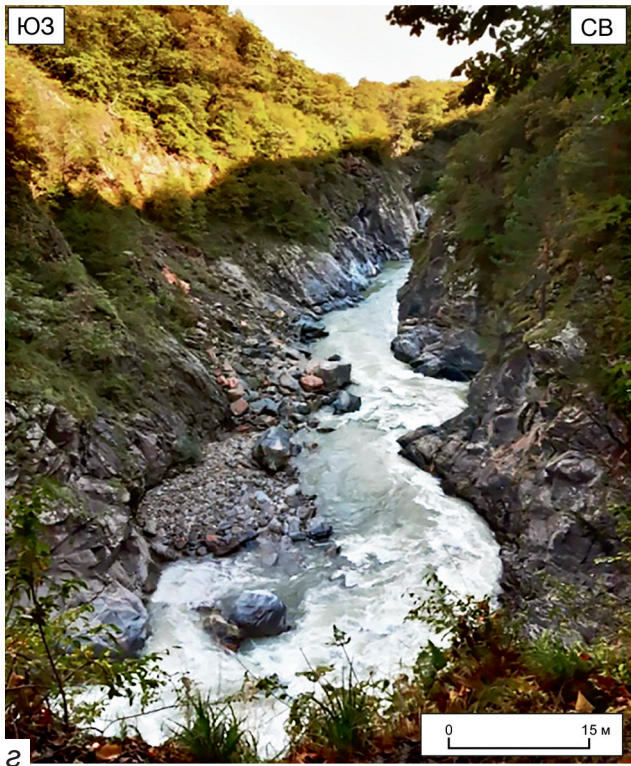
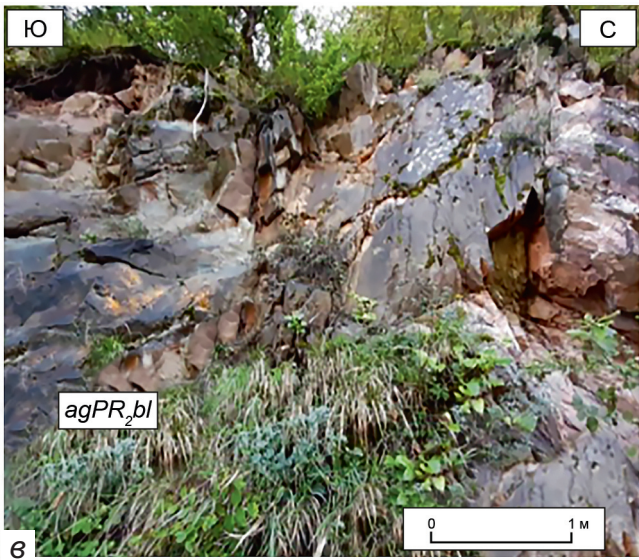
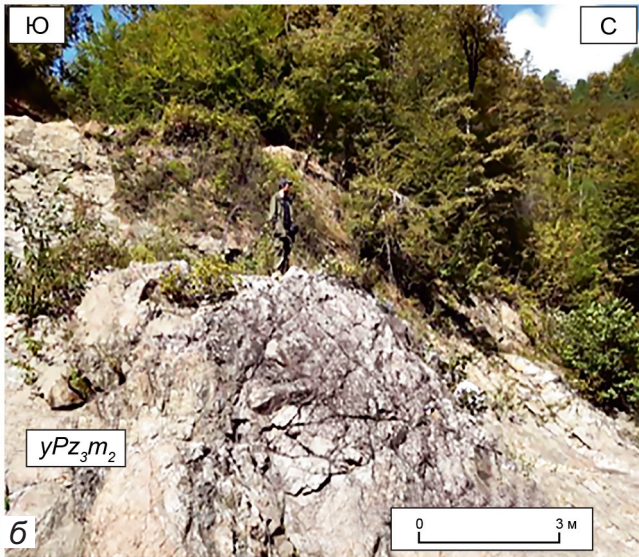
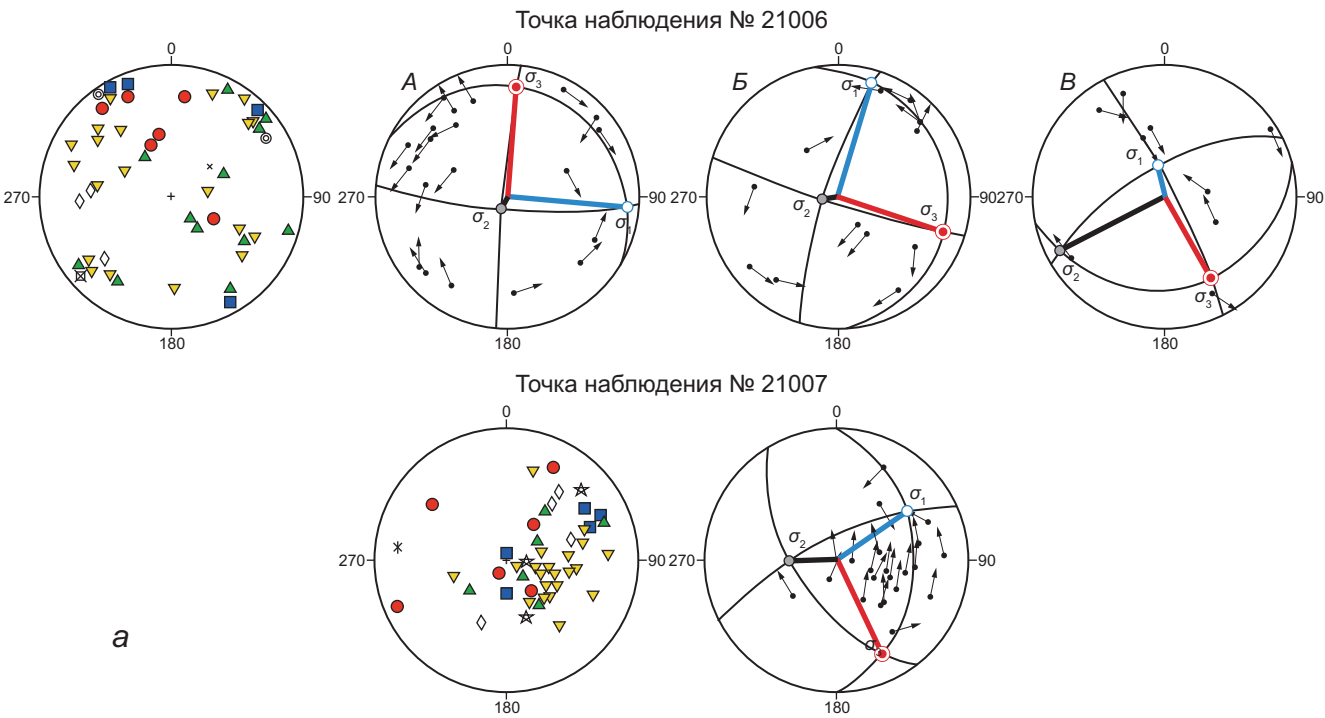


Рис. 4. Участок «Даховский выступ». а — круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы), показаны полюса плоскостей тектонических трещин разного типа (слева) и положение осей главных напряжений (справа). Условные обозначения см. рис. 3; б — южная краевая зона Даховского гранитного массива малкинского интрузивного комплекса; в — северная краевая зона массива и вмещающие метаморфические породы; г — вид Гранитного ущелья р. Белой, прорезающей граниты малкинского интрузивного комплекса

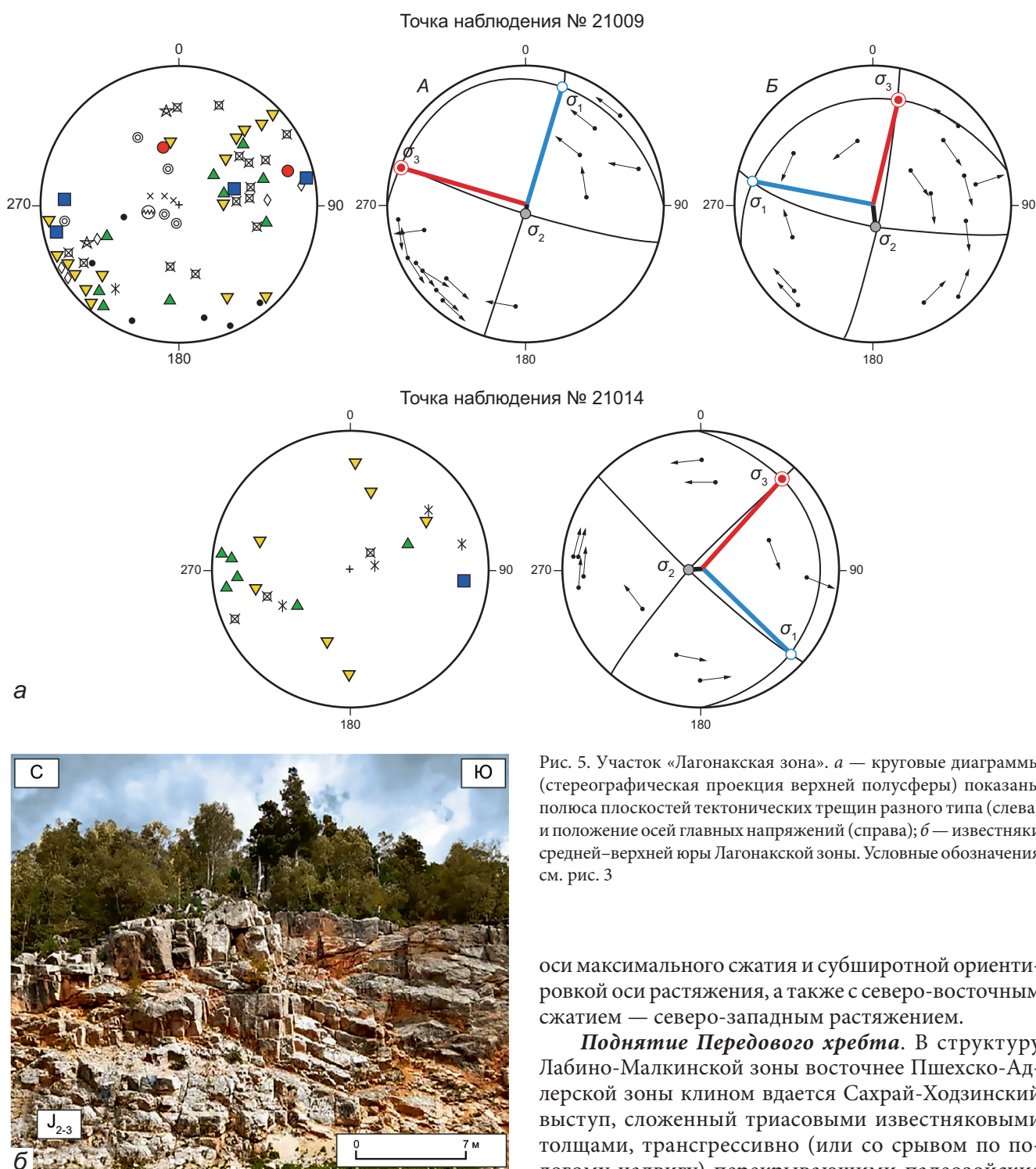


Рис. 5. Участок «Лагонакская зона». *а* — круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полусферы) показаны полюса плоскостей тектонических трещин разного типа (слева) и положение осей главных напряжений (справа); *б* — известняки средней–верхней юры Лагонакской зоны. Условные обозначения см. рис. 3

оси максимального сжатия и субширотной ориентировкой оси растяжения, а также с северо-восточным сжатием — северо-западным растяжением.

Поднятие Передового хребта. В структуру Лабино-Малкинской зоны восточнее Пшехско-Адлерской зоны клином вдаётся Сахрай-Ходзинский выступ, сложенный триасовыми известняковыми толщами, трансгрессивно (или со срывом по пологому надвигу) перекрывающими палеозойские комплексы. Триасовые отложения слагают пологую (до 15–20°) моноклиаль северного падения и характеризуются развитием преимущественно крутопадающих субмеридиональных правых сдвигов, отрывов и зон дробления, а также разноименных сдвигов северо-восточной ориентировки (рис. 7), которые указывают на обстановки субмеридионального и северо-восточного сжатия.

Обобщение данных о кинематике малых разрывных нарушений и палеонапряжений полученных по данным полевых исследований. Проведенные исследования на Белореченском пересечении

указывающие на возможное направление движения покрова в ЗЮЗ направлении.

В пределах **Пшекиш-Тырныаузской шовной зоны** проведены структурные исследования в пермских молассовых отложениях Белореченской впадины Пшекиш-Бамбакского тектонического блока. При пологом залегании толщ выявлены разноориентированные (с преобладанием меридиональных) субвертикальные отрывы и сдвиговые зеркала скольжения (рис. 6). Устанавливается сдвиговый тип поля напряжений с субмеридиональной ориентировкой

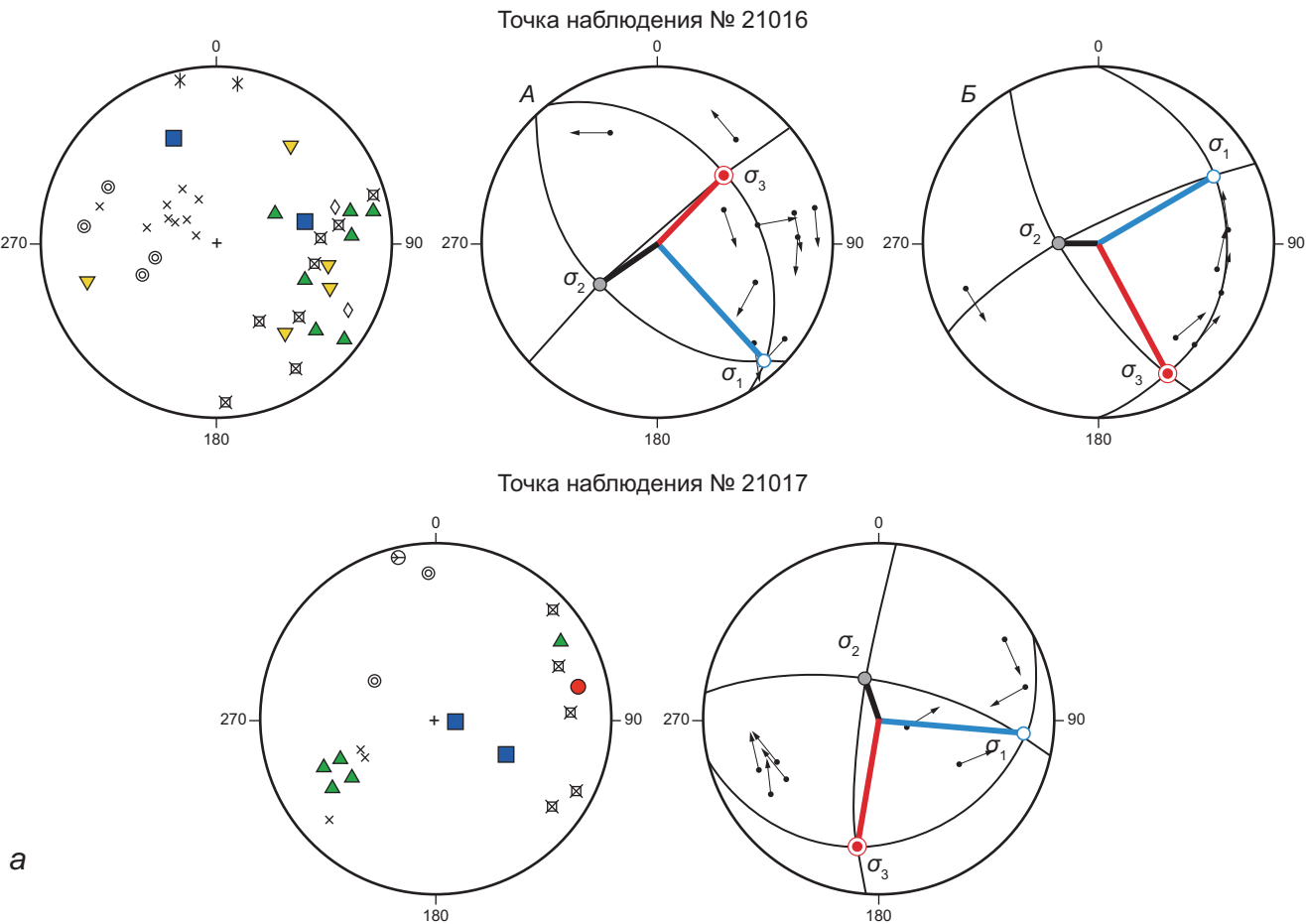
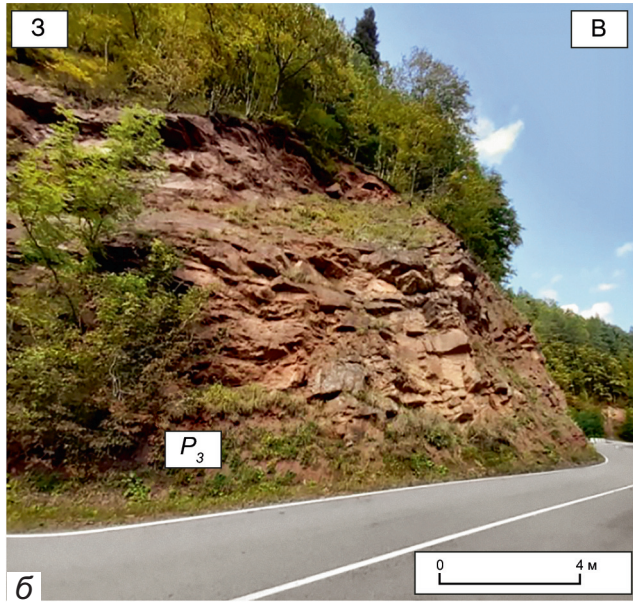
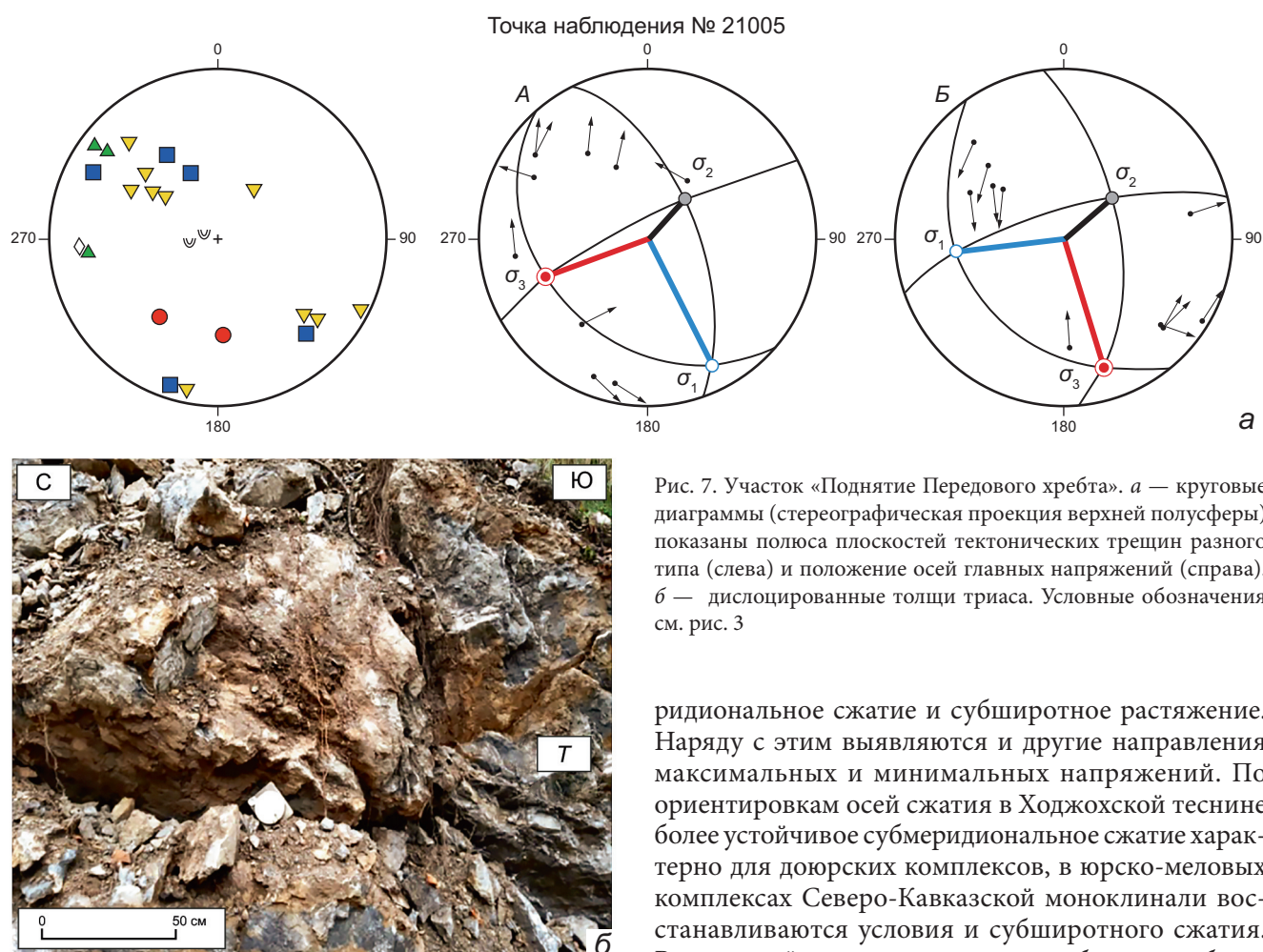


Рис. 6. Участок «Пшекиш-Тырныаузская шовная зона». а — круговые диаграммы (стереографическая проекция верхней полушеры) показаны полюса плоскостей тектонических трещин разного типа (слева) и положение осей главных напряжений (справа); б — пермские песчаники. Условные обозначения на рис. 3



Большого Кавказа выявили распределение малых дизъюнктивов различного кинематического типа (рис. 8). Преобладающая ориентировка элементов залегания слоистости субширотная. Среди зеркал скольжения преобладают сдвиги. Левые сдвиги северо-восточного простирания и правые — северо-западного вместе образуют парагенез субмеридионального сжатия. Достаточно четкие максимумы

образуют крутопадающие левые сдвиги северо-западного простирания. В субмеридиональной системе отмечаются как правые, так и левые сдвиги. Широкое развитие сдвиговых нарушений может указывать на проявление деформации сдвигового вращения. Отрывы и жилы вместе образуют большой периферийный пояс. При этом среди отрывов преобладают субвертикальные структуры северо-восточного простирания, отражающие условия преобладающего северо-западного растяжения. Среди жил в качестве главных выделяются системы субширотного (BCB) и субмеридионального (CC3) простирания. Менее представительны среди зеркал скольжения взбросы северо-западного простирания и сбросы северо-восточного, что позволяет их образования связывать с условиями СВ сжатия — СЗ растяжения. Судя по ориентировке крутопадающих разрывных нарушений (максимумы северо-восточного, северо-западного и меридионального простирания) можно предполагать, что они соответствуют сдвигам, а широтные



дизъюнктивы с падением в северном и южном направлении являются взбросами и надвигами. Крутопадающие зоны дробления меридионального простирания вероятно являются сдвиго-раздвигами, а широтные и северо-западного простирания с различным падением — структурами сжатия со сдвиговой составляющей.

Данные по зеркалам скольжения с установленным характером смещений использованы для определения параметров напряженно-деформированного состояния при помощи метода катакластического анализа разрывных нарушений [Ребецкий, 2007] и созданной на его основе компьютерной программы *STRESSgeol* (рис. 9–11). Установлено что на Белореченском пересечении преобладают обстановки горизонтального сдвига (более 60% случаев) (рис. 9, А). Это видно и по сводным диаграммам ориентации осей главных напряжений (рис. 9, Б, верхний ряд): промежуточная ось образует на диаграмме наиболее четкий максимум в центральной части диаграммы, а оси максимального сжатия и растяжения тяготеют к горизонтальной плоскости. Главный максимум оси растяжения — широтный, сжатия — субмеридиональный.

По ориентировкам осей напряжений (рис. 10) можно видеть, что повсеместно преобладает субме-

ридиональное сжатие и субширотное растяжение. Наряду с этим выявляются и другие направления максимальных и минимальных напряжений. По ориентировкам осей сжатия в Ходжохской теснине более устойчивое субмеридиональное сжатие характерно для доюрских комплексов, в юрско-меловых комплексах Северо-Кавказской моноклинали восстанавливаются условия и субширотного сжатия. В доальпийских комплексах преобладают обстановки меридионального сжатия, но в Даховском выступе четко проявлены и субширотное сжатие. Разнообразные ориентировки осей фиксируются и в альпийских комплексах Лагонакской зоны.

Относительно более сложные структурные рисунки трещиноватости, отражающие проявление различных типов напряженно-деформированного состояния и их сочетаний, характерны для всех доюрских комплексов (Ходжохский и Даховский выступы, Пшекиш-Тырныаузская зона и зона Передового хребта), а также альпийских комплексов Лагонакской зоны. В доальпийских комплексах сложность структурных рисунков естественно связывать с наложением разновозрастных полей напряжений. Сложные структурные обстановки деформирования, фиксирующиеся в альпийских комплексах Лагонакской зоны, могут быть связаны с формированием предполагаемого Лагонакского покрова (рис. 9, Б, нижний ряд).

Выводы. Проведенные на Белореченском пересечении исследования разрывно-трещинных структур методами парагенетического и катакластического анализа разновозрастных комплексов Большого Кавказа в районе глубинной Пшехско-Адлерской зоны доказывают, что она является раздвиго-правосдвиговой структурой, сформированной под действием **главного регионального ме-**

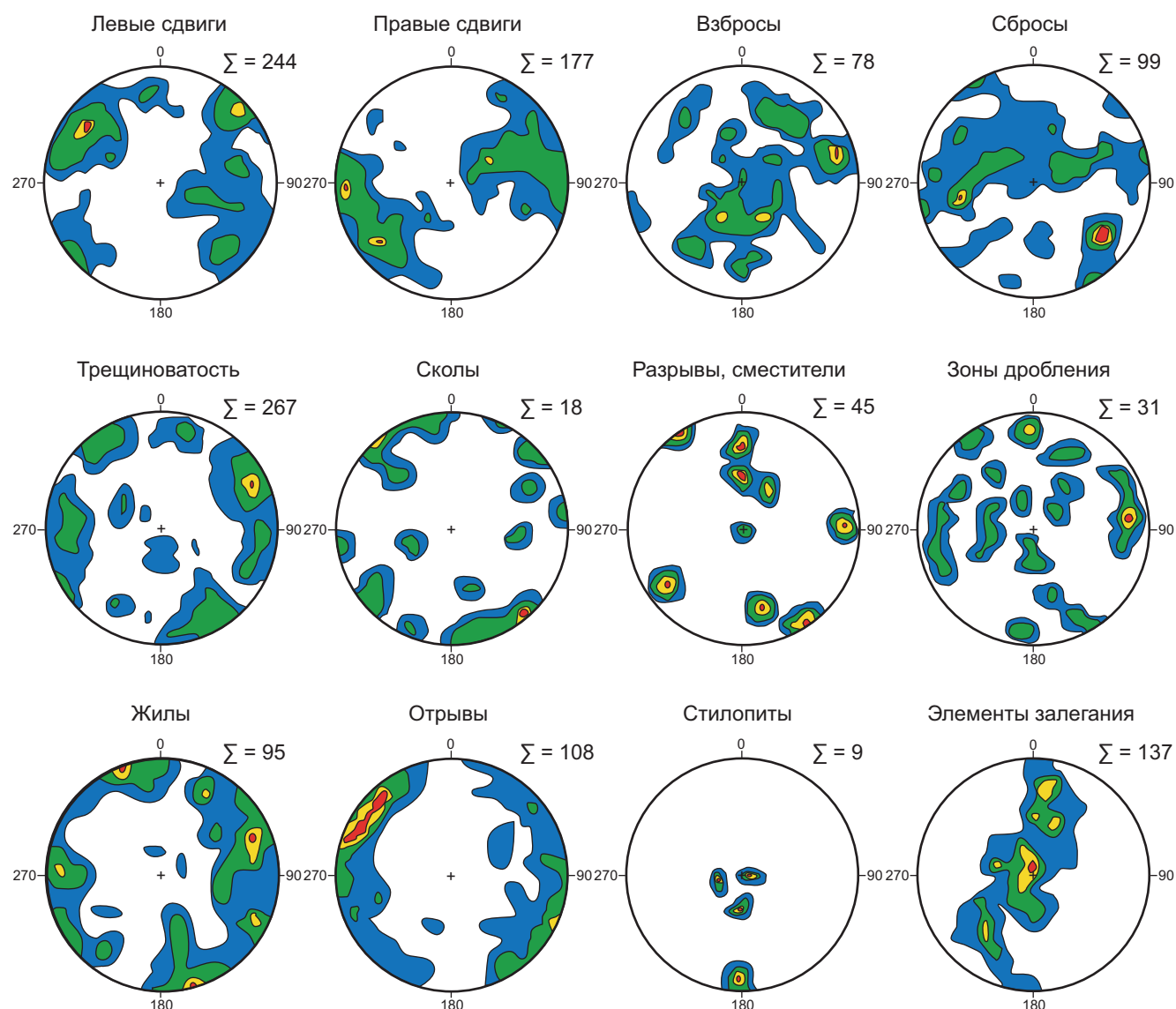


Рис. 8. Сводные стереограммы нарушений различного кинематического типа на Белореченском пересечении Большого Кавказа (показаны плотности концентрации полюсов структур в стереографической проекции верхней полусферы)

ридионального сжатия и локально проявленного северо-восточного сжатия (ориентированного поперек основных складчатых структур Большого Кавказа). Особенностью структуры Пшехско-Адлерской флексурно-разрывной зоны является Z-образный правосдвиговый изгиб структур «кавказской» ориентировки до северо-западной, что привело к усилению здесь северо-восточного сжатия. Выявлено неоднородное строение данной зоны с закономерным распределением малых дизъюнктивов. Вариации направления максимальных сжимающих напряжений от меридионального до северо-восточного обусловило широкое развитие поперечных орогену структур отрывно-левосдвигового типа. Сочетание таких тектодинамических условий на меридиональной структуре погружения орогена к западу определило формирование сложного структурного узла с широким проявлением

взбросо-сдвиговой кинематики структур «кавказского» плана и одновременно сдвига-раздвиговой — по различно ориентированным поперечным ему структурам.

С учетом установленного характера проявления и ориентации дизъюнктивных нарушений в пределах Пшехско-Адлерской поперечной зоны можно предположить, что региональная крутопадающая система нарушений северо-западного простирания в доюрском и ниже-среднеюрском комплексах отражает условия поперечного сжатия с формированием структур сплющивания и взбросо-надвиговых структур, а также широкого проявления правосдвиговой деформации. Вместе с системой северо-западного простирания в данном районе хорошо выражена система поперечных и косых нарушений (по отношению к региональным кавказским структурам), имеющих субмеридиональные

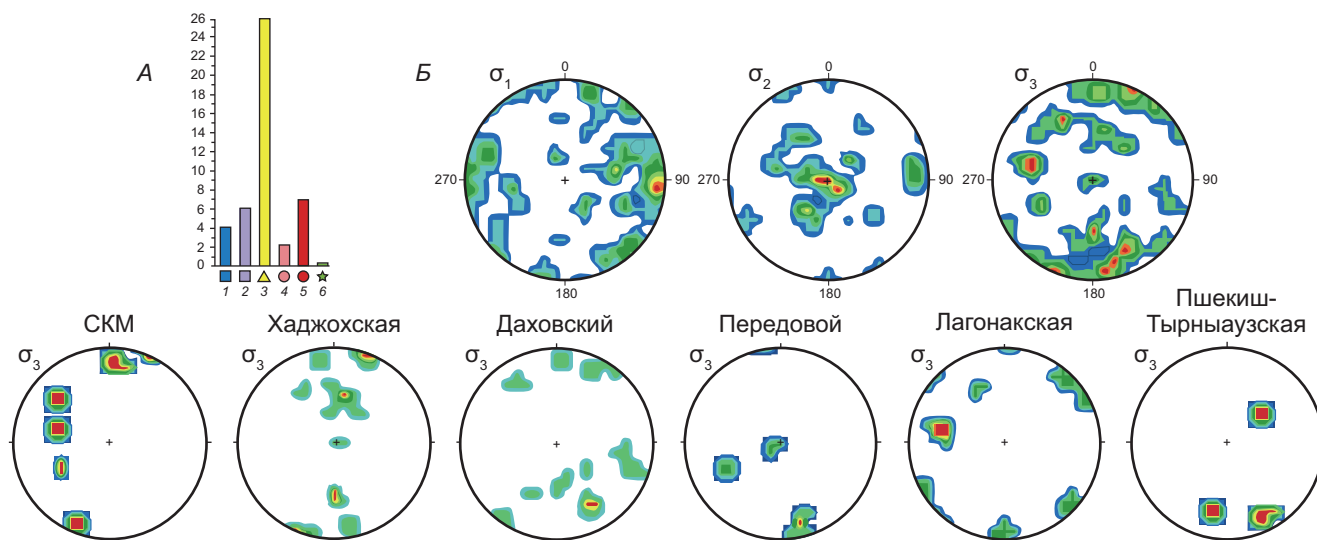


Рис. 9. Результаты реконструкции тектонических напряжений в долине р. Белая методом катакlastического анализа разрывных нарушений. А: типы напряженного состояния: 1 — горизонтального растяжения, 2 — горизонтального растяжения в сочетании со сдвигом, 3 — горизонтального сжатия в сочетании со сдвигом, 4 — горизонтального сжатия, 5 — горизонтального сжатия, 6 — сдвига в вертикальной плоскости; Б: ориентировка осей главных напряжений для локальных стресс-тензоров: оси σ_1 , σ_2 , σ_3 — минимальных (девиаторное растяжение), промежуточных и максимальных сжимающих напряжений. Верхний ряд — для зоны в целом; нижний ряд — ориентировка оси максимальных сжимающих напряжений на участках: Северо-Кавказская моноклиналь, Хаджохская теснина, Даховский выступ, Передовой хребет, Лагонакская зона и Пшекиш-Тырныаузская зона

и северо-восточные (вплоть до восток-северо-восточных) простирания. Для всех этих систем характерна деформация растяжения (развитие жил и структур отрывного типа), сопровождающаяся формированием сдвигов (с преобладанием левосдвиговых нарушений). Главное поле напряжений, проявленное в пределах зоны, это меридиональное сжатие и широтное растяжение.

В слабодислоцированных комплексах установлен большой разброс ориентировок осей максимального сжатия, что указывает на малый уровень напряжений, тогда как в более деформированных толщах ориентировка сжатия локализуется более четко, что указывает на более высокий уровень напряжений. Сложное напряженное состояние в Даховском массиве связывается с его раздавливанием в условиях субмеридионального сжатия. Структурные рисунки

в Лагонакской зоне мы связываем с формированием Лагонакского покрова.

Данные по позднеальпийской структуре и особенностям развития меридионально ориентированной Пшехско-Адлерской переходной от Центрального к Северо-Западному сегменту Большого Кавказа зоны, определяющей погружение орогена к западу, не противоречат данным о доальпийской истории ее развития. Это длительно развивающаяся выраженная в геофизических полях неоднородность структуры Большого Кавказа и его обрамления (продолжающаяся в зону Предкавказских прогибов), вероятно принадлежит к системе характерных для Кавказского региона меридиональных структур, основной из которых является зона Транскавказского поднятия.

Финансирование. Исследования выполнены при финансовой поддержке Госзадания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоусов В.В. Краткий обзор сейсмичности Кавказа в сопоставлении с его тектоническим строением / В.В. Белоусов, И.В. Кириллова, А.А. Серский // Известия АН СССР. Сер. геофиз. 1952. № 5. С. 20–44.
- Гайдаленок О.В., Соколов С.А., Гордеев Н.А. Структура Керченско-Таманской складчатой зоны Азово-Кубанского прогиба // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021. № 2. Вып. 50. С. 64–83.
- Гиоргобиани Т.В. Шолевая тектоника Большого Кавказа и прилегающего Закавказья // Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма: Материалы совещания. М., 1999. Т. 1. С. 178–181.
- Корсаков С.Г., Семенуха И.Н., Белуженко Е.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Фе-

дерации м-ба 1:200 000. 2-е изд. Серия Кавказская. Лист L-37-XXXV. Майкоп. Объяснительная записка. СПб., 2004. 310 с.

Лаврищев В.А., Шейков А.А., Андреев В.М. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Скифская. Лист К-37 (Сочи), К-38 (Махачкала), К-39. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. 431 с.

Маринин А.В., Тверитинова Т.Ю. Строение Туапсинской сдвиговой зоны по тектонофизическим данным // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2016. № 1. С. 41–55.

Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 484 с.

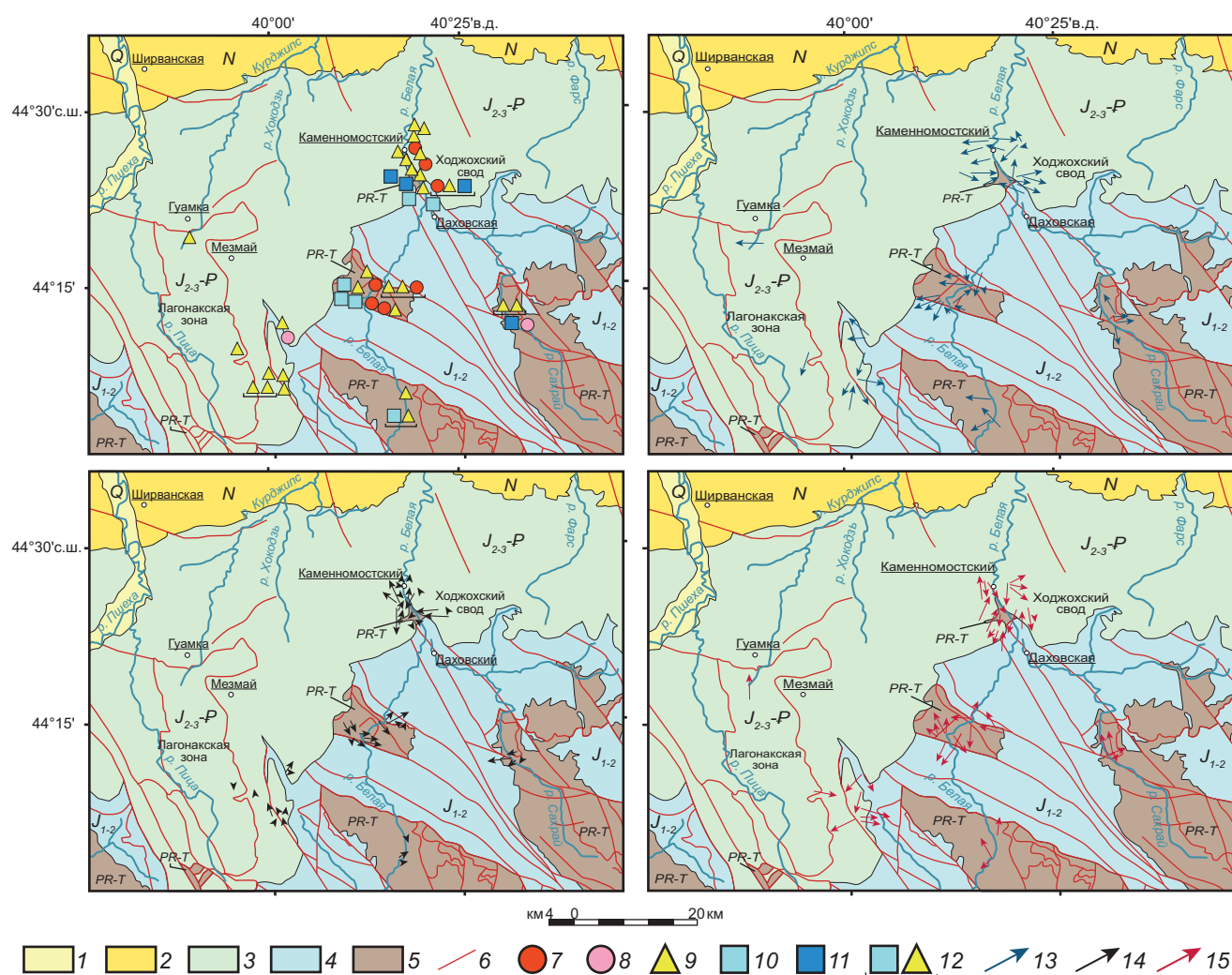


Рис. 10. Типы напряженного состояния и направления погружения осей главных напряжений на Белореченском пересечении. 1–5 — комплексы отложений: 1 — квартал, 2 — неоген (Предкавказский краевой прогиб), 3 — верхнеальпийский комплекс (келловей–палеоген, Северо-Кавказская моноклинал), 4 — нижнеальпийский комплекс (нижняя–средняя юра, зона юрской прерывистой складчатости), 5 — доальпийские комплексы ядра Большого Кавказа; 6 — разрывные нарушения; 7–11 — типы напряженного состояния: 7 — горизонтального сжатия, 8 — горизонтального сжатия в сочетании со сдвигом, 9 — горизонтального сдвига, 10 — горизонтального растяжения в сочетании со сдвигом, 11 — горизонтального растяжения; 12 — точки с двумя и более типами напряженного состояния; 13–15 — ориентировка осей главных напряжений: 13 — минимального сжатия (растяжения), 14 — промежуточной, 15 — максимального сжатия

Милаковский Е.Е., Хаин В.Е. Геологическое строение Кавказа. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1963. 258 с.

Ненахов В.М., Жабин А.В., Никитин А.В., Бондаренко С.В. Внутреннее строение тектонической зоны северного обрамления Даховского кристаллического массива (Западный Кавказ) // Вестник ВГУ. Серия Геология. 2019. № 1. С. 5–14.

Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника. М.: Наука, 2004. 780 с.

Несмеянов С.А., Измайлов Я.А. Тектонические деформации черноморских террас Кавказского побережья России. М., 1995. 239 с.

Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений. Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М.: ГИН АН СССР, 1987. Ч. 2. С. 173–235.

Расцветаев Л.М. Сдвиги и альпийская геодинамика Кавказского региона // Геодинамика Кавказа. М.: Наука, 1989. С. 106–111.

Расцветаев Л.М., Маринин А.В., Тверитинова Т.Ю. Позднеальпийские дизъюнктивные системы и геодинамика Западного Кавказа // Физика Земли. 2010. № 5. С. 31–40.

Расцветаев Л.М., Тверитинова Т.Ю., Бирман А.С. и др. Большой Кавказ: современная структура и альпийская геодинамика // Современное состояние наук о Земле: Матер. Международ. конф., посвященной памяти В.Е. Хаина. М.: Изд-во Геологического ф-та МГУ, 2011. С. 2240–2245.

Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.

Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методы и алгоритмы. М.: Геос, 2017. 234 с.

Резников В.И. О роли поперечных разломов в локализации ртутного оруденения на Западном Кавказе // Докл. АН СССР. 1969. Т. 189, № 3. С. 605–608.

Резников В.И. Структурная позиция некоторых ртутных месторождений Западного Кавказа. Разведка и охрана недр. 1970. № 11. С. 10–13.

Трихунков Я.И., Бачманов Д.М., Гайдаленок О.В. и др. Новейшее горообразование в зоне сочленения структур Северо-Западного Кавказа и Керченско-Таманской области // Геотектоника. 2019. № 4. С. 78–96.

Трихунков Я.И., Гайдаленок О.В., Бачманов Д.М., Маринин А.В. Морфоструктура зоны сочленения Северо-

Западного Кавказа и Керченско-Таманской области // Геоморфология. № 4. 2018. С. 77–92.

Хаин В.Е., Афанасьев С.Л., Борукаев Ч.Б. и др. Основные черты структурно-фациальной зональности и тектонической истории Северо-Западного Кавказа (в связи с перспективами нефтегазоносности) // Геология Центрального и Западного Кавказа. М.: Гостоптехиздат, 1962. С. 5–47.

Шарданов А.Н. Западное Предкавказье // Геология СССР. Т. IX, Северный Кавказ. гл. Тектоника. М.: Недра, 1968. С. 584–590.

Статья поступила в редакцию 11.12.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 553.087 (571.56)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-45-53

СТРОЕНИЕ НИЖНЕОРДОВИКСКИХ СТРОМАТОЛИТОВЫХ БИОГЕРМОВ В ОПОРНОМ РАЗРЕЗЕ Р. МОЙЕРО (ТУНГУССКАЯ СИНЕКЛИЗА, ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)

Никита Андреевич Лыков¹✉, Илья Газинурович Закирьянов²,
Андрей Викторович Дронов³, Юлиана Валерьевна Ростовцева⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Геологический институт РАН, Москва, Россия; lykownikita@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0009-0009-6201-599X>

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия; Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия; zakiryyanovig@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5731-296X>

³ Геологический институт РАН, Москва, Россия; avdronov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0229-8598>

⁴ Геофизический центр РАН, Москва, Россия; rostovtseva@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6828-5629>

Аннотация. В нижнеордовикских породах разреза р. Мойеро (Тунгусская синеклиза, Восточная Сибирь) присутствуют строматолитовые биогермы, строение которых рассмотрено на примере выделяемой среди них типовой постройки и смежных с ней отложений. Выявлено, что формирование изучаемых осадков происходило при развитии как бактериальных сообществ (прежде всего, цианобактерий), так и известковых водорослей. Установлено наличие остатков известковых водорослей рода *Nuia* разной сохранности в биокластово-оолитовых и оолитово-биокластовых известняках, подстилающих строматолитовые постройки и слагающих межбиогермные отложения. Предполагается, что рост строматолитовых биогермов и смежных с ними отложений контролировался колебаниями уровня моря, нашедшими свое отражение в трансгрессивно-регрессивной цикличности и изменении условий седиментации.

Ключевые слова: нижний ордовик, Сибирская платформа, биогермы, строматолиты, *Nuia*

Для цитирования: Лыков Н.А., Закирьянов И.Г., Дронов А.В., Ростовцева Ю.В. Строение нижнеордовикских строматолитовых биогермов в опорном разрезе р. Мойеро (Тунгусская Синеклиза, Восточная Сибирь) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 45–53.

LOWER ORDOVICIAN STROMATOLITES FROM THE KEY MOYERO SECTION (TUNGUSKA SYNECLISE, EASTERN SIBERIA)

Nikita A. Lykov¹✉, Ilya G. Zakiryanov², Andrey V. Dronov³, Yuliana V. Rostovtseva⁴

¹ Lomonosov Moscow State University; Geological Institute of the RAS, Moscow, Russia; lykownikita@gmail.com ✉

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch SB RAS, Novosibirsk, Russia; The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the UB of the RAS, Yekaterinburg, Russia; zakiryyanovig@gmail.com

³ Geological Institute of the RAS, Moscow, Russia; avdronov@gmail.com

⁴ Geophysical Center of the RAS, Moscow, Russia; rostovtseva@list.ru

Abstract. Stromatolite bioherms were found in the Lower Ordovician sediments of the Moyero River section (Tunguska syncline, Eastern Siberia). Their characteristics are considered on the example of their typical build-up and adjacent sediments. It was revealed that the formation of the studied sediments occurred during the development of both bacterial communities (primarily cyanobacteria) and calcareous algae. The presence of remains of calcareous algae *Nuia* of different preservation in bioclast-oolitic and oolite-bioclastic limestones underlying stromatolite and composing sediments between bioherms was established. It is assumed that the growth of stromatolite bioherms and adjacent sediments was controlled by sea level fluctuations which were reflected in the transgressive-regressive cyclicity and changes of sedimentation conditions.

Keywords: Lower Ordovician, Siberian platform, bioherms, stromatolites, *Nuia*

For citation: Lykov N.A., Zakiryanov I.G., Dronov A.V., Rostovtseva Yu.V. Lower Ordovician Stromatolites from the key Moyero section (Tunguska Syncline, Eastern Siberia). *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 45–53. (In Russ.).

Введение. В настоящее время данных об условиях формирования органогенных построек ордовикского возраста в пределах Сибирской платформы недостаточно. Это объясняется разной степенью изученности рассматриваемых отложений, боль-

шая часть которых находится в труднодоступных районах и требует более детальных комплексных исследований.

Как известно, наиболее распространенными каркасостроителями в начале палеозоя являлись

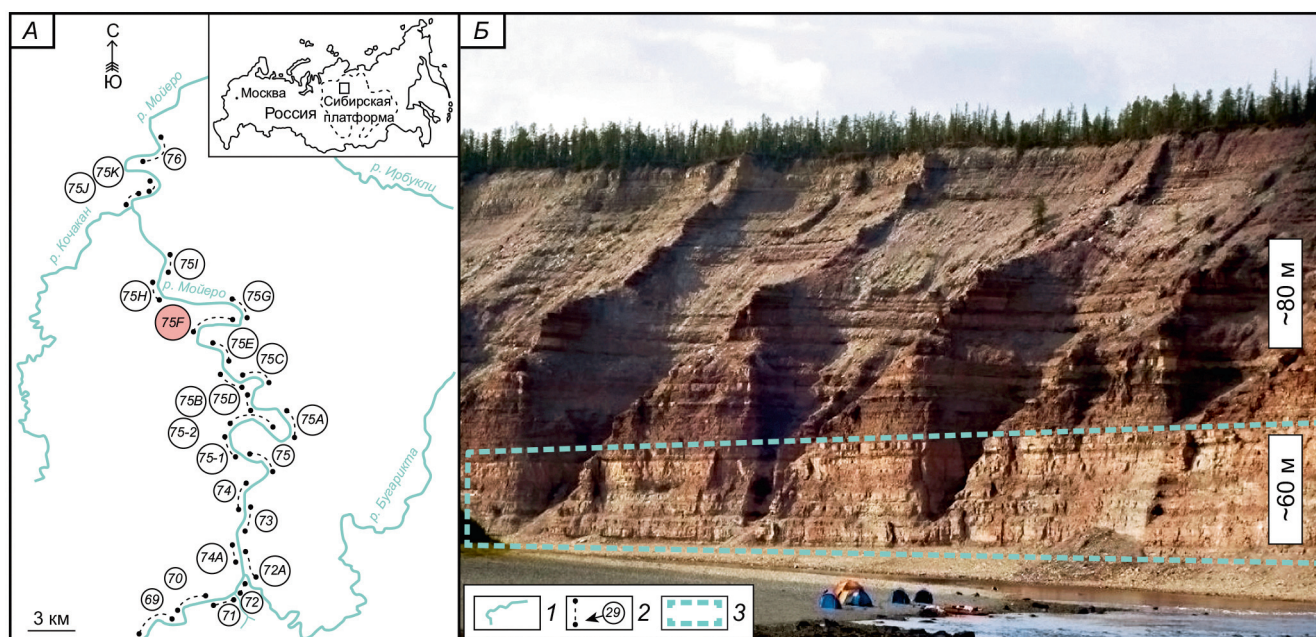


Рис. 1. Расположение района исследования (А) и общий вид (Б) обнажения 75F нижнеордовикских отложений разреза р. Мойеро (Тунгусская синеклиза, Восточная Сибирь): 1 — русла рек, 2 — расположение и индексы обнажений, 3 — изучаемый интервал разреза

цианобактериальные сообщества, которые могли образовывать симбиоз с водорослями. Цианобактериальные сообщества как создатели строматолитовых построек имеют большое породообразующее значение. В связи с этим изучение этого типа образований вызывает особый научный интерес.

Целью настоящей работы являлось выявление особенностей строения нижнеордовикских строматолитовых построек разреза р. Мойеро (Тунгусская синеклиза, Восточная Сибирь) для восстановления условий их формирования. Описание и исследование этих образований ранее не проводилось.

Краткая геологическая характеристика района исследования. В ордовикское время на территории Сибирской платформы располагалось несколько седиментационных бассейнов, крупнейшими из которых являлись Иркутский и Тунгусский бассейны, известные также как Иркутский амфитеатр и Тунгусская синеклиза [Каныгин и др., 2007; Dronov, 2013]. Сибирская платформа в раннем ордовике находилась в приэкваториальных широтах [Cocks, Torsvik, 2007]. В пределах Восточной Сибири мелководные отложения нижнего ордовика представлены теплопроводными карбонатами: известняками и доломитами с обилием строматолитов и оолитовых разностей [Dronov, 2013]. Развитие подобного типа осадконакопления во многом обусловлено существовавшей в рассматриваемое время палеоклиматической зональностью [Cocks, Torsvik, 2007].

Опорный разрез ордовика по реке Мойеро располагается в северо-восточной (в современных координатах) части Тунгусской синеклизы Восточной Сибири, примыкающей к Анабарскому щиту. Этот нижнепалеозойский разрез является одним из наиболее полных и непрерывных на Сибирской

платформе [Мягкова и др., 1977; Каныгин и др., 2007; 2017]. Однако, во многом из-за труднодоступности района исследования, особенности строения отложений, слагающих этот разрез, остаются до сих пор недостаточно изученными, описание части обнажений вовсе не проводилось.

Отложения ордовика залегают в среднем течении р. Мойеро в виде очень пологой ($2-3^\circ$) моноклинали с общим падением на юг [Мягкова и др., 1977]. Эти толщи доступны для изучения в серии скальных выходов (обнажений), каждому из которых было присвоено собственное обозначение [Покровский и др., 2018]. На основании палеонтологических данных установлено, что в этом разрезе выделяются следующие региональные подразделения ордовика Сибирской платформы: няйский, угорский, кимайский, вихоревский, муктэйский, волгинский, киренско-кудринский, чертовский, баксанский и долборский горизонты, что соответствует тремадокскому — низам катийского ярусов Международной стратиграфической шкалы [Каныгин и др., 2007, 2017].

Объект и методика исследования. В ходе полевых исследований 2013 года, а также 2020–2022 гг. в ордовикских отложениях долины реки Мойеро были отмечены многочисленные и разнообразные карбонатные органогенные постройки. В нижнеордовикской (няйский и угорский горизонты) части разреза были обнаружены строматолитовые биогермы, которые ранее не были описаны и изучены.

Объектом настоящего исследования являются впервые найденные нижнеордовикские строматолитовые постройки разреза р. Мойеро в обнажении 75F (рис. 1). Данное обнажение является одним из наиболее представительных скальных выходов

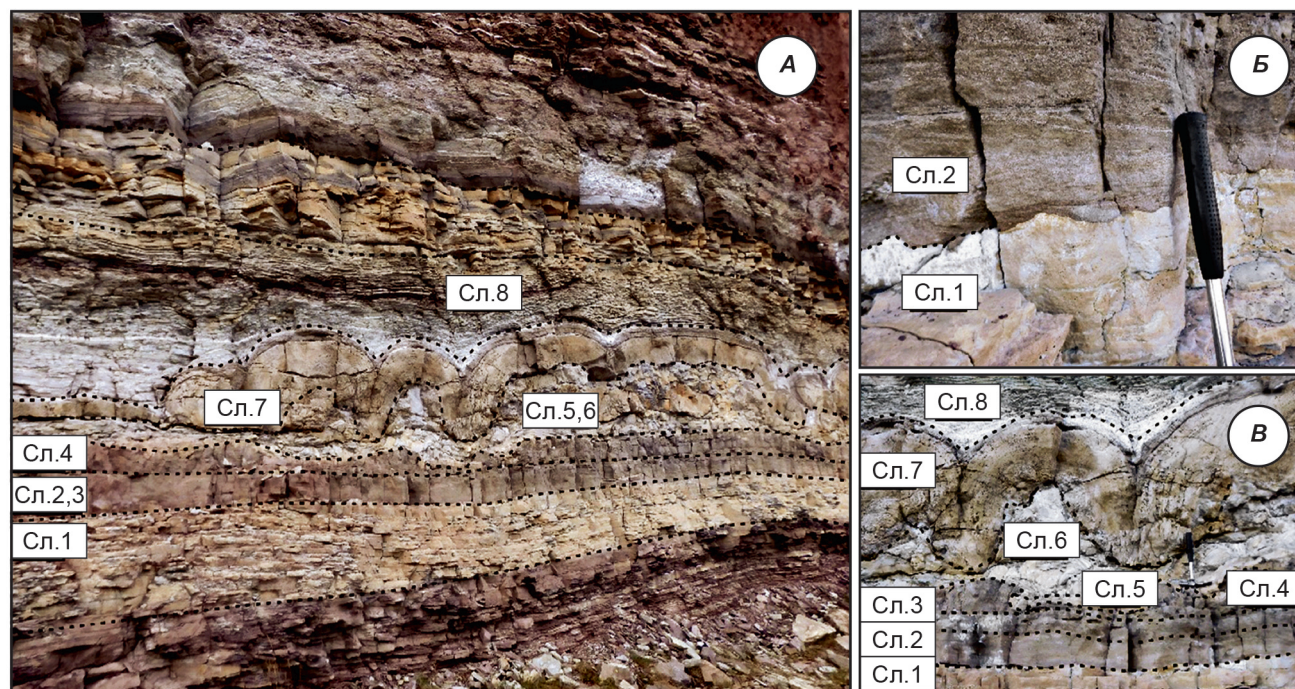


Рис. 2. Изучаемый интервал разреза с расположением описываемых слоев, выделяемых в строении типовой строматолитовой постройки и смежных с ней отложений. А — общий вид, Б — эрозионная граница между отложениями слоя 1 и слоя 2, В — часть разреза, в которой проведен отбор образцов

пород нижнего ордовика в береговых обрывах р. Мойеро [Лыков, Ростовцева, 2022]. Координаты Обн. 75F (в средней части): North 67°, 37', 50,01»; East 104°, 07', 01,36».

В обнажении 75F выделяются 14 интервалов строматолитовых биогермных тел (полей), имеющих сходное строение. Рассматриваемые постройки встречаются как в виде одиночных мелких органогенных образований, так и в виде серии крупных биогермов, смыкающихся друг с другом. Высота биогермов в центральной части варьируют от ~0,19 м до ~6,5 м.

Для рассмотрения строения изучаемых строматолитовых биогермов среди них была выбрана типовая постройка, отличающаяся хорошей обнаженностью и характеризующая наибольшим разнообразием слагающих ее литологических типов пород. При изучении типовой постройки проводилось исследование как биогермного тела, так и смежных (вмещающих) с ним отложений для всесторонней реконструкции существовавших условий седиментации и смены их во времени.

Согласно [Корольюк и др., 1975], биогермы относятся к органогенным постройкам выпуклой формы, а органогенные постройки — это обособленные карбонатные тела, созданные организмами-каркастроителями, в сочетании с генетически связанными с ними карбонатными осадками. В ходе проведенного исследования пластовые строматолитовые образования не рассматривались из-за незначительного их развития в изучаемых отложениях.

Для определения структуры и компонентного состава пород были выполнены оптико-петрогра-

фические исследования специально послойно отобранных образцов из типовой строматолитовой постройки и смежных (вмещающих) с ней толщ. При литологической типизации карбонатных пород использовались как отечественная [Фролов, 1995], так и зарубежная классификация Р. Данхэма [Dunham, 1962], которая в последние годы получила широкое распространение в российских нефтяных компаниях.

Строение типовой строматолитовой постройки и смежных с ней отложений. В строении типовой строматолитовой постройки (рис. 2; 3; 4) и смежных с ней отложениях снизу вверх по разрезу наблюдается следующая смена литологических типов пород.

Слой 1. Доломит красноцветный и/или бежеватый, с микритовыми (микробиальными?) интракластами и микритовым заполнителем, содержащий обломочную песчаноалевритовую примесь, количество которой уменьшается от подошвы к кровле слоя (рудстоун с микритом) (рис. 5, А, обр. 21–14). Видимая мощность ~2 м.

Слой 2. Известняк светло-серый, оолитовый (с микритизацией оолитов), с обломочной мелкопесчаной примесью, единичными фосфатными биокластами, разнонаправленной косоволнистой слоистостью, эрозионной нижней границей, вторичной доломитизацией и спаритовым цементом (грейнстоун). Слой, выдержанный по мощности, хорошо прослеживается по простираанию (рис. 5, Б, обр. 22–17). Мощность — около 0,45 м.

Слой 3. Известняк серый, с неравномерным содержанием оолитов и биокластов, отвечающий биокластово-оолитовым или оолитово-биокласто-

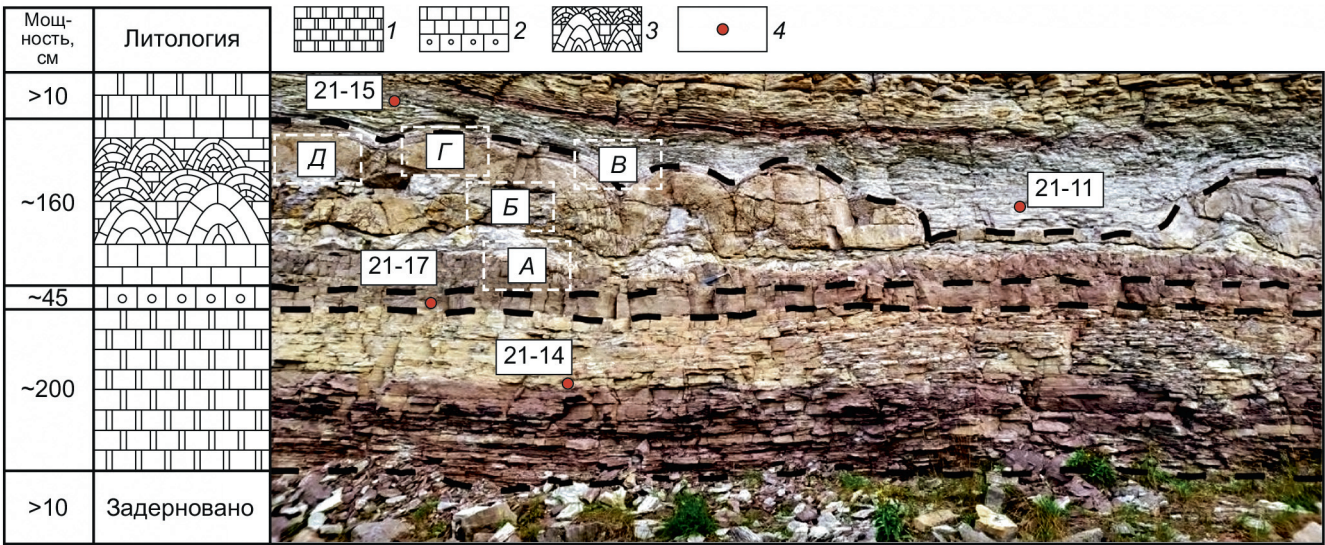


Рис. 3. Строение типовой строматолитовой постройки и смежных с ней отложений с выделением отдельных частей изучаемого интервала разреза (А, Б, В, Г и Д) и указанием места отбора образцов. 1 — доломиты с микробальными интракластами (слой 1), 2 — известняки оолитовые (слой 2), 3 — центральная часть постройки (слои 4–7), 4 — места отбора и номера образцов

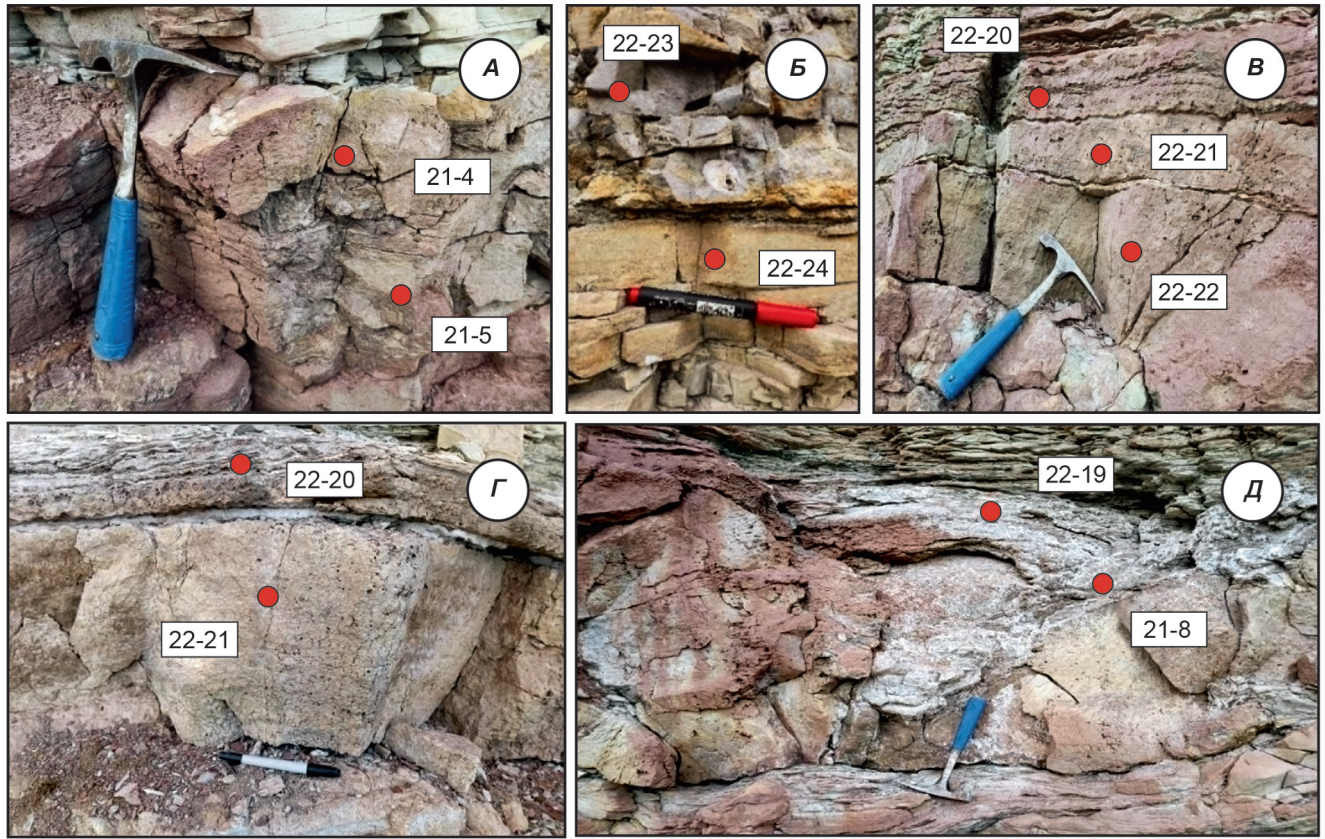


Рис.4. Строение отдельных частей строматолитовой постройки и смежных с ней отложений (А, Б, В, Г и Д), выделенных на рис. 2 с указанием места отбора и номера образцов

вым разностям, с оолитами обычно радиально-лучистой структурой, остатками известковых водорослей *Nuia*, обломками раковин трилобитов, реже брахиопод, остракод, единичными зернами кварца, вторичной доломитизацией, крустификационным и поровым спаритовым цементом (грейнстоун). Слой, выдержанный по мощности, хорошо про-

слеживается по простирацию (рис. 5, В, обр. 21–5). Мощность — 0,2 м.

Слой 4. Известняк серый, биогермный, тонкозернистый, со строматолитовой слоистой структурой, подчеркнутой вторичной сульфатизацией, местами с доломитизацией, полого выпуклой (волнистой?) формой (баундстоун). Слой хорошо про-

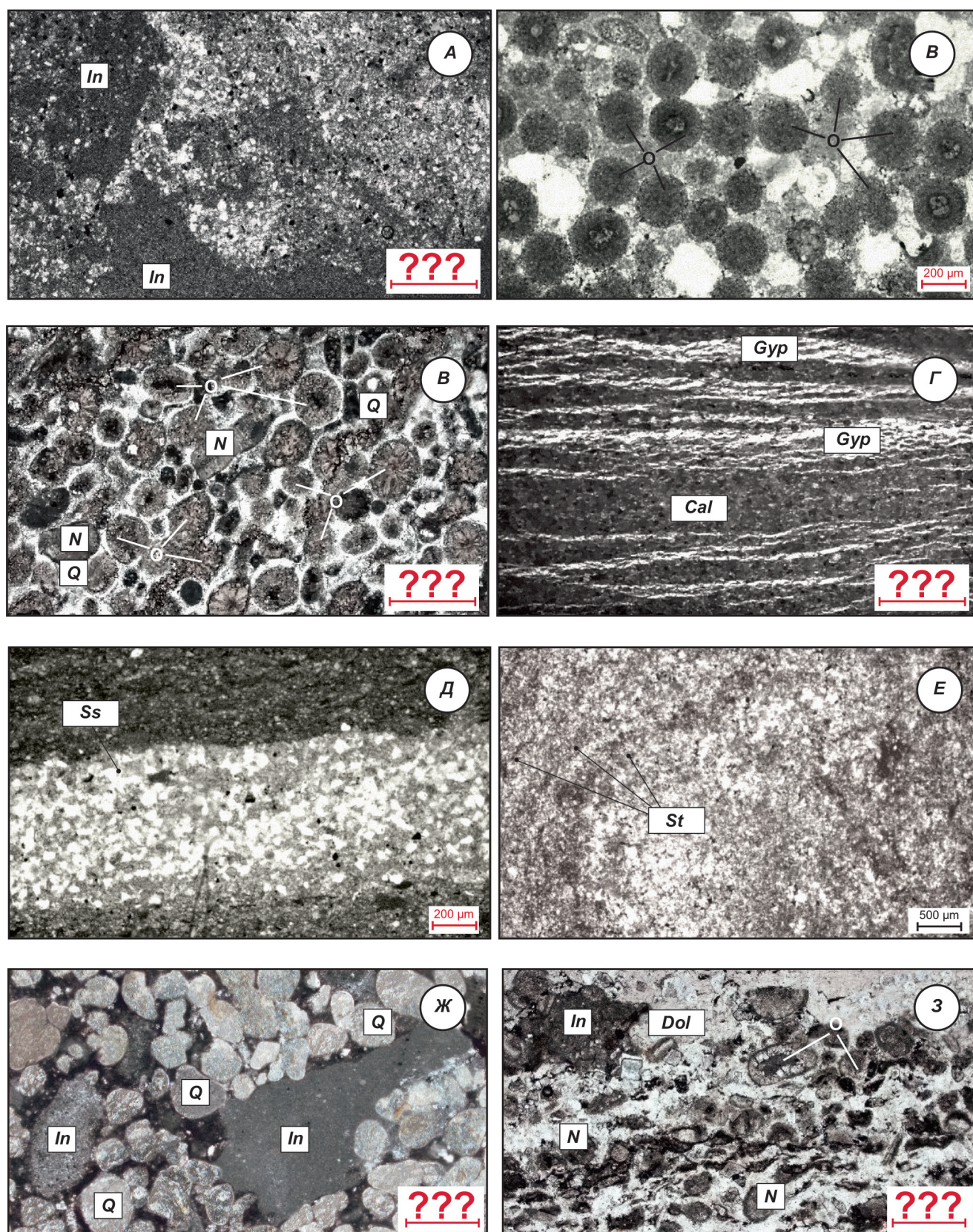


Рис. 5. Микрофотографии изучаемых пород. А — доломит с микробиальными интракlastами с алевроитовой примесью (слой 1, обр. 21–14); В — известняк оолитовый (слой 2, обр. 21–17); В — известняк биокластово-оолитовый (слой 3, обр. 21–5); Г — известняк строматолитовый (слой 4, обр. 21–4); Д — доломит с прослоями тонкозернистого песчаного материала (слой 5, обр. 22–24); Е — известняк строматолитовый (слой 7, обр. 22–21); Ж — песчаник с микробиальными интракlastами (слой 8, обр. 21–15); 3 — известняк оолитово-биокластовый из межбиогермных отложений (обр. 21–11). *In* — интракlastы, *O* — оолиты, *Q* — кварц, *N* — известковые водоросли *Nuia*, *Cal* — кальцит, *Gyp* — гипс, *Ss* — песчаный материал, *St* — слоистая структура строматолитов, *Dol* — доломит. Николи параллельные

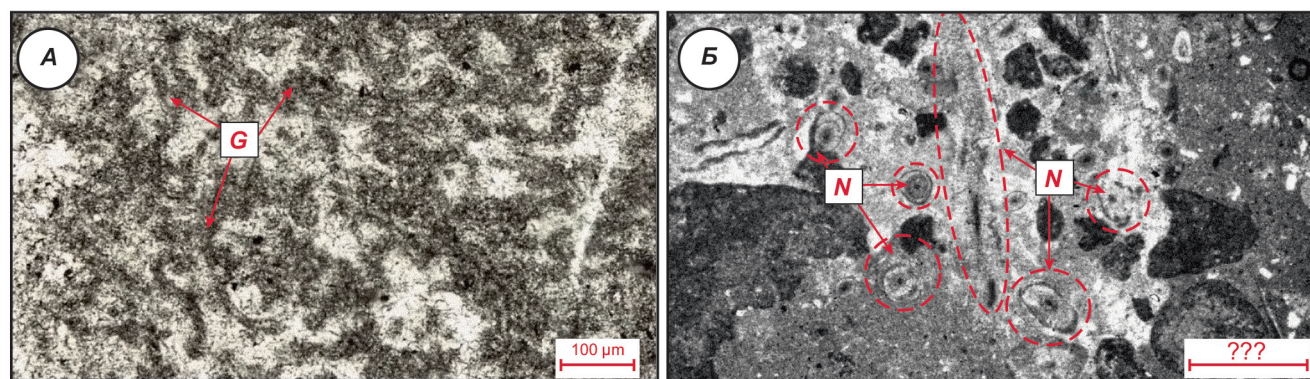


Рис. 6. Трубочки *Girvanella* (А), продольные и поперечные сечения известковых водорослей *Nuia sibirica* Maslov, 1954 (Б) в изучаемых отложениях. Никели параллельные

слеживается по простиранью (рис. 5, Г, обр. 21–4). Мощность — 0,25–0,3 м.

Слой 5. Доломит серый, тонкозернистый, с отдельными зернами алевритово-песчаной примеси, содержащий отдельные линзовидные прослои тонкозернистого песчаного материала (мадстоун). Слой, невыдержанный по мощности, хорошо прослеживается по простиранью (рис. 5, Д, обр. 22–24). Мощность — 0,2–0,3 м.

Слой 6. Доломит серо-голубоватый, в основной массе с яснокристаллическими выделениями вторичного доломита, содержащий обломки трилобитов, раковин моллюсков (местами встречаются и целые раковины, которые видны макроскопически) и брахиопод, с фосфатными биокластами, а также обломочной примесью крупноалевритовой и тонкопесчаной размерности (до 15–20%), содержание которой становится более высоким по сравнению с подстилающими отложениями (слоем 5) (первично, предположительно, вакстоун). Слой, невыдержанный по мощности, выклинивающийся по простиранью. Мощность — до 0,2–0,5 м.

Слой 7. Известняк бежево-серый, биогермный, тонкозернистый, со слоистой строматолитовой структурой, частично вторично сульфатизированный, сфероидальной формой (баундстоун) (обр. 22–20, 22–21, 22–22, рис. 5, Е). Слой, невыдержанный по мощности, выклинивающийся по простиранью. Мощность — до 0,5–1,4 м.

Слой 8. Песчаник крупно-мелко-среднезернистый, с окатанными обломками преимущественно кварца размером от 0,1 до 0,75 мм, карбонатным тонкозернистым доломитизированным заполнителем, с включениями фрагментов микробных (строматолитовых?) известняков от 1 до 2,5 см (рис. 5, Ж, обр. 21–15). Видимая мощность около 1 м.

Выше по разрезу залегают доломиты визуально сходные по литологическому строению с аналогичными образованиями слоя 1.

В изучаемых отложениях доломиты, скорее всего, являются вторичными, на что указывает наличие яснокристаллических идиоморфных кристаллов доломита, местами развивающихся по карбонатным форменным компонентам, слагающим породы.

Обломочная примесь представлена в основном зернами кварца, реже полевых шпатов (плагиоклазами), а также чешуйками слюд и литокластами (кварцитами).

В верхних частях биогермовых известняков (слои 4 и 7), слагающих строматолитовые постройки, отмечается интенсивное развитие сульфатизации и/или доломитизации.

Биогермные известняки (слои 4 и 7) со строматолитовой структурой согласно классификации Б. Логана с соавторами [Logan, 1964] относятся, скорее всего, к переходному типу между LLH-C (латерально связанные полусфероиды с близким расположением относительно друг друга) и LLH-S (латерально связанные полусфероиды с разрозненным расположением относительно друг друга). Нижний слой (4) строматолитовых известняков в большей степени относится к LLH-C типу, верхний (7) — к LLH-S типу.

Отложения, залегающие в межбиогермном пространстве, представлены оолитово-биокластовыми известняками с развитием в межзерновом пространстве вторичных кристаллов гипса (рис. 5, 3, обр. 21–11). В них встречаются мелкие фрагменты строматолитовых известняков.

В оолитово-биокластовых известняках изучаемой части разреза, местами отмечается наличие обломков, сложенных тонкозернистым карбонатом, в котором отчетливо видны признаки остатков *Girvanella* sp. (рис. 6, А, обр. 21–25). Однако слоевища этих микропроблематик имеют плохую сохранность, в связи с чем выполнить диагностику вида не представляется возможным.

Особенности распределения в отложениях известковых водорослей *Nuia* и их описание. В основании строматолитовых построек в рассматриваемом разрезе наблюдается смена оолитовых известняков биокластово-оолитовыми и оолитово-биокластовыми известковыми отложениями. Согласно [Vachard, 2017] и [Dai, 2022] с соавторами, формирование оолитов связано с действием биохимических процессов, протекающих при участии различных бактериальных сообществ, включая цианобактерии. В связи с этим можно предположить, что при накоплении оолитовых осадков в рас-

смаатриваемой части бассейна уже существовали бактериальные сообщества, способствующие их образованию. Кроме того, накопление оолитовых отложений (грейнстоунов) должно было происходить, по общепринятым представлениям, в зоне с высокой подвижностью вод, в которой иловый материал не осаждался, а вымывался. В ходе проведенного исследования в этих отложениях остатки известковых водорослей *Niua* не были обнаружены.

Биокластово-оолитовые и оолитово-биокластовые известняки, перекрывающие оолитовые известняки, кроме оолитов содержат биокласты и в меньшем количестве обломочную примесь в виде зерен кварца. В них среди органогенного материала встречаются остатки известковых водорослей (зеленых?) рода *Niua* Maslov, 1954 как плохой, так и хорошей сохранности (рис. 6, Б, обр. 21–25). Хорошая сохранность остатков этих известковых водорослей позволила определить их вид как *Niua sibirica* Maslov, 1954 и провести их монографическое описание. Это описание приводится для характеристики диагностических признаков, позволяющих определить род и вид остатков этих организмов.

Описание таксонов

Семейство Microcodiaceae Maslov, 1956

Род *Niua* Maslov, 1954

Dasycladaceae incertae sedis: Зайцев и Покровская, 1950, с. 26, фиг. 20.

Типовой вид — *Niua sibirica* Maslov, 1954. Ордовик, Восточная Сибирь (устькутская свита), р. Нюя, Россия.

Диагноз. Известковые талломы субизометричной или слабоудлиненной формы в поперечном сечении, имеют многослойное строение. Центральная часть выполнена микритом, вследствие чего имеет темный цвет. «Стенка» сложена радиально-лучистыми или ботроидальными агрегатами кальцита. Могут встречаться редкие бифуркации.

Сравнение. От *Microcodium* Glück, 1912 семейства Microcodiaceae отличаются меньшим размером кристаллов в основном слое таллома, меньшим размером самих талломов и хорошо выраженной центральной частью.

Видовой состав и распространение. *Niua sibirica* Maslov, 1954 — Восточная Сибирь [Маслов, 1954, 1960; Рейтлингер, 1959], Казахстан [Рейтлингер, 1959]; Прекордильеры Аргентины [Beresi and Luchinina, 2018]; Китай [Li et al., 2015] и др.

Замечание. Нет полной уверенности, к какому таксону уровня «Отдел» относить представителей рода *Niua*, в связи с чем ее следует рассматривать как микропроблематичные известковые водоросли. Из-за этого также затруднительно определить таксоны уровней «Класс» и «Порядок». Подробно эта проблема рассмотрена в различных работах, например, [Vachard et al., 2017].

Niua sibirica Maslov, 1954

Рис. 5, Б (обр. 21–25).

Niua sibirica: Маслов, 1954, стр. 526, табл. I, фиг. 2.

Bogutschanophycus mariae: Кордэ, 1954, стр. 550, табл. VI, фиг. 1 и 3.

Niua texana: Johnson, 1966, pp. 433, plate 57.

Niua devonica: Шуйский, 1973, с. 95, табл. XXIX, фиг. 1–4.

Niua (?) *minuta*: Шуйский, 1973, с. 96, табл. XXIX, фиг. 5.

Описание. Обызвествленная часть таллома в поперечном сечении имеет субизометричную форму, близкую к округлой, полую внутри. Внешняя микритовая стенка имеет небольшую толщину (менее 0,007 мм). Промежуточный (основной) слой сложен удлинёнными (лучистыми или волокнистыми) кристаллами кальцита.

Размеры. Длина слоевища (в продольном сечении) — не более 0,3 мм (300 мкм). Диаметр 0,022–0,092 мм (22–92 мкм). Диаметр внутренней части не превышает 0,01 мм (10 мкм).

Замечания. Обнаруженные формы имеют значительно меньшие размеры, чем находки, указанные у других исследователей (например, [Шуйский, 1973]). Это может быть связано с изменчивостью видов и особенностями той экосистемы, в которой обитали изучаемые организмы.

Встречаются сильно перекристаллизованные формы, в связи с чем могут быть приняты за оолиты плохой сохранности.

Материал. Талломы продольного и поперечного сечения плохой (обр. 21–5 и 21–11) и хорошей (обр. 21–25) сохранности.

Условия формирования строматолитовой постройки. Отложения, выделяемые в слой 1, накапливались в условиях периодического перемыва тонкозернистых донных осадков при постепенной смене карбонатно-силиклостического режима осадконакопления силиклостическо-карбонатным (уменьшение терригенной составляющей от подошвы к кровле слоя). Эти отложения по эрозионной границе сменяются оолитовыми известняками (слой 2), накопление которых происходило в среде с активной гидродинамикой, отражая начало наступления морской трансгрессии и повышения уровня вод. Выше по разрезу оолитовые осадки сменяются биокластово-оолитовыми и оолитово-биокластовыми накоплениями (слой 3), содержащими остатки известковых водорослей *Niua*. Наличие последних, а также заметные содержания биокластов в этих отложениях свидетельствуют о развитии условий, благоприятных для существования целого ряда различных организмов. В дальнейшем ослабление гидродинамического режима, происходившего на фоне продолжающегося развития трансгрессии, обусловило формирование полого выпуклых строматолитовых построек (слой 4). Затем в более спокойных водах при максимуме наступления трансгрессии формировались илистые донные осадки с тонкими скоплениями песчаного материала (слои 5, 6), привносимого в эту мелководную часть бассейна, а также существовали об-

становки, способствующие обитанию трилобитов, моллюсков, брахиопод и др.

С началом развития регрессии связано образование сфероидальных строматолитовых биогермов, выделяемых в слой 7. Дальнейшее снижение уровня вод в рассматриваемой части бассейна привело сначала к опесчаниванию донных осадков (слой 8) и прекращению роста строматолитов, а затем накоплению илистых осадков в условиях ограниченной циркуляции вод (отложения, перекрывающие слой 8 визуально сходные со Слойем 1).

Установленная смена пород в строении типовой строматолитовой постройки и смежных с ней отложений позволяет выделить трансгрессивно-регрессивный цикл, определяющий особенности их формирования. Подобная цикличность прослеживается и в пределах других интервалов развития биогермов в рассматриваемой части разреза нижнеордовикских толщ, что свидетельствует о закономерном действии процессов осадконакопления. В обнажении 75F выявлено 14 подобных циклитов, формирование которых происходило во многом в сходных условиях [Лыков, Ростовцева 2022]. Аналогичного строения биогермные образования также известны в нижнеордовикских отложениях формации Рубиду (Roubidoux Formation), в южной части штата Миссури (США) [Overstreet et al., 2003]. Это свидетельствует о том, что обстановки осадконакопления в эпиконтинентальных морях в пределах континентов Сибири и Лаврентии, располагающихся на одних и тех же широтах в раннем ордовике, являлись во многом подобными в рассматриваемый период времени.

В рассматриваемых отложениях широко проявлены процессы вторичной доломитизации и сульфатизации. Наиболее интенсивное проявление сульфатизации отмечается в кровле описываемой органогенной постройки слоя 7. Развитие сульфатов в этой части строматолитов может быть обусловлено периодическим нахождением верхней части биогерма над поверхностью воды, что для мелководных обстановок, существовавших в условиях аридного климата, является вполне возможным.

Ранее было установлено [Лыков, Ростовцева, 2022], что часть разреза обнажения 75F, где широко развиты строматолитовые биогермы, накапливались в обстановках с разной подвижностью вод, отвечающих, скорее всего, переходной зоне от сублиторали до верхней части литорали. В этих условиях могли формироваться оолитовые, биокластово-оолито-

вые и оолитово-биокластовые отмытые осадки, а также строматолитовые биогермы с образованием обширных участков — полей. Развитие последних напрямую зависело от колебаний уровня моря, обуславливающих изменчивость подвижности вод, а также могло контролироваться привносом терригенного материала.

Выводы. В ходе проведенного исследования выявлено, что формирование типовой строматолитовой постройки сочеталось с развитием бактериальных сообществ и известковых водорослей *Nuia*. В оолитовых известняках, залегающих в основании строматолитовых биогермов, остатки *Nuia* не были обнаружены, а в перекрывающих их биокластово-оолитовых и оолитово-биокластовых известняках встречаются эти водоросли плохой и хорошей сохранности.

Учитывая возможное участие бактерий в формировании оолитов, образование которых в изучаемом разрезе происходило до и во время появления строматолитовых построек, предполагается широкое развитие микробиальных сообществ при накоплении этих биохемогенных отложений. Бактериальные сообщества при формировании оолитов сменялись бактериально-водорослевыми ассоциациями во время осаждения биокластово-оолитовых и оолитово-биокластовых осадков, которые предшествовали, а затем сопровождали рост строматолитовых построек, связанных с деятельностью цианобактерий.

Формирование строматолитов и смежных с ними отложений происходило при разной подвижности вод в переходной зоне от сублиторали до верхней части литорали, отражая трансгрессивно-регрессивную цикличность изменчивости обстановок седиментации. В раннем ордовике образование строматолитовых построек в пределах рассматриваемой части существовавшего палеобассейна могло происходить в условиях, сходных во многом с мелководными обстановками, существовавших в это время в эпиконтинентальных морях континента Лаврентия.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Т.В. Гонте за помощь в сборе образцов в ходе полевых работ, В.А. Лучининой за консультации в области палеоальгологии.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-17-00198; в рамках государственного задания № 075-01349-23-00 Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зайцев Н.С., Покровская Н.В. Стратиграфия и тектоника нижнепалеозойских отложений района среднего течения р. Лены // Акад. наук СССР. Ин-т геол. наук. М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1950. 76 с.

Каныгин А.В., Ядренкина А.Г., Тимохин А.В. и др. Региональная стратиграфическая схема ордовикских

отложений Сибирской платформы (новая версия) // Геология и минеральносырьевые ресурсы Сибири. 2017. № 5. С. 4–57.

Каныгин А.В., Ядренкина А.Г., Тимохин А.В. и др. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Ордовик Сибирской платформы. Новосибирск: ГЕО, 2007. 267 с.

Королюк И.К., Михайлова М.В., Равикович А.И. и др. Ископаемые органогенные постройки, рифы, методы их изучения и нефтегазоносность. М.: Наука, 1975. 236 с.

Кордэ К.Б. Кембрийские водоросли из окрестностей села Бокучаны на реке Ангаре // Вопр. геол. Азии. М.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 531–555.

Лыков Н.А., Ростовцева Ю.В. Условия осадконакопления нижнеордовикских отложений разреза реки Мойеро (Восточная Сибирь). // Экзолит-2022. Литология осадочных комплексов фанерозоя и докембрия. Годичное собрание (научные чтения). Москва, 15–16 июня 2022 г.: Сборник материалов. С. 97–82.

Маслов В.П. О нижнем силуре Восточной Сибири // Вопросы геологии Азии. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 495–530.

Маслов В.П. Строматолиты. (Их генезис, метод изучения, связь с фациями и геологическое значение на примере ордовика Сибирской платформы). // Труды ГИН. 1960. Вып. 41. 188 с.

Мягкова Е.И., Нестор Х.Э., Эйнасто Р.Э. Разрез ордовика и силура реки Мойеро. Новосибирск: Наука, 1977. 176 с.

Покровский Б.Г., Зайцев А.В. и др. Геохимия изотопов С, О, S, Sr и хемотратиграфия отложений ордовика в разрезе р. Мойеро, север Сибирской платформы. Литология и полезные ископаемые. 2018. № 4. С. 310–336.

Рейтлингер Е.А. Атлас микроскопических органических остатков и проблематики древних толщ Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 62 с.

Фролов В.Т. Литология: Учеб. пособие / В. Т. Фролов. Кн. 3. М.: Изд-во МГУ, 1995. 352 с.

Шуйский В.П. Известковые рифообразующие водоросли девона Урала. М.: Наука, 1973. 156 с.

Beresi M.S., Luchinina A. Composition of Ordovician Algaeflora of Argentine Precordillera and Its Significance for

the Formation of Organic Structures // Stratigraphy and Geological Correlation. 2018. Vol. 26. № 1. P. 14.

Cocks L.R.M., Torsvik T.H. Siberia, the wondering northern terrane, and its changing geography through the Paleozoic // EarthScience Rev. 2007. Vol. 82. P. 29–74.

Dunham R.J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture / Ed. by V. E. Ham // Classification of carbonate rocks: Symposium Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 1962. Vol. 1. P. 108–121.

Dai M.Y., Zhang H.S., Zheng W., et al. Giant ooids of microbial origin from the Zhangxia Formation (Cambrian Miaolingian Series) in North China // Journal of Palaeogeography, 2022. Vol. 11, Issue 1. P. 52–68.

Dronov A. Late Ordovician cooling event: Evidence from the Siberian Craton // Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol. 2013. Vol. 389. № 1. P. 87–95.

Johnson J.H. The Late Cambrian Algal Genus Nuia from Brewster County, Texas // Journal of Paleontology. 1966. Vol. 40(2). P. 433–434.

Logan B.W., Rezak R., Ginsburg R.N. Classification and Environmental Significance of algal Stromatolites // The Journal of Geology. 1964. Vol. 72. № 1.

Li Q., Li Y., Wang J., Kiessling W. Early Ordovician lithistid sponge– Calathium reefs on the Yangtze Platform and their paleoceanographic implications // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2015. P. 84–96.

Overstreet R.B., Oboh-Ikuenobe F.E., Gregg J.M. Sequence Stratigraphy and depositional Facies of Lower Ordovician Cyclic Carbonate Rocks, Southern Missouri, U.S.A. // Journal of Sedimentary Research. 2003. P. 421–423.

Vachard D., Clausen S., Palafox J.J., et al. Lower Ordovician microfacies and microfossils from Cerro San Pedro (San Pedro de la Cueva, Sonora, Mexico), as a westernmost outcrop of the newly defined Nuia Province // Facies. 2017. Vol. 63, № 3. P. 37.

Статья поступила в редакцию 12.12.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 338: 504

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-54-64

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ПРИРОДНЫХ И СВЯЗАННЫХ С НИМИ ТЕХНОГЕННЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ДЖИДИНСКОГО ВОЛЬФРАМ-МОЛИБДЕНОВОГО КОМБИНАТА, РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ

Алексей Алексеевич Бурмистров^{1✉}, Алексей Андреевич Самсонов²,
Афанасий Евгеньевич Тельнов³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alek.burmistroff2017@yandex.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; samsonov@geol.msu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; afanasy2000@gmail.com

Аннотация. На основании сбора и анализа данных предшественников и собственных геоэкологических исследований в районе Джидинского вольфрам-молибденового комбината (г. Закаменск) в Республике Бурятия произведена приближенно-количественная оценка экологического и связанного с ним экономического ущерба основным компонентам природной среды и населению на этой территории. Показана возможность снижения этого ущерба и улучшения экологической обстановки в этом районе на основе комплексного использования минерального сырья и расширения природоохранных мероприятий в будущем.

Ключевые слова: техногенное месторождение, оценка воздействия на окружающую среду, эколого-экономический ущерб, антропогенные ресурсы, природоохранные мероприятия

Для цитирования: Бурмистров А.А., Самсонов А.А., Тельнов А.Е. Эколого-экономические аспекты разработки природных и связанных с ними техногенных рудных месторождений на примере джидинского вольфрам-молибденового комбината, Республика Бурятия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 54–64.

ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF NATURAL AND ASSOCIATED TECHNOGENIC ORE DEPOSITS USING THE EXAMPLE OF THE DZHIDA TUNGSTEN-MOLYBDENUM PLANT, REPUBLIC OF BURYATIA

Aleksey A. Burmistrov^{1✉}, Aleksey A. Samsonov², Afanasy E. Telnov³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alek.burmistroff2017@yandex.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; samsonov@geol.msu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; afanasy2000@gmail.com

Abstract. Based on the collection and analysis of data from predecessors and our own geoecological research in the area of the Dzhida tungsten-molybdenum plant (Zakamensk) in the Republic of Buryatia, an approximate quantitative assessment of environmental and associated economic damage to the main components of the environment and the population in this territory was made. The possibility of reducing it and improving the environmental situation in this area based on the integrated use of mineral raw materials and expanding environmental protection measures in the future is shown.

Keywords: technogenic deposit, environmental impact assessment, environmental and economic damage, anthropogenic resources, environmental protection measures

For citation: Burmistrov A.A., Samsonov A.A., Telnov A.E. Ecological and economic aspects of the development of natural and associated technogenic ore deposits using the example of the Dzhida tungsten-molybdenum plant, Republic of Buryatia. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 54–64. (In Russ.).

Введение. Систематические экологические исследования начали проводиться в мире с середины прошлого столетия, когда в окружающей природной среде (ОС) все сильнее стали проявляться признаки нарушения экологического равновесия. К настоящему времени накоплены обширные материалы по геоэкологии многих горнорудных районов России (геоэкологическое картирование, мониторинг состояния

геологической среды), техногенным месторождениям (база данных ВСЕГЕИ, специализированные исследования ВИМС, ИМГРЭ, ВИЭМС и других научно-исследовательских организаций), созданы новые технологии переработки минерального сырья, разработаны эффективные природоохранные мероприятия (ПМ) в недропользовании (методические рекомендации ГКЗ, исследования МГГУ и многих

других организаций). Развитие экономического механизма управления природопользованием позволило создать нормативную и методическую базу для оценки эколого-экономического ущерба (ЭУ) ОС и сопряженным (антропогенным) ресурсам (СР) и требования по их минимизации. Разрабатываются методы математического эколого-экономического моделирования и планирования рационального недропользования [Петрова и др., 2013].

Обобщение и анализ этой информации необходимы для создания системных эколого-геологических моделей (ЭГМ) разрабатываемых месторождений полезных ископаемых разных типов. На наш взгляд эти модели должны включать как минимум 3 уровня, каждый из которых должен включать собственную базу данных с результатами ее анализа. Это необходимо для прогноза экологических последствий и экономических показателей отработки месторождений, подготовленных к освоению. Как известно, стоимость получаемых концентратов и продуктов металлургического передела включает не только затраты на добычу и переработку минерального сырья, но и «экологическую составляющую» — затраты на осуществление природоохранных мероприятий и компенсационных платежей, связанные с возникновением остаточного ущерба ОС и убытков СР. Как было показано ранее в работе [Комаров и др., 1995], посвященной оценке эколого-экономического риска (уровня вероятности потери прибыли) для основных фосфоропроизводящих горнодобывающих предприятий РФ, их величина может быть весьма значительной. Разработка ЭГМ позволит проводить системную оптимизацию экономики недропользования с внедрением профилактических мер, направленных на увеличение объема предотвращенного ущерба (УП).

На *первом уровне* создается цифровая и графическая база данных месторождений по химическому и минеральному составу руд, вмещающих пород и связанных с его отработкой техногенных отходов, по запасам основных полезных ископаемых и сопутствующих химических компонентов, значительно превышающих фоновые концентрации, по распределению этих параметров в объеме изучаемых объектов. В предварительном варианте для рассматриваемой территории это нами было сделано ранее [Самсонов и др., 2024].

На *втором уровне* производится оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) и создается база данных по разным видам химического загрязнения ОС, включающая содержания и накопленные массы химических компонентов руд месторождений, площадей загрязнения и нарушения различных компонентов ОС, что относится к остаточному экологическому ущербу (УО) [Россман и др., 2000].

На *третьем уровне* производится экономическая оценка экологического ущерба, разрабатываются рекомендации по проведению профилактических, текущих и последующих природоохранных меро-

приятий (ПМ) и более рациональному использованию минеральных и других природных ресурсов изученной территории на основе известных разработок, в частности приведенных в работе [Томаков и др., 1994]. В профилактические и текущие ПМ следует включать и новые технологии комплексной переработки природного и техногенного сырья [Арский и др., 1995]. Последующие ПМ — это рекультивация земель горнопромышленных комплексов, которая должна включать работы по переработке руд техногенных месторождений (ТМ), изоляции (консервации) остаточных техногенных отходов до появления возможности их использования в будущем.

В этой публикации проведена приближенно-количественная оценка УО, возникшего в результате многолетней отработки крупных молибденовых и вольфрамовых жильно-штокверковых месторождений Джидинским ВМК (Первомайского, Инкурского и Холтосонского) в районе г. Закаменска, Республика Бурятия, находящегося в бассейне озера Байкал (рис. 1). Проведенные исследования основаны на геологических и геоэкологических данных по существующим там техногенным месторождениям и прилегающей территории г. Закаменска, что соответствует 2-му уровню ЭГМ. Затем была проведена оценка эколого-экономического ущерба ОС и убытков СР вследствие роста заболеваемости населения и снижения качества сельскохозяйственной продукции (3-й уровень ЭГМ) с предложениями по направлениям ПМ, часть из которых относится к внедрению новых технологий в переработку руд ТМ и оценкой УП.

Экологические последствия отработки Холтосонского, Первомайского и Инкурского месторождений. Джидинский ВМК функционировал более шестидесяти лет и прекратил свою деятельность в 1996г. [Ананин, 1999; Ходанович, 1999; Иванова и др., 2016; Бахтин и др., 2003]. В отработанных им вольфрамовых и молибденовых рудах содержались элементы первого, второго и третьего классов опасности: свинец, цинк, фтор, молибден, бериллий, вольфрам, рутений, цезий и многие другие компоненты, выявленные авторами этой статьи по данным опробования хвостов и приведенные ниже. Технология извлечения вольфрамового концентрата предусматривала использование серной кислоты, ксантогената и керосина. Все это привело к значительным масштабам негативного воздействия на ОС и СР на этой территории.

При закрытии комбината не были соблюдены санитарные и экологические требования, предъявляемые к закрываемым предприятиям. Горные работы были прекращены, но горные выработки не ликвидированы, не проведена рекультивация нарушенных земель, не решены вопросы прекращения сброса загрязненных шахтных вод в естественные водоемы, не были реализованы проектные решения по охране окружающей среды в районе г. Закаменска

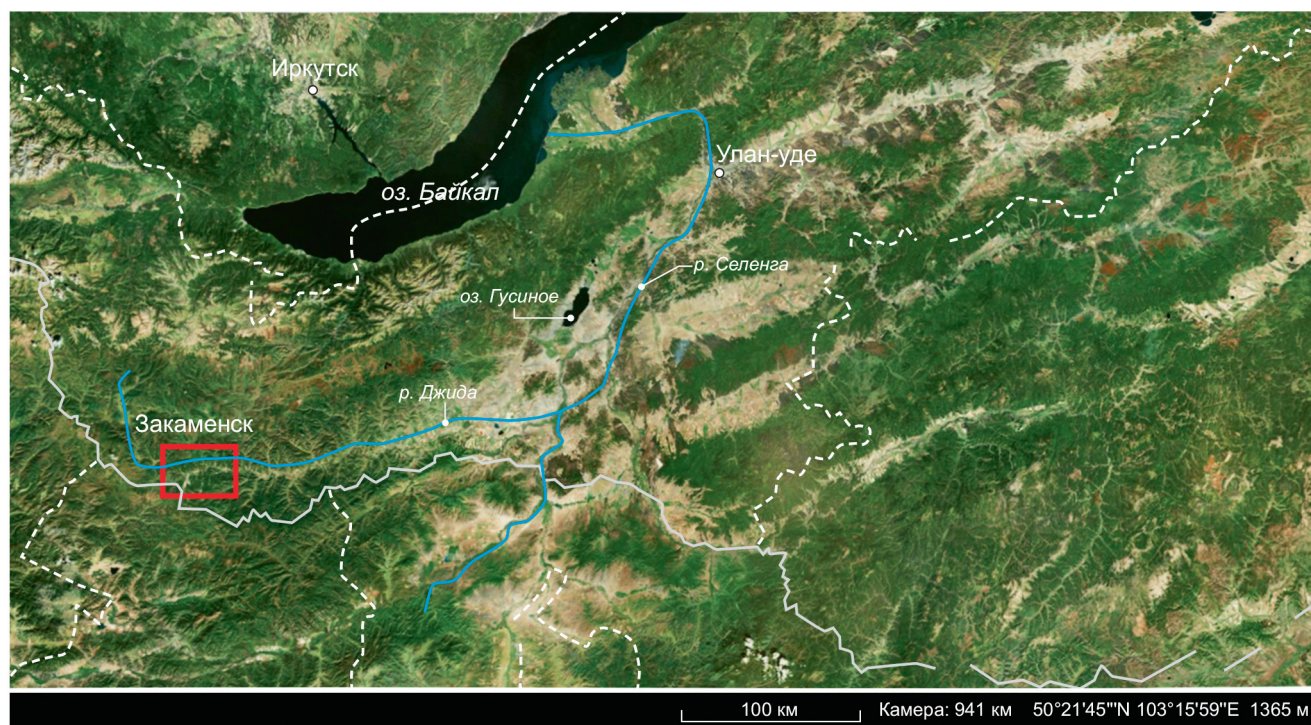


Рис. 1. Географическое положение месторождений Джидинского ВМК

и на прилегающих территориях. Уровень загрязнения воздуха пылью оценивается как высокий, а в отдельные периоды усиления ветрового сноса пыли с хвостохранилища — как очень высокий (до 15 ПДК) [Иванова и др., 2016].

Результаты экологогеохимической оценки почвенного покрова в районе Джидинского комбината показали превышение ПДК по никелю в 3–5, меди в 3, свинцу в 10, цинку в 2, кобальту в 3, марганцу до 2 раз. Установлено, что зона загрязнения почв высокоопасными элементами с большой концентрацией захватывает более половины г. Закаменска. Из-за наползающих на город песчаных отходов комбината в районе хранения новых хвостов наблюдается активное формирование эрозионной сети, в результате чего формируются овраги, через которые хвосты переносятся прямо в город.

На качество воды малого притока р. Джиды (р. Модон-Куль) оказывает влияние неорганизованный сброс шахтных и дренажных вод недействующего Джидинского ВМК. Наблюдения производились в двух створах, 2 км выше г. Закаменска и 1,3 км ниже города (1 км выше устья). Как и прежде, шахтные дренажные воды и ливневые стоки с хвостохранилищ содержат значительные количества металлов, фтора, сульфатов и оказывают существенное влияние на качество воды р. Модон-Куль в обоих створах. Минерализация воды реки менялась от малой (176 мг/куб. дм) до повышенной (864 мг/куб. дм). Окисление сульфидных минералов рудного поля с образованием серной кислоты и выносом опасных для окружающей среды химических элементов с отвалов шахтными, карьерными и инфильтрационными

ми водами привело к загрязнению ряда водотоков бассейна р. Джиды (рек Инкур, Барун-Нарын, Зун-Нарын, Модон-Куль, Гуджирка и Мырген-Шено), являющихся наиболее загрязненными в бассейне оз. Байкал. По данным многолетних наблюдений водородный показатель (рН) вод колеблется от 1,7 до 7, максимальная концентрация сульфатов достигала 36 ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения, цинка — 45, кадмия — 1120, хрома — 525 ПДК, содержания мышьяка, меди и никеля также намного выше ПДК (рис. 2; 3). В водах, вытекающих из хвостохранилищ и отвалов некондиционных руд, превышение ПДК зафиксировано по алюминию — в 17, кадмию и цинку — в 7, фтору — в 4 раз, по нефтепродуктам — в 24, меди и селену — в 2 раза [Иванова и др., 2016; Министерство..., 2016].

Приведенные факты загрязнения водных объектов по уровню загрязнений тяжелыми металлами близки приведенным в работе [Колотов и др., 2000] по гидрохимическому изучению водных объектов на территории рудника вольфрам-полиметаллического месторождения Восток-2 в Приморье и ряда других объектов. Показано, что окисление сульфидов приводит к подкислению вод, увеличивая растворимость в них тяжелых металлов. При выходе вод из отстойников происходит увеличение их концентраций уже за счет образования взвесей и переноса их в электрическом слое элементов-гидрализаторов (Fe, Mn, Al, Ti). Рудная пыль, выдуваемая из хвостов, также способствует возникновению кислотных дождей и переходу тяжелых металлов в почвы, где через гумусовый слой они попадают в растения, которые вследствие биологического накопления могут до-

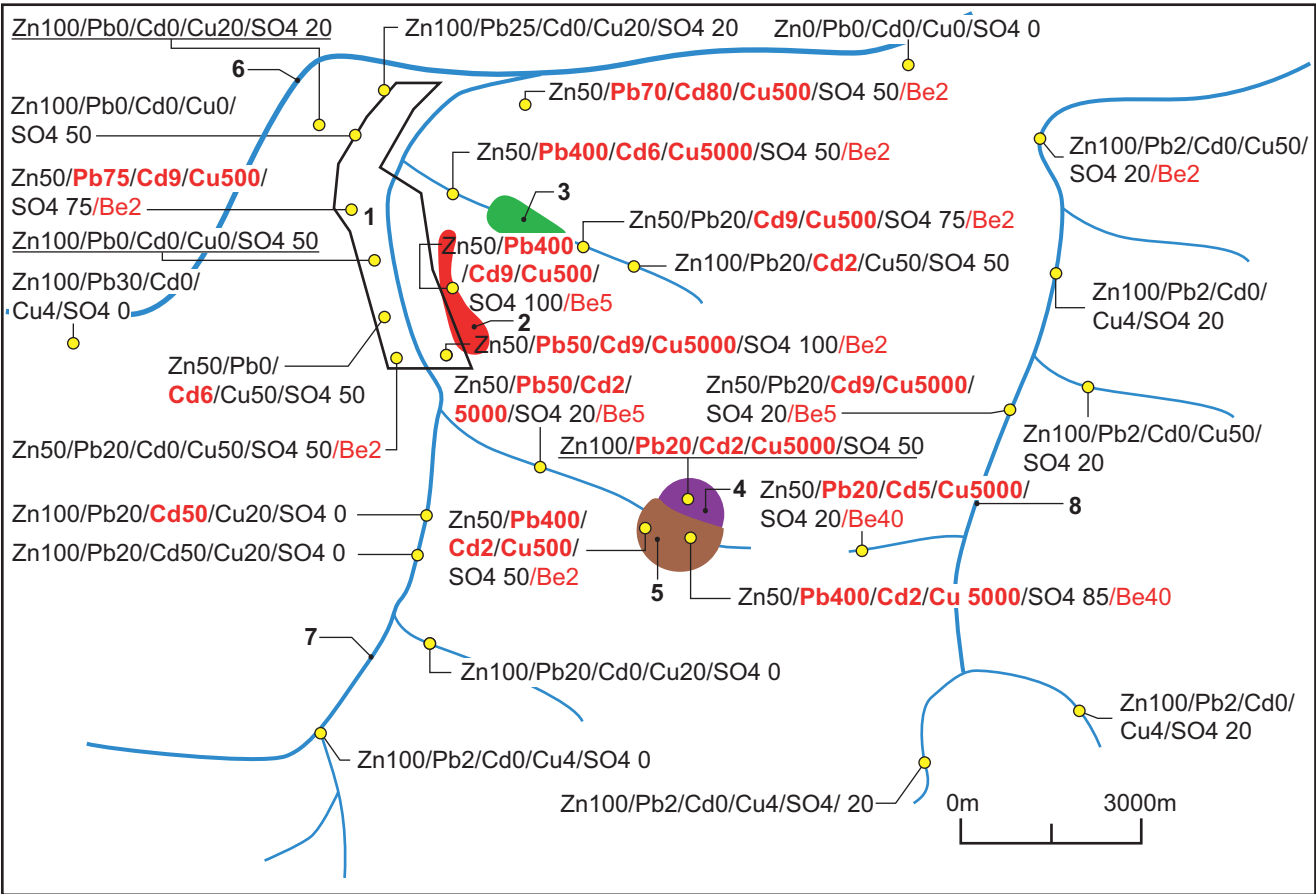


Рис. 2. Гидрогеохимическая схема района г. Закаменска [по Колотову и др., 2000, с изменениями]. Цифровые обозначения на схеме: Zn100/Pb70/Cd6/Cu500/ — содержания элементов (мкг/л) в водных объектах, SO_4^{2-} 50 — содержание сульфат-иона (мг/л) (красным выделены компоненты и их содержания, превышающие ПДК для водных объектов; оранжевыми точками показаны места отбора проб). 1 — г. Закаменск; техногенные месторождения: 2 — Дзидинское; 3 — Барун-Нарынское; территории карьеров, штолен и отвалов природных месторождений: 4 — Первомайского, 5 — Инкурского, Холтосонского; реки и ручьи: 6 — Джида, 7 — Модон-Куль, 8 — Зимка



Рис. 3. Излив штольневых вод из штольни Холтосонского месторождения [natural-sciences...]

полнительно увеличивать их концентрации. После ежегодного отмирания растений осенью концентрация тяжелых металлов в почве возрастает. Поверхностные водные объекты переносят загрязнители далее в акватории рыбхозов.

Статистическая оценка остаточного экологического ущерба ОС. На основании ранее полученных данных [Технико-экономическое..., 2011; Самсонов и др., 2024] по размерам хвостохранилищ и средним концентрациям химических компонентов в хвостах нами произведен приближенно-количественный расчет экологического ущерба ОС, возникающего от загрязнения атмосферы, водных и земельных ресурсов. Сначала производился расчет массы пыли, сдуваемой в течение года с площади поверхности техногенных образований по методике, изложенной в работе [Комонов, Комонова, 2008]. Для этого определялись величины удельного сдувания пыли с 1 м² песков и илов (w , мг/м²с), интенсивность сдувания пыли со всей их поверхности (q , мг/с), средние концентрации пыли в атмосфере (c , мг/м³) и расстояния переноса пыли от хвостохранилища (L , м). Расчеты осуществлялись по следующим формулам:

$$w = a \cdot U^b,$$

где для песков $a = 0,00087$, $b = 4,199$, $U = 2\text{--}3$ м/с (в среднем 2,5 м/с) — преобладающая скорость ветра;

$$q = S \cdot w = 0,85 \cdot U \cdot 5 \text{ (м)} \cdot d \cdot c,$$

где c — средняя концентрация пыли в воздухе за границей хвостохранилища (мг/м³); d (м) — ширина отвала с подветренной стороны, величина которой принята равной 1000 м с учетом северо-западной ориентировки долины р. Барун-Нарын, в которой находятся хвостохранилища (рис. 4);

$$L = -144 \cdot \ln[c/(1,42 \cdot 10^{-5} \cdot q)] - 1,91 \cdot H,$$

где H — средняя высота отвала (20 м).

Дополнительный расчет L осуществлялся по формуле:

$$L = U \cdot H/v,$$

где $v = 0,02$ м/с — средняя скорость осаждения пыли [Минералого-геохимические..., 2020].

Расчет интенсивности сдувания пыли с поверхности илов производился для установленной средней величины $w = 1,8\text{--}2,8$ мг/м²с (при влажности хвостов 2–6%) при скорости ветра до 4 м/с [Томаков и др., 1994]. Годовая масса сдуваемой пыли (M , т/год) определялась как произведение величины q на время в секундах. Далее определялись годовые выбросы (m_i , т) компонентов-загрязнителей — как произведения массы годового выброса пыли на средние содержания каждого из компонентов в хвостах, установленных по данным опробования скважин Барун-Нарынского месторождения [Технико-экономическое..., 2011], а также по результатам

химического анализа методом ICP MS) отобранных нами проб песков и илов (табл. 5). Исследования выполнены методом ИСП-МС с использованием масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой, адаптированного для работы с системой лазерного пробоотбора SUPEC 7000, приобретенного по Программе развития МГУ; аналитик с.н.с. кафедры геохимии И.Ю. Николаева. Результаты расчетов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Показатели интенсивности и масштабов сдувания пыли с поверхности хвостохранилищ около г. Закаменска

Техногенные образования	q , г/с	c , мг/м ³	M , т/год	L , м
Пески	39	5	173	1275
Илы	1597	188	6912	1806 (2000)

Примечание: в скобках приведена оценка разноса пыли при средней скорости ее выпадения 2 см/с [Методические..., 2020]

Таблица 2

Средние концентрации некоторых химических компонентов в хвостах и массы годовых выбросов их в атмосферу с поверхности хвостохранилищ около г. Закаменска

Компоненты выбросов	пыль	Cd	As	Pb	H ₂ SO ₄	Cr
C_i , г/т		82	239	597	22000	128
m_i (год), т	7000	1	2	4	154	1

Массы годовых сбросов каждого компонента (m_i , т) в водные объекты определялись как произведение концентрации (C_i , мг/м³) i -го компонента в сточных водах на годовой объем сточных вод:

$$m_i = C_i \cdot H \cdot S,$$

где $H = 0,4$ м — среднегодовое количество осадков в районе г. Закаменска, S (м²) — площадь техногенных образований в районе г. Закаменска.

Величина C_i определялась как среднее из данных гидрогеохимической съемки (рис. 2) в местах стока вод около хвостохранилищ, для содержаний фтора в поверхностных водах по данным работы [Ломоносов и др., 2008], а Cu, As и Zn также прямым расчетом — по концентрации этих элементов в кислых рудничных водах C_i (мг/м³) для известной величины сульфидности руд [Борисова и др., 1992], среднее значение которой для хвостов Барун-Нарынского месторождения по данным опробования скважин составляет 2,2%, а для отвала сульфидных песков она была принята равной 30%. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Суммарный показатель загрязнения в верхнем слое почвы за счет привноса пыли с высокими содержаниями Zn, Cu, Pb, Bi, S, Be, Cd, As составил 540 (очень высокая степень загрязнения [Россман и др.,

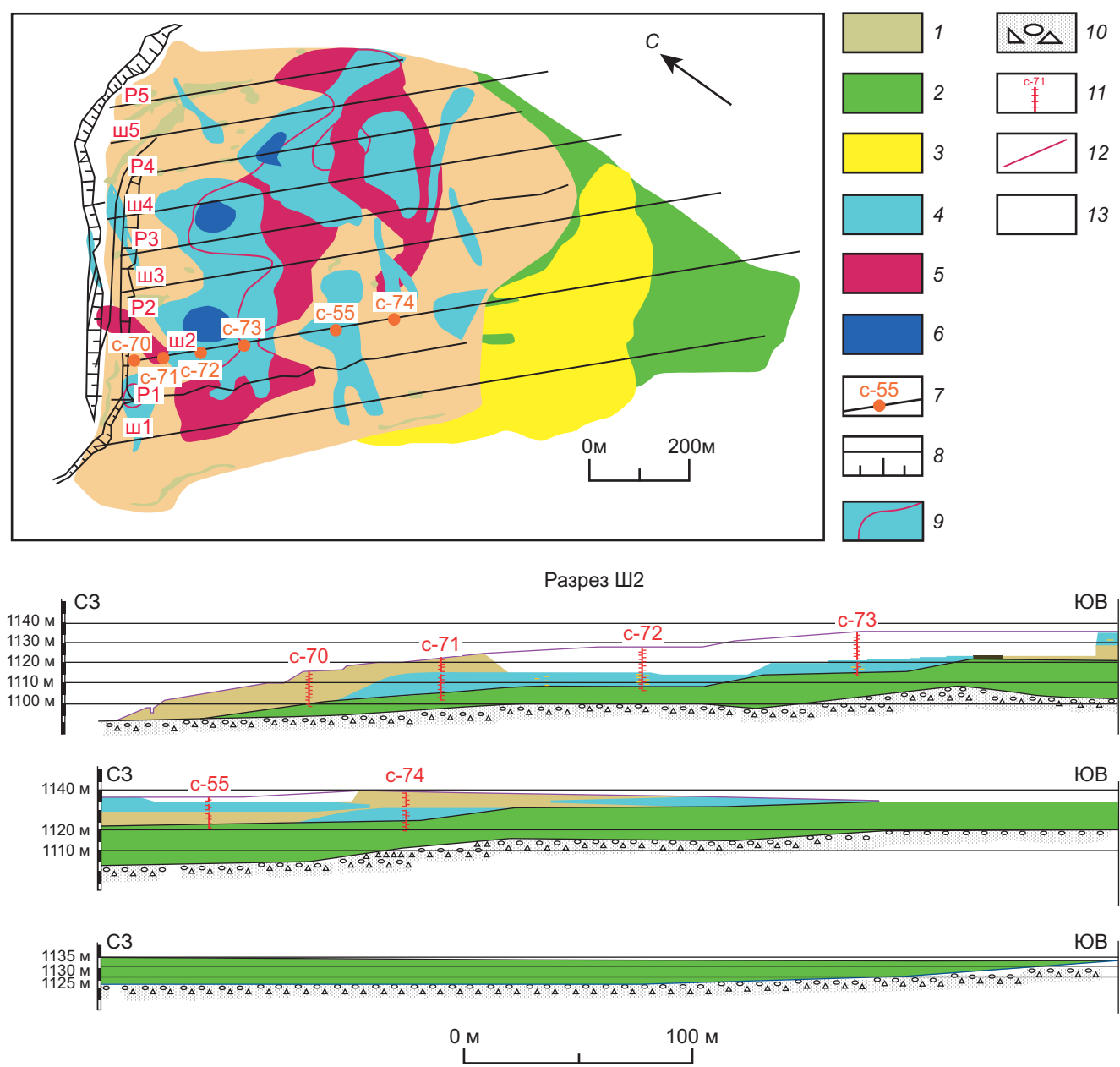


Рис. 4. Геологическая схема Барун-Нарынского техногенного месторождения с данными по содержаниям WO_3 и серы на гор. +1125 м и геологическим разрезом по разведочному профилю Ш2. 1–2: вольфраморудные пески (1) и илы (2), 3 — сульфидные пески; 4–6 — геохимические ореолы с содержаниями: WO_3 : 4 — более 0,09%, 6 — более 0,15%; серы: 5 — более 2%; 7 — разведочные профили (профиль Ш2 со скважинами и их номерами); 8 — дамба хвостохранилища; 9 — контуры ореолов серы в пределах площади ореолов триоксида вольфрама; 10 — аллювий долины р. Барун-Нарын; 11 — разведочные скважины с их номерами; контур поверхности хвостов до отработки; 13 — открытая поверхность долины р. Барун-Нарын

Таблица 3

Годовой сброс некоторых химических компонентов за счет естественного выщелачивания руд Барун-Нарынского и Модонкульского техногенных месторождений

Компоненты	Cu	Zn	As	Fe	Cd	Pb	Be	F
Сброс, т/год (хвосты)	200 (10)	130 (180)	(9)	(14)	9	55	20	880
Сброс, т/год (сульфидные пески)	225	370	6	55				

Примечание: в скобках приведен расчетный годовой сброс (Cu, Zn, As), данные по концентрации в воде F взяты из работы [Ломоносов и др., 2008].

2000)). Он был рассчитан по концентрациям этих элементов в хвостах по формуле Саэа:

$$Z_c = \sum_{k=0}^n x_i - (n-1),$$

где x_i — отношение средней концентрации i -го компонента к его фоновой концентрации в почвах [Водяницкий, 2008] (в отдельных случаях вместо фоновых нами были взяты значения ПДК или ОДК); n — число химических компонентов.

Оценка эколого-экономического ущерба ОС района г. Закаменска. Оценка ущерба производилась для площади г. Закаменска и прилегающих территорий, включая территорию Джидинского ВМК. Стоимостная оценка ущербов от загрязнения земель (Y_3) и от несанкционированных свалок отходов (Y_{nc}), определялись по нижеприведенным формулам [Россман и др., 2000]:

$$Y_3 = \sum_{i=1}^n K_c \cdot S_i \cdot K_b \cdot K_{zi} \cdot K_3 \cdot K_r, \quad (1)$$

$$Y_{nc} = \sum_{i=1}^n Нп_i \cdot m_i \cdot K_3 \cdot 25 \cdot K_b, \quad (2)$$

где $Нп_i$ (руб.) — норматив платы за размещение 1 т отходов i -го вида; m_i (т, куб. м) — масса отхода i -го вида; K_c (тыс. руб./м²) — кадастровая стоимость земель (на данный период для сероземов Республики Бурятия, используемых для садоводства и населенных пунктов, она составляет 167,65 руб./м²) [Приказ..., 2021]; K_b — коэффициент пересчета в зависимости от периода времени по восстановлению земель (нами взяты его значения для 1 года — 0,9 и для 15 лет — 7); S_i (м²) — площадь загрязнения хим. веществом i -го вида; K_{zi} — коэффициент пересчета в зависимости от степени загрязнения земель i -го вида (2 — очень сильная, что соответствует рассчитанному нами ранее коэффициенту суммарного загрязнения $Z_c = 540$) [Минералого-геохимические..., 2020]; K_3 — коэффициент экологической ситуации экономического района (1,1); K_r — коэффициент пересчета в зависимости от глубины загрязнения земель (принят для минимальной глубины равным 1).

Для определения этих коэффициентов были использованы справочные материалы, приведенные в работе [Россман и др., 2000]. Базовые нормативы платы взяты из опубликованных данных [Постановление..., 2023].

Ущерб от загрязнения атмосферы (Y_a) и водных ресурсов (Y_b), соответствующие платам за их загрязнение, определялись по следующей формуле [Россман и др., 2000]:

$$Y_{a(b)} = K_{инд} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot m_i \cdot k, \text{ руб.}, \quad (3)$$

где n — число видов (i) загрязняющих веществ; m_i — масса годового выброса i -го загрязняющего вещества в атмосферу или сброса его в водные объекты (в пределах ПДС, ПДВ или установлен-

ных лимитов); P_i — базовый норматив платы за выброс (сброс) 1 т i -го загрязняющего вещества; k — коэффициент экологической ситуации региона (для данного района он равен 1,1 — для атмосферы и 1,4 — для водных ресурсов); $K_{инд}$ — коэффициент индексации ставок P_i .

При превышении концентрации C_i i -го вредного компонента в выбросе или сбросе его ПДК_{*i*}, при котором не выполняется следующее соотношение:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ПДК_i} \leq 1,$$

где $C_i = C_{\text{выброса}} + C_{\text{фоновое}}$, а также в случае превышения величин ПДС_{*i*} и ПДВ_{*i*}, плата за соответствующие ущербы возрастает в 5-кратном размере по массе превышения относительно ПДС_{*i*} и ПДВ_{*i*} или по всей массе при превышении ПДК_{*i*}. В данной работе эти случаи не рассматривались ввиду отсутствия данных экомониторинга по фактам превышений ПДК по каждому изученному компоненту-загрязнителю.

Ниже приводится расчет годового остаточного ущерба атмосфере (по вышеприведенной формуле 3) за счет выброса пыли, содержащей от 20 до 70%, SiO₂, а также Cd, As, Pb, H₂SO₄(SO₂), Cr⁶⁺, средние содержания которых в отобранных пробах хвосты (С, г/т) определены нами по данным химического анализа методом ICP MS с использованием масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой, адаптированного для работы с системой лазерного пробоотбора SUPES 7000, приобретенного по Программе развития МГУ; аналитик с.н.с. кафедры геохимии И.Ю. Николаева) (табл. 5), а также по результатам опробования разведочных скважин [Технико-экономическое..., 2011].

$$\begin{aligned} Y_{O_a} &= K_{инд} \cdot K_3 \cdot (P_{\text{пыль}} \cdot m_{\text{пыль}} + \\ &+ 0,007 \cdot (C_{Cd} \cdot P_{Cd} + C_{As} \cdot P_{As} + C_{Pb} \cdot P_{Pb} + \\ &+ C_{SO_2} \cdot P_{SO_2} + C_{Cr} \cdot P_{Cr})) = \\ &= 1,26 \cdot 1,4 \cdot (56,1 \cdot 7000 + 0,007 \cdot (82 \cdot 14759,3 + \\ &+ 239 \cdot 1823,6 + 597 \cdot 18244,1 + 22000 \cdot 45,4 + 3647 \cdot 128)) = \\ &= 870 \text{ тыс. руб./год.} \end{aligned}$$

Массы химических компонентов в этом расчете получены путем умножения их концентраций (C_i , г/т) в пыли от хвостов на рассчитанную ранее годовую массу сноса пыли (0,007 млн т). Базовые нормативы платы за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу (P_i , руб/т) соответствуют 2018 г. и поэтому взяты с коэффициентом индексации 1,26 [Постановление..., 2023].

Аналогично предыдущему расчету по формуле 3 рассчитывался годовой ущерб от загрязнения водных ресурсов (Y_b) (табл. 6).

Расчет годового ущерба от складирования техногенных отходов, содержащих компоненты 1-го (Zn, Pb, Cd, As), 2-го (Cu, Mo, Cr) и 3-го (W) классов опасности, произведен по их накопленным массам в хвостохранилищах в соответствии с формулой 2:

Таблица 5

Содержания (г/т) ряда элементов в пробах керна разведочных скважин месторождения Барун-Нарын

№ пробы	Be	P	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Zr	Nb	Mo	Ru	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Hf	Ta	W	Au	Pb	Bi
C-4501	40	504	57	23	71	15369	2	7	57	23	22	3	99	27	8	122	0,003	5	2	8	18	2	1,02	0,5	456	0,09	286	41
C-1401	61	982	90	62	112	28035	16	23	200	59	21	5	124	11	2	12	<0,001	5	6	9	10	2	0,36	0,1	591	0,03	316	26
C-1406/10	43	984	79	62	106	26850	16	23	186	47	18	4	41	12	2	8	0,002	5	5	6	10	2	0,36	0,1	413	0,05	277	17
C-1410	43	879	85	57	104	27373	15	20	213	55	19	4	12	10	2	11	<0,001	8	6	7	12	2	0,40	0,1	476	0,07	406	21
C-5601	44	679	83	80	106	23540	13	25	204	71	18	4	15	9	2	14	<0,001	6	8	8	5	1	0,32	0,1	845	0,02	387	26
C-5605	65	870	91	91	102	22684	13	27	186	59	18	5	8	9	2	11	0,002	5	7	8	13	1	0,34	0,1	482	0,02	274	26
C-5612	72	1128	113	108	122	21694	11	30	266	82	26	5	9	10	2	22	<0,001	6	9	16	15	2	0,32	0,1	763	0,02	347	45
Z-32046	6	1060	127	162	96	34620	27	131	79	15	17	2	20	21	5	23	<0,001	1	1	2	5	0	0,85	0,4	101	0,01	78,5	7
Z-37012	44	1108	158	179	198	24393	10	48	296	77	28	5	9	11	2	42	0,005	8	8	16	9	2	0,39	0,1	811	0,03	438	61
БН-И	48	937	129	156	158	23970	10	40	317	65	28	5	8	7	2	39	0,004	11	6	18	13	2	0,29	0,1	739	0,02	445	70

Таблица 6

Годовой ущерб водным ресурсам за счет сброса в них некоторых химических компонентов сточных вод

Компоненты	Cu	Zn	As	Fe	Cd	Pb	Be	F	Суммарный У _в , млн руб./год
У _в , млн руб./год	290	50	0,3	2	5	6	44	1	358,3

$$Y_{\text{нс}} = 25 \cdot 1,1 \cdot 0,9 \cdot [4643,7 \text{ руб./т} \cdot (30 \text{ т.т} + 26 \text{ т.т} + 11 \text{ т.т} + 4 \text{ т.т}) + 1990,2 \text{ (руб./т)} \cdot (13 \text{ т.т} + 2 \text{ т.т} + 6 \text{ т.т}) + 1327 \text{ руб./т} \cdot 34 \text{ т.т}] = 10311 \text{ млн руб./год.}$$

Только за 15 лет существования данных техногенных отходов после окончательного закрытия Джидинского ВМК (с учетом коэффициента времени существования отходов для этого периода равного 7) $Y_{\text{нс}}$ составил:

$$Y_{\text{нс}} = 25 \cdot 1,1 \cdot 7 \cdot [4643,7 \text{ руб./т} \cdot (30 \text{ т.т} + 26 \text{ т.т} + 11 \text{ т.т} + 4 \text{ т.т}) + 1990,2 \text{ (руб./т)} \cdot (13 \text{ т.т} + 2 \text{ т.т} + 6 \text{ т.т}) + 1327 \text{ руб./т} \cdot 34 \text{ т.т}] = 80\,198 \text{ млн руб.}$$

Годовой ущерб от загрязнения земель (формула 1) составил:

$$Y_3 = 167,65 \text{ руб./м}^2 \cdot 2\,000\,000 \text{ м}^2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1,1 = 665 \text{ млн руб./год.}$$

За 15 лет существования загрязнений высокого уровня на площади 2 км² он составит:

$$Y_3 = 167,65 \text{ руб./м}^2 \cdot 2\,000\,000 \text{ м}^2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 7 \cdot 1,1 = 5174 \text{ млн руб.}$$

Суммарный годовой эколого-экономический ущерб ($Y_{\text{Э}}$), таким образом, составляет 11335 млн руб. Для сравнения приведем данные из работы [Максимова, 2018] по оценке $Y_{\text{Э}}$ от хранения золотых отходов Кемеровской области: при ежегодном увеличении их массы на 2,7 млн т он возрастает на 49 млн руб. и для общей накопленной массы 50 млн т с учетом времени их существования он оценивается в 920 млрд руб. При этом надо учесть, что ставка платы за размещение 1 т этих отходов составляет всего 115 руб./т (нетоксичные отходы).

Для расчета удельного годового $Y_{\text{Э}}$ ($Y_{\text{Эуд}}$, рублей на единицу произведенной ГОКом продукции) ориентировочно принимаем среднюю производительность комбината — 3 тыс. т/год (1936–1996). При этом полученная его величина в 3,8 млн руб. на 1 т концентрата очевидно относится к послед-

нему периоду работы этого предприятия, когда $Y_{\text{Э}}$ стал максимальным. В него не включен ущерб сопряженным ресурсам, который мал по сравнению с $Y_{\text{Э}}$ (примерно 5–7 млн руб. в год), хотя и очень опасен для населения, как это будет показано ниже. Если взять общее количество отработанной руды (45 млн т) и принять, что средний годовой $Y_{\text{Э}}$ в течение 60-летней истории работы ГОКа составлял примерно половину от современного, то можно рассчитать средний годовой удельный эколого-экономический ущерб ($Y_{\text{Эуд}}$), возникающий при добыче 1 т руды в год:

$$Y_{\text{Эуд}} \approx 11335 \text{ (млн руб./год)} \cdot 60 \text{ (лет)} / [2 \cdot 45 \text{ (млн т)}] \approx 7500 \text{ руб./т.}$$

Для сравнения приведем значение среднего годового $Y_{\text{Эуд}}$ для Sn-W месторождений дальнего Востока (Солнечный ГОК), рассчитанного по данным, взятым из работы [Борисова, 1992], с учетом индекса инфляции (130) для периода 1991–2023 гг.:

$$Y_{\text{Эуд}} = 1,94 \text{ (руб./т)} \cdot 130 \approx 260 \text{ руб./т.}$$

Такое большое различие в значениях $Y_{\text{Эуд}}$ связано с тем, что в конце 1980-х годов еще не существовали современные нормативы платы за складирование отходов, на которые приходится львиная доля всех платежей за ущерб ОС.

Для сравнения также приведем расчеты годового ущерба ОС от нарушенных земель ($Y_{\text{нз}}$) по укрупненным нормативам по следующей формуле [Россман и др., 2000]:

$$Y_{\text{нз}} = K_{\text{инд}} \cdot \sum B_i (\text{руб./га}) \cdot S(\text{га}),$$

где B_i (руб./га) — показатель годового экономического ущерба от нарушений i -го типа (в данном случае это отвалы, карьеры, хвостохранилища); в ценах 1984 г. он составляет для карьеров глубиной более 100 м в лесной зоне — 96 руб./га, для отвалов высотой до 100 м — 140 руб./га, для хвостохранилищ — 560 руб./га; $S(\text{га})$ — площадь нарушений определенного типа.

Соответственно, суммарный $Y_{\text{нз}}$ от указанных типов нарушенных земель (при значении $K_{\text{инд}}$ для периода 1991–2023 гг. равного 130) для вышеуказанных видов нарушений он составляет:

$$Y_{\text{нз}} = (1+10+15) = 26 \text{ млн руб./год}$$

Полученное значение $Y_{\text{нз}}$ меньше величины ущерба от загрязнения земель, рассчитанного нами выше. Различие в значениях $Y_{\text{нз}}$ связано с существованием до начала 1990-х годов упрощенных расчетов и нормативных требований по платежам за ущерб ОС.

Ущерб антропогенным ресурсам. Санитарно-медико-эпидемиологические последствия деятельности Джидинского ВМК очень значительны, что связано как с масштабами техногенных отходов, так и значительным временем их существования (с конца 1930-х годов).

Суммарный индекс опасности для взрослого и детского населения г. Закаменска в условиях комплексного комбинированного поступления химических веществ наиболее высок для органов дыхания (17–18) и центральной нервной системы (8–9), для других органов — от 1 (для печени) до 3–4 — для гормональной системы [Вековшина и др., 2017]. По данным детальных медико-экологических исследований [Май и др., 2018] основными факторами канцерогенного риска являются металлы (кадмий, никель, хром, кобальт, бериллий, мышьяк, свинец и др.), поступающие с атмосферным воздухом. Присутствие металлов, обладающих канцерогенными свойствами, в атмосферном воздухе, почве, продуктах питания, питьевых водах, формирует ненормативное качество объектов среды обитания (2,34 ПДК — в атмосферном воздухе, до 4 ПДК — в питьевой воде общественных и частных колодцев), что свидетельствует о необходимости исключения колодцев из систем питьевого водоснабжения граждан территории наблюдения. Сложившиеся уровни экспозиции жителей территории наблюдения опасными канцерогенными веществами формируют недопустимые риски в отношении развития онкологических заболеваний (суммарный индивидуальный канцерогенный риск — до $4,87 \cdot 10^{-3}$). Основной вклад в величину общего суммарного индивидуального канцерогенного риска (ТСЯ) вносит поступление анализируемых химических веществ с атмосферным воздухом (вклад в величину ТСЯ до 93,9%) и пищевыми продуктами (вклад в величину ТСЯ до 74,8%).

По данным Территориального фонда обязательного медицинского страхования, заболеваемость по обращаемости взрослого населения территории наблюдения достоверно превышала заболеваемость населения территории сравнения как в целом по классу «новообразования» — в 1,15–5,48 раза (в 2010–2015 гг.), так и по отдельным нозологическим группам подкласса «злокачественные новообразования кожи», «злокачественные новообразования мезотелиальной и мягких тканей», «злокачественные новообразования глаза, головного мозга и других отделов центральной нервной системы» (С43–С44, С45–С49, С69–С72, заболеваемость в указанных группах составила соответственно 0,931; 0,072 и 0,143 случаев /1000 чел. при отсутствии данных диагнозов на территории сравнения); «злокачественные новообразования мужских половых органов» (С60–С63; в 1,65 раза). В группе наблюдения зарегистрированы достоверно более высокие по сравнению с территорией сравнения уровни кадмия в крови; отмечена тенденция к более высокому уровню содержания в крови детей никеля и хрома. Регистрация канцерогенных химических веществ в биосредах населения, проживающего в зоне влияния отходов горнорудного комбината, может быть обусловлена их присутствием в среде обитания.

Уровень первичной заболеваемости взрослого населения муниципального района новообразованиями с 2009 по 2014 год вырос на 169,6%. Для территории субъекта РФ в целом темп прироста данного показателя за период 2009–2014 гг. составил 30,1% [Май и др., 2018]. Полученные результаты свидетельствуют, что выявленные нарушения могут быть ассоциированы с факторами риска среды обитания населения, проживающего в зоне влияния отходов горнорудного комбината.

С учетом некоторых современных данных по стоимости полисов ОМС и лечения онкозаболеваний [sravni.ru] и легочных заболеваний [rgnkc.ru] эти убытки для населения могут составлять до первых млн руб. в год и первых сотен руб. в год на одного пациента, соответственно. Эти виды заболеваний взяты как наиболее распространенные в этом районе [Май и др., 2018].

Ущерб (убытки) сопряженным (антропогенным) ресурсам, в данном случае, собственникам земель сельскохозяйственного назначения можно оценить по снижению качества продукции и урожайности [Россман и др., 2000]. Этот ущерб в экологическом отношении связан с хроническими заболеваниями, о которых речь шла выше. Зараженные тяжелыми металлами растения усваиваются сельскохозяйственными животными, что и объясняет зараженность ими мясомолочной продукции.

Одним из способов проведения ПМ здесь является внесение карбонатов в почвы, снижающих кислотность вод, а также установка очистных сооружений на выходах рудничных вод [Колотов и др., 2000]. Эффективным и недорогим способом извле-

чения U, Au, Be, Cd и др. из руд и рудничных вод является очень давно известное в мире бактериальное выщелачивание, используемое в частности для обогащения бедных руд (США). Тионовые и другие виды бактерий производят серную кислоту из сульфидов и переводят тяжелые металлы в растворимое состояние. Экологически допустимым является вариант утилизации остаточных техногенных отходов, при котором они будут экранироваться от водной и ветровой эрозии, например, современными полимерными покрытиями [Комонов, Комонова, 2008]. Антропогенные ресурсы (коммунальные хозяйства и др.) вынуждены нести дополнительные затраты на очистку вод в зонах их загрязнения, а порой также земельных участков и атмосферы.

Общая и текущая экономическая оценка использования природных ресурсов. Экономическая оценка природных ресурсов имеет свои специфические особенности, часто не учитываемые при выборе проектов их освоения. В общей экономической оценке имеющихся на данной территории природных и техногенных ресурсов применяются расчеты их стоимости с учетом как основных, так и второстепенных направлений их использования, а также использования их в будущем, когда станет возможным применение более эффективных технологий переработки минерального сырья и будут усовершенствованы как оценка проектов отработки, так и экономический механизм регулирования природопользования; возрастут цены на получаемую продукцию вследствие уменьшения содержаний полезных компонентов в природных месторождениях и роста глубин их отработки [Петрова и др., 2013; Гиусов и др., 1998]. Это особенно важно в случае, если рядом имеются ценные природные объекты (в данном случае это бассейн оз. Байкал).

Текущая экономическая оценка эффективности ПМ основана на расчете общего экономического результата (ОЭР) от их проведения, включая комплексную переработку сырья [Бурмистров, 2002]:

$$\text{ОЭР} = \text{Д1} + \text{Д2} + \text{Д3} - 31 - 32,$$

где Д1 — доход (включая льготы и субсидии) от получения новой продукции, в т.ч. стройматериалов для местных нужд, Д2 — доход от снижения платежей за загрязнение и нарушение ОС (снижение УО), передачи рекультивированных земель другим собственникам, Д3 — рост доходов СР за счет снижения объемов проводимых ПМ и уменьшения соответствующих убытков, улучшения качества продукции и здоровья населения, 31 — затраты на внедрение новых технологий, консервацию остаточных техногенных отходов и рекультивацию земель, 32 — платежи за загрязнение ОС при отработке техногенных месторождений.

Величина 32 снижается при внедрении различных видов ПМ (оборотное водоснабжение, орошение отработываемых поверхностей хвостов и др.).

Заключение. В данной работе произведен приближенно-количественный расчет эколого-экономического ущерба окружающей среде и антропогенным ресурсам в районе г. Закаменска. Масштабы его внушительны, несмотря на то что в расчетах нами не учитывались превышения уровней выбросов и сбросов над ПДВ и ПДС или установленными лимитами, существенно влияющими на рост платежей за загрязнения ОС. Эти данные можно получить только по результатам экомониторинга. Наибольший УЭ возник от многолетнего складирования техногенных отходов, содержащих ряд опасных попутных компонентов.

Необходимо отметить, что масштабы загрязнений ОС в процессе переработки техногенных отходов снижаются медленно, так как эта отработка требует значительного времени и сама по себе также наносит экологический ущерб ОС, возникают вторичные хвостохранилища. Отвалы забалансовых руд гораздо слабее подвергаются выветриванию и разрушению, но объемы их в десятки раз больше, чем хвостов. Масса опасных загрязнителей — попутных компонентов руд, уменьшается только в случае комплексной переработки хвостов.

Важно также подчеркнуть, что стоимость УЭ возрастает пропорционально времени как самого его существования (загрязненная ОС), так и существования его источников. Например, при постоянном нахождении около источников слабо радиоактивного заражения за большой период времени все равно может быть получена высокая доза поглощенного излучения, а уран и другие тяжелые металлы могут накопиться на геохимических барьерах рядом.

Отработка крупных остаточных запасов Инкурского и, в значительно меньшей степени, Холтосонского месторождений в будущем может привести к тому, что подавляющая часть минерализованной горной массы останется на земной поверхности в виде новых отвалов и хвостов в еще большем объеме, чем это было в ходе работы Джидинского ВМК.

В настоящее время благодаря отработке Барун-Нарынского техногенного месторождения АО «ЗАКАМЕНСК» остаточный экологический ущерб в районе г. Закаменска сокращается. В тоже время, кардинальное решение этой проблемы возможно в двух случаях: внедрение малоотходных и безотходных технологий в процесс обогащения техногенных руд, либо консервации техногенных отходов. Наиболее эффективным будет их сочетание, т.к. часть компонентов руд можно извлечь, а часть пока еще нет.

Следует отметить, что стоимость ПМ очевидно может быть в разы меньше стоимости остаточного экологического ущерба и убытков антропогенным ресурсам, в т.ч. связанных со здравоохранением. Эти вопросы могут быть успешно решены при системном и комплексном подходе — создании ЭГМ, которые помогут осуществлять прогнозирование величин УЭ для месторождений, подготовленных к освоению, что является составной частью проектов разведочных кондиций [Методические..., 1995].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананин В.А. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого и горнодобывающего комплексов Республики Бурятия: пути решения проблемы Джидинского вольфрамо-молибденового комбината. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. 46 с.
- Арский Ю.М., Архипов Н.А., Аюров В.Д. и др. Рациональное природопользование в горной промышленности / Под общ. ред. проф. В.А. Харченко. М.: Изд-во МГГУ, 1995. 407 с.
- Бахтин В.И., Барский В.Ф., Дорошкевич Г.И. и др. Состояние, освоение и перспективы развития минерально-сырьевой базы Республики Бурятия. Геологической службе Бурятии — 50 лет: Материалы регион. науч.-практ. конф. Улан-Удэ, 2003. 156 с.
- Борисова Н.В. Оценка эколого-экономического ущерба окружающей среде в районах деятельности горнодобывающих предприятий Дальнего Востока. (Росгеолфонд). Хабаровск: ДВМИС, 1992. 120 с.
- Бурмистров А.А. Эколого-экономическая оценка месторождений (твердые полезные ископаемые): Уч. пособие / Под ред. проф. В.И. Старостина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 186 с.
- Вековичина С.А., Клейн С.В., Ханхареєв С.С. и др. Оценка качества среды обитания и рисков для здоровья населения г. Закаменска — территории длительного хранения отходов Джидинского вольфрамо-молибденового комбината // Hygiene sanitation (Russian Journal). 2017. № 96 (1). С. 15–20.
- Водяницкий Ю.Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М., 2008. 140 с.
- Гирусов Э.В., Бобылев С.Н., Новоселов А.Л. Экология и экономика природопользования. М.: ЮНИТИ, 1998. 455 с.
- Иванова О.А., Куклина Т.С. Экологические последствия добычи вольфрамовых руд (на примере Закаменского района республики Бурятия) // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология. Поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3. С. 95–101.
- Колотов Б.А., Соломин Г.А., Рубейкин В.З. и др. Гидрогеохимические процессы как основа взаимодействия геологических тел, подверженных антропогенезу, и окружающей среды (на примере сульфидных отвалов): Сб. научн. тр. «Прикладная геохимия». М.: ИМГРЭ, 2000. С. 70–97.
- Комаров М.А., Григорьев Н.П., Кимерман Ю.А. Эколого-экономический риск и оценка минерально-сырьевого потенциала // Разведка и охрана недр. 1995. № 8. С. 17–21.
- Комонов С.В., Комонова Е.Н. Ветровая эрозия и пылеподавление. Курс лекций. Красноярск: Изд-во СФУ, 2008. 192 с.
- Ломоносов И.С., Гребенищикова В.И., Брюханова Н.Н. и др. Распределение селена и фтора в компонентах окружающей среды Прибайкалья // Проблемы региональной экологии. 2008. С. 22–29.
- Май И.В., Клейн С.В., Вековичина С.А. и др. Гигиеническая оценка канцерогенного риска и онкологической заболеваемости населения, проживающего в зоне влияния мест складирования отходов горнорудного комбината. ЗНИСО // Коммунальная гигиена. 2018. № 5 (302). С. 40–49.
- Максимова А.М. Организационно-экономический механизм извлечения редких и редкоземельных металлов из отходов горнодобывающих предприятий: Дисс. ... канд. экон. наук. М., 2018.
- Методические рекомендации к экологическому обоснованию проектов разведочных кондиций на минеральное сырье. М.: Минприрода, ГКЗ. 1995. 30 с.
- Минералого-геохимические критерии оценки экологической опасности горнопромышленных территорий. Методические рекомендации № 200. ФГБУ «ИМГРЭ». М., 2020. 53 с.
- Министерство природных ресурсов Республики Бурятия: государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия» [Электронный ресурс]. URL: http://www.minpriroda-rb.ru/activity/in-dex.php?SECTION_ID=921 (02.03.2016).
- Петрова А.И., Никулин. И.Б., Ле Бинь Зыонг и др. Моделирование эколого-экономических параметров природоохранной деятельности: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). М.: Горная книга, 2013. № 12. 60 с.
- Постановление Правительства Российской Федерации от 20 марта 2023 года № 437 «О применении в 2023 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду».
- Приказ от 9 марта 2021 г. № 18 «Об утверждении среднего уровня кадастровой стоимости земель по муниципальным районам (городским округам) Республики Бурятия».
- Росман Г.И. Экологическая оценка рудных месторождений. М.: Наука, 2000. 150 с.
- Самсонов А.А., Бурмистров А.А., Тельнов А.Е. Рудный потенциал природных и техногенных месторождений вольфрама района г. Закаменска (Республика Бурятия) в контексте перспектив его комплексного использования // Руды и металлы. 2024. № 1.
- Технико-экономическое обоснование разведочных кондиций для подсчета запасов Барун-Нарынского техногенного месторождения. ООО НИиПИ «ТОМС». Иркутск, 2011.
- Томаков П.И., Коваленко П.Л., Михайлов А.М. и др. Экология и охрана природы при открытых горных работах. М.: Изд-во МГГУ. 1994. 417 с.
- Ходанович П.Ю. Лежалые отходы обогащения Джидинского вольфрамо-молибденового комбината как комплексные техногенные месторождения // Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого и горнодобывающего комплексов Республики Бурятия. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. 165 с.
- natural-sciences.ru/Главная/article/view?id=37515
- rgnkc.ru/Платные услуги/Разделы платных услуг
- sравни.ru/dms/onkologiya/

Статья поступила в редакцию 14.12.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 551.351.553.55(477.75)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-65-74

НОВЫЕ ДАННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХОЛОДНЫХ СИПОВ И ПЛЯЖНЫХ БАКТЕРИАЛЬНЫХ ПОСТРОЕК В БУХТЕ ЛАСПИ (ЮЖНЫЙ БЕРЕГ КРЫМА)

Виталий Иванович Лысенко^{1✉}, Елена Николаевна Полудеткина²,
Сергей Ахматович Садыков³, Сара Ильдаровна Басырова⁴

¹ Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в г. Севастополь, Севастополь, Россия; niagara_sev@mail.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; poludetkinaelena@mail.ru

³ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия; sadykov@mineralogy.ru

⁴ Казанский федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казань, Россия; basyrova.sara@mail.ru

Аннотация. Флюиды сипов подводного берегового склона бухты Ласпи имеют в своем составе CH_4 , N_2 , O_2 , He , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8 и сопровождаются водными растворами. Образование пляжных бактериальных построек происходило за счет переработки углеводородных флюидов археями и бактериями. Их карбонатный цемент имеет легкий изотопный состав углерода ($-20,93$; $-20,83\%$). Строения пляжных бактериальных построек имеют все признаки генетического родства с карбонатами углеводородного просачивания. Различный внешний вид бактериальных строений бухты Ласпи с другими аутигенными образованиями холодных сипов объясняется физико-географическими условиями их формирования.

Ключевые слова: углеводородные флюиды, водные растворы, аутигенные карбонаты, карбонат углеводородного просачивания, метанолиты голоцена

Для цитирования: Лысенко В.И., Полудеткина Е.Н., Садыков С.А., Басырова С.И. Новые данные исследования холодных сипов и пляжных бактериальных построек в бухте Ласпи (южный берег Крыма) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 65–74.

NEW DATA ON COLD SEEPS AND BEACH BACTERIAL STRUCTURES STUDY IN LASPI BAY (SOUTHERN COAST OF CRIMEA)

Vitaliy I. Lysenko^{1✉}, Elena N. Poludetkina², Sergey A. Sadykov³, Sara I. Basyrova⁴

¹ Branch of Lomonosov Moscow State University in Sevastopol, Sevastopol, Russia; niagara_sev@mail.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; poludetkinaelena@mail.ru

³ FBSBI of Science South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Urals Branch of the RAS, Miass, Russia; sadykov@mineralogy.ru

⁴ Kazan Federal University, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies, Kazan, Russia; basyrova.sara@mail.ru

Abstract. Seep fluids of the underwater coastal slope of Laspi Bay are composed of CH_4 , N_2 , O_2 , He , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8 and are accompanied by aqueous solutions. The formation of beachfront bacterial build-ups occurred due to the processing of hydrocarbon fluids by Archaea and bacteria. Their carbonate cement has light isotopic carbon composition ($-20,93$; $-20,83\%$). The structures of beachfront bacterial build-ups have all the signs of genetic relation with carbonates of hydrocarbon seepage. The different appearance of the bacterial build-ups of Laspi Bay with other build-ups of cold seeps is explained by the physical and geographical conditions of their formation.

Keywords: hydrocarbon fluids, aqueous solutions, authigenic carbonates, hydrocarbon seeps carbonates, Holocene methanolites

For citation: Lysenko V.I., Poludetkina E.N., Sadykov S.A., Basyrova S.I. New data on cold seeps and beach bacterial structures study in Laspi Bay (Southern coast of Crimea). *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 65–74. (In Russ.).

Введение. В наши дни мировое сообщество обеспокоено проблемами изменения климата, таяния ледников и повышением уровня Мирового океана. Эти процессы связаны с парниковым эффектом увеличения в атмосфере углекислого газа и метана.

Часть ученых объясняет эти изменения в атмосфере воздействием антропогенной деятельности человечества, другие — поступлением холодных и горячих флюидов из недр [Сывороткин, 2002]. Их выводы о геологическом воздействии под-

тверждаются изотопным составом углерода метана [Dimitrov, 2002]. Поступление газов холодной дегазации сложно проследить на суше, но их можно исследовать в сипах и грязевых вулканах на дне морей и океанов. В настоящее время флюидная разгрузка известна во всех морях и океанах от экватора до полярных широт [Aharon, 1994; Birgel, et al., 2011].

В прибрежной зоне Крыма известно 15 площадок с пузырьковыми выходами газов, у которых они доходят до поверхности [Лысенко, Шик, 2013; Тихо-

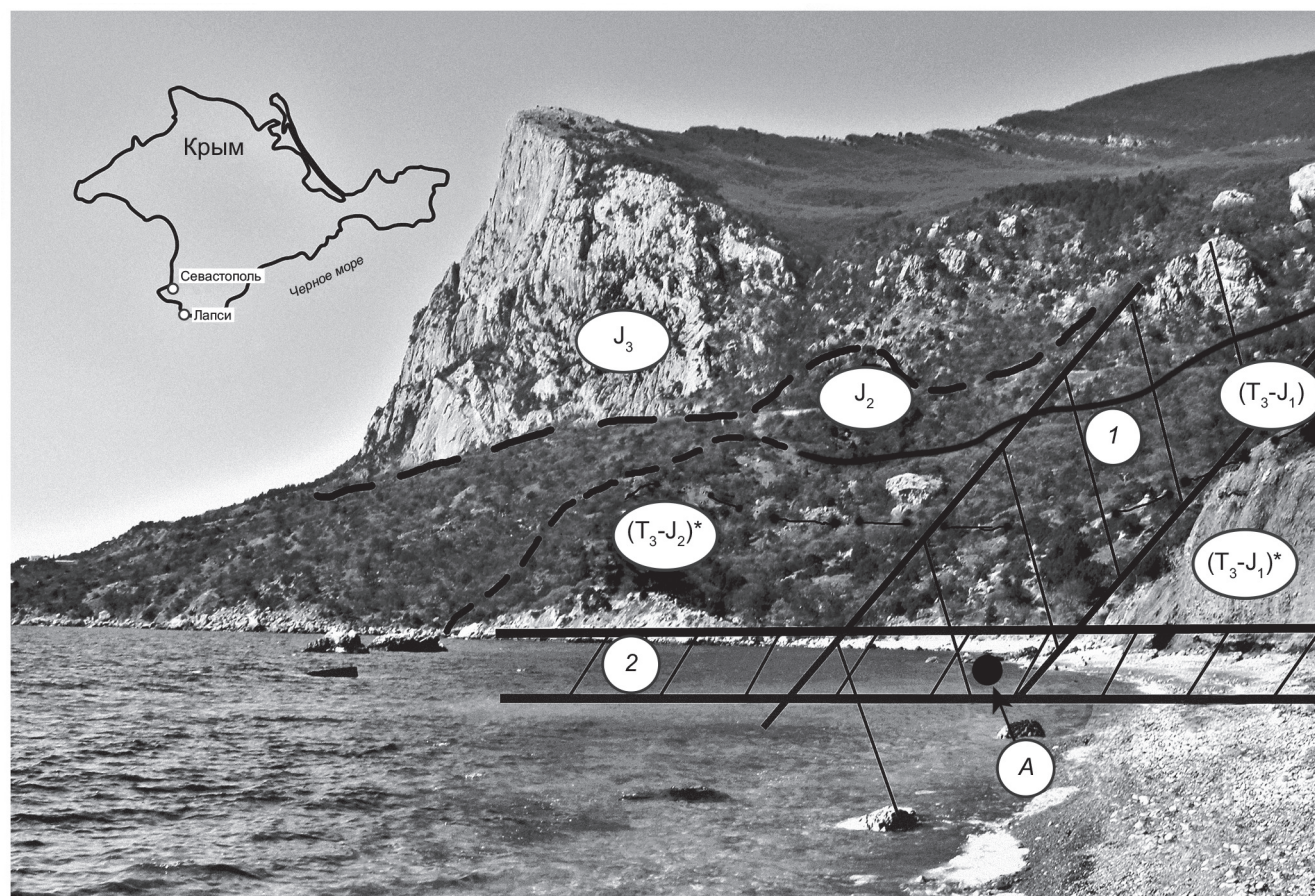


Рис. 1. Схема геологического строения бухты Ласпи. Условные обозначения: $(T_3-J_1)^*$ — аргиллиты, алевролиты с прослоями песчаников; (T_3-J_1) — аргиллиты с прослоями алевролитов и песчаников с биографами; J_2 — песчаники и алевролиты; J_3 — мраморо-видные органогенные известняки; 1 — Ласпинский разлом, 2 — Береговой разлом; А — места выходов газовых сипов

нова и др., 2020], и газ поступает сразу в атмосферу. Исследование этих процессов является актуальным для познания влияния дегазации на парниковый эффект.

Наиболее интересными объектами в прибрежной зоне являются выходы газа в бухте Ласпи, обнаруженные Н.В. Шиком в 2004 году. За последний период появились новые данные состава газов и $\delta^{13}C$ аутигенных карбонатов бухты Ласпи. Эти результаты подтвердили предположения, сделанные в ранних статьях В.И. Лысенко, о флюидах и условиях образования «пляжных» бактериальных построек [Лысенко, Шик, 2013].

Целью работы является изучение связей геологических и биологических процессов при формировании бактериальных карбонатных «пляжных» построек в бухте Ласпи.

Геологическое строение района исследования. Пляжная зона бухты Ласпи, где обнаружены многочисленные выходы газа, находится в пределах ядра Ласпинской антиклинали, сложенной алевролитами и аргиллитами верхнего триаса и нижней юры (породы таврической серии) [Муратов, 1960]. Большинство пород толщи имеют СВ и СЗ падение под углом $40-60^\circ$. Меридиональный и диагональный разломы усложняют строение антиклинали и делят ее на систему блоковых пластин (рис. 1). Ласпинский

глубинный разлом имеет меридиональную ориентировку. Нарушение разделяет прибрежный склон на две части. Береговая линия Ласпинской бухты контролируется Береговым нарушением северо-западного простирания [Лысенко, Шик, 2013]. В зоне пересечения этих разломов находится участок с выходами пузырькового газа (рис. 1). Он расположен на расстоянии от 10 до 60 м от уреза воды современной береговой линии на глубинах от 1,5 до 3,0 м. Струйные пузырьковые выходы газа находятся на трех скальных грядах (северная, центральная и южная), ориентированных параллельно береговой линии. Образование этих гряд на абразионной поверхности подводного берегового склона связано с деятельностью сообществ бактерий и архей, поэтому они получили названия пляжных бактериальных построек бухты Ласпи [Лысенко, Шик, 2013]. Эти строения имеют форму куэст протяженностью от 20 до 40 м. Их верхние части, в отличие от рыхлых отложений дна, покрыты водорослями, мшанками, раковинами серпулид, спиробусов и моллюсков. В некоторых местах на поверхности построек отмечаются налеты коричневато-оранжевой и розовато-оранжевой бактериальной слизи.

Образцы, отобранные из разных частей пляжных бактериальных построек, состоят из гальки юрских известняков, которая цементирована карбо-

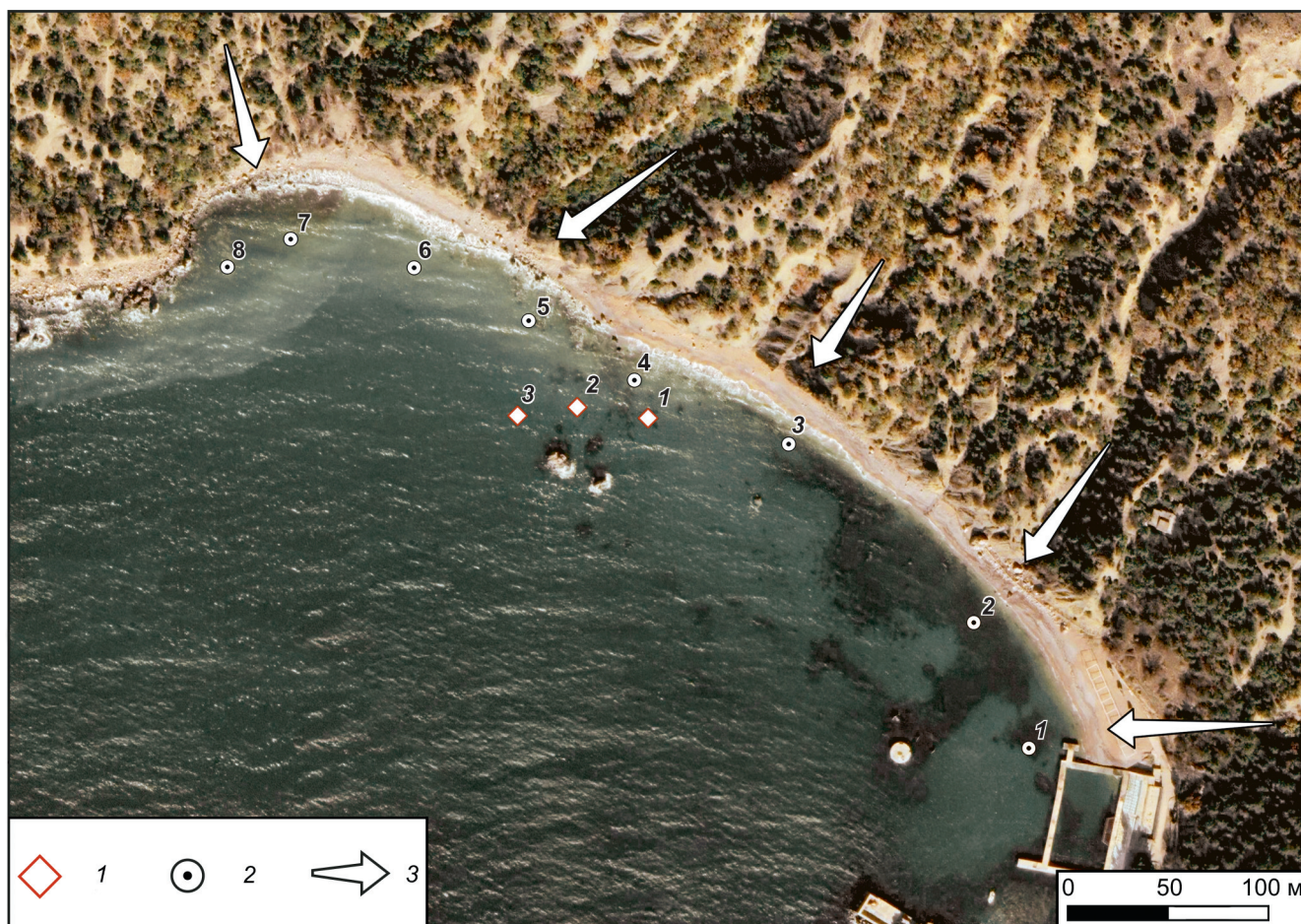


Рис. 2. Схема мест отбора проб газа и воды в бухте Ласпи. 1 — сипы, в которых проводились замеры объемов газа и солености воды (Т.Н.1, 2, 3), из точки Т.Н.2 флюид анализировался на состав газов; 2 — точки опробования на соленость воды (Т.Н.Б); 3 — направление движения поверхностных стоков оврагов

натным пленочным цементом. В цементном материале встречаются сферолиты и пластинчатые лейсты белого арагонита [Лысенко, Шик, 2013]. Шарики сферолитов сложены сноповидными волосками, выходящими из одной точки. Похожие образования встречаются в современных и древних аутигенных постройках на дне морей и океанов. В иностранных статьях они получили название ботриоиды или узелковая масса [Aharon, 1994; Campbell, 2006; Birgel et al., 2011]. На поверхности галечного материала и карбонатного цемента встречаются микроточки сульфидов железа и черного органического вещества.

Конгломерат построек имеет слабовыраженную слоистость, повышенную пористость и содержит большое количество целых створок двухстворчатых моллюсков и трубок серпулид. В целом конгломератовая постройка сложена довольно крепким материалом, что было установлено при отборе проб.

За период с 2004 по 2023 гг. наблюдалось в разные временные периоды от 8 до 20 точек выхода газа. Обычно места дегазации представлены округлыми отверстиями диаметром 2,0–4,0 мм [Лысенко, Шик, 2013]. Внутри некоторых каналов отмечаются кружки валиков белой бактериальной слизи. Отдельные выходы находятся на поверхности песка, где струйки газа образуют углубления в виде микрократеров.

При раскопках таких выходов было установлено, что газ поступает из скальных пород постройки.

Кроме пузырькового выделения флюидов, в конгломератовом материале построек и перекрывающем их песке, присутствует диффузный газ. Это было установлено при отборе образцов с построек и при проведении раскопок сипов от песка.

Методика исследований. Приборные измерения объемов выбросов газа были выполнены в 2013, 2019, 2021 и 2022 гг. Отбор проб для определения объема осуществлялся с помощью химического мерного цилиндра объемом 500 мл. Цена деления составляла 1,0 мл. Цилиндр крепился вертикально к железной треноге. Центр отверстия мерного цилиндра устанавливался на расстоянии 2–3 см от поверхности дна над выходом газов. Замеры объемов газа производились за временной период от 10 до 15 минут. При проведении опытов осуществлялся температурный контроль. Объем часовых и суточных выбросов газа был выполнен расчетным методом. Для замеров были выбраны точки, где потоки пузырьковых газов были постоянными за период наблюдения (рис. 2).

Отбор флюидов на определение состава газов производился из сипа, расположенного в центре срединной зоны (рис. 2). Для этой цели было скон-

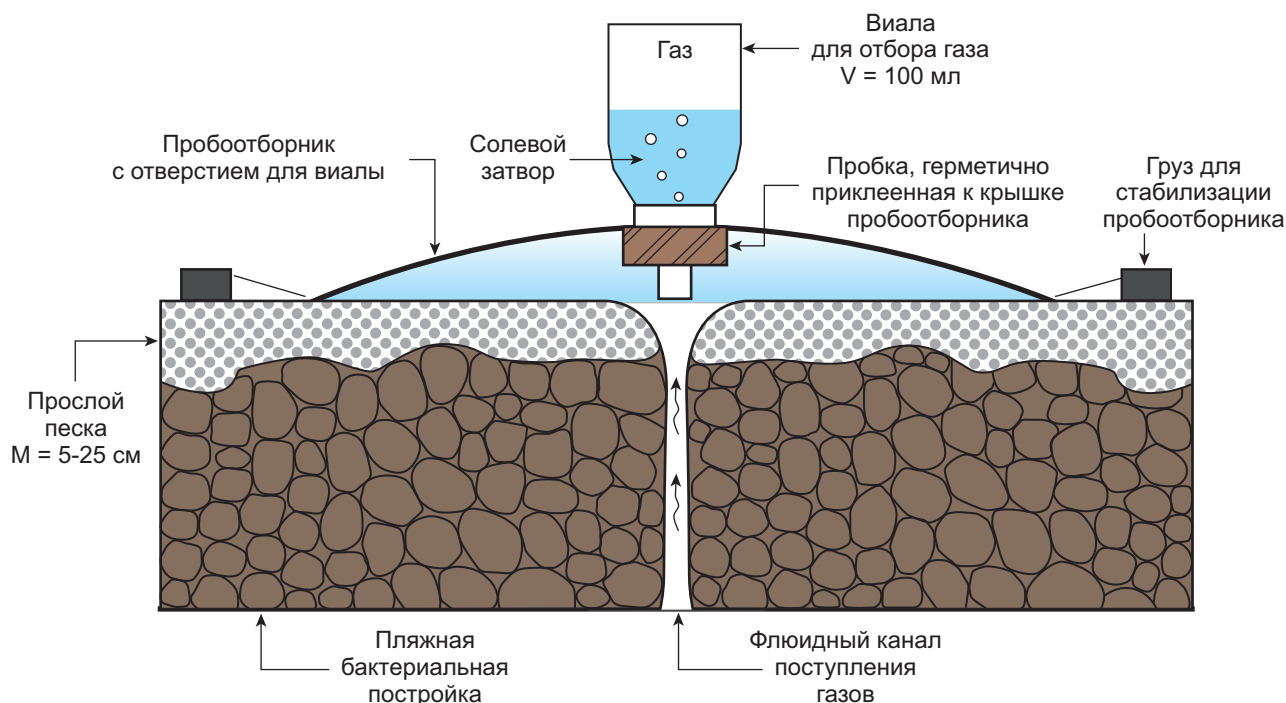


Рис. 3. Схема отбора проб газа

струировано специальное оборудование, которое позволяло отобрать газ в 2,0 см от его выхода (рис. 3). Фармацевтический флакон объемом 100 мл вкручивался в пробку конструкции. Время заполнения пузырька составляло 10–15 минут. После его заполнения газом пузырек свинчивался с оборудования и сразу затыкался пробкой и закручивался крышкой. Все операции выполнялись под водой. Всего было отобрано на анализы пять проб.

Определение состава газов выполнено в лаборатории МГУ имени М.В. Ломоносова на газовых хроматографах «Хроматэк-Кристалл 5000», оснащенных пламенно-ионизационными (ПИД) детекторами и детектором по теплопроводности (ДТП). На хроматограммах осуществлялась идентификация пиков насыщенных углеводородов (УВ) — CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} , C_6H_{14} , и ненасыщенных (непредельных) — C_2H_4 , C_3H_6 , C_4H_8 . Дополнительно определялись содержания CO_2 , N_2 , O_2 , H_2 и He. Контроль измерений осуществлялся двукратным повторением ввода пробы. Погрешность измерения достигает 1–2 ppm для УВ и не-УВ газов, предел измерения — 1–2 ppm для УВ и 5 ppm для не-УВ газов. Расчет содержаний газовых компонентов выполнялся по стандартным концентрациям аттестованных газовых смесей с разными концентрациями УВ и не-УВ соединений (производство «Мониторинг», г. Санкт-Петербург).

Исследования по замерам pH проводились на дне бухты у центров выходов газа и на удалении от сипов. Измерения выполнялись прибором Inolab pH/ION Level-2 (Германия).

Исследование по присутствию во флюидах водных растворов производилось над выходами газов. Вода для анализов отбиралась в 0,5 л бутылки

у самого дна. В разные дни над сипом центральной бактериальной постройки было отобрано 15 проб. По пробе было взято над выходами сипов в южной и северной гряде. Для сравнения была выполнена гидрохимическая съемка дна прибрежной части бухты Ласпи. Особое внимание при опробовании уделялось выходам у берега овражной сети (рис. 3). Дополнительно отбирались пробы воды на расстоянии 0,5 и 1,0 м от пузырьковых выходов газа.

Пробы воды анализировались на содержание сухого остатка в лаборатории Филиала МГУ в Севастополе. Вода фильтровалась с помощью мембранного фильтра Д-45. Для анализов отбиралось 100 мл воды. Вода выпаривалась в сушильном шкафу при температуре 80°C . Остывание стакана происходило в эксикаторе в течение 90–100 минут. Стакан с сухим остатком взвешивался на весах SCAL TEC-SBC-45. Ошибка измерения составляет 0,001 г. По массе сухого остатка вычислялась соленость.

Определения изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ были выполнены в лабораториях ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс и КФУ ИГиНТ, г. Казань. Исследование осуществлялось масс-спектрометрическим методом измерения изотопных отношений (IRMS) на приборе Deltaplus Advantage. Масс-спектрометр сопряжен с элементным анализатором EA Flash1112 и высокотемпературным конвектором TC/EA. Элементный анализатор и конвектор сопрягались с масс-спектрометром посредством ConFloIII. При измерении использовались стандарты NBS-19, NBS-18, IAEA-C-3. Ошибка измерения составляла меньше 0,15‰ VPDB. Всего было проанализировано шесть проб.

Результаты. Результаты исследования флюидов. При визуальных наблюдениях было установлено,

что поступление газа имеет импульсный периодический характер. Объемы выбросов в центральных и периферийных частях построек различны. Из-за непостоянства выбросов, сложно посчитать все точки с выходами пузырькового газа. За период наблюдения установлен факт увеличения объемов выбросов газа в периоды новолуний и полнолуний.

Результаты замеров объемов выбросов газа в течение нескольких лет приведены в табл. 1. Имеются различия в объемах поступления газа из сипов, расположенных на разных постройках (табл. 1). Струи с высоким дебитом приурочены к центральному гребню (рис. 3). Самые низкие объемы выбросов газа характерны для сипов северной постройки. По результатам визуальных наблюдений установлено, что интенсивность и объемы выделения газа изменяются в течение суток и года (табл. 1).

Результаты анализов состава газов флюидов приведены в табл. 2. Кроме углеводородных газов, во флюидах были обнаружены кислород, азот, углекислый газ и гелий. Присутствие сернистых газов было установлено органолептическим методом.

Попутно с взятием газа для опробования, были выполнены замеры щелочности над выходом сипа центральной гряды. Она изменялась от 7,1 до 7,4. В то же время уровень pH морской воды в бухте Ласпи у поверхности и дна находился в интервале 8,2–8,4.

При проведении гидрохимической съемки дна бухты Ласпи были получены данные о присутствии во флюидах водных растворов с невысокой минерализацией (табл. 3). Отбор воды производился из устьев выходов газа в моменты выбросов пузырьков. Всего было взято 14 проб над сипом из центральной зоны и по одной из северной и южной построек. Со-

держание солей в них изменялось от 9,5 до 16,7 г/л. Пробы воды, отобранные к югу и северу от центра выходов газа на расстоянии 0,5 и 1 м, имели соленость 18,6–18,8 г/л. Подобные содержания солей характерны для воды, взятой на дне бухты в продолжение поверхностного стока овражной сети. У этих семи проб показатель солености изменялся от 18,5 до 18,8 г/л (табл. 3).

Изотопный состав карбонатов из бактериальных построек. Результаты анализов $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ аутигенного кальцита цемента, терригенного материала постройки, ракушек мителястеров и серпулид приведены в табл. 4.

По данным анализов карбонатного цемента, выполненных в двух лабораториях, значения содержания $\delta^{13}\text{C}$ в пробах составляет -20,93‰ и -20,83‰. Результаты проб терригенного материала постройки, выполненные в двух различных лабораториях, различаются между собой. Изотопный состав углерода в пробе, которая анализировалась в ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, имеет значение -7,60‰, а в КФУ ИГиНТ этот материал характеризуется значением -3,36‰. Облегченный состав $\delta^{13}\text{C}$ был выявлен у раковин мителястеров (-9,96‰) и серпулид (-3,58‰) (табл. 4).

Изотопный состав кислорода в аутигенных карбонатах составлял -2,47 и -2,20‰, а в терригенном материале цемента -2,18 и -2,08‰. Для карбоната раковин мителястеров $\delta^{18}\text{O}$ равен -0,65‰, изотопный состав кислорода в ракушках серпулид -2,25‰ (табл. 4).

Особенности флюидного состава холодных сипов бухты Ласпи. Замеры объемов выбросов газов показали, что поступление флюидов происходит крайне неравномерно (табл. 1). По замерам дебит сипов

Результаты замеров поступления газов из сипов бухты Ласпи (в мл)

Таблица 1

№	Дата отбора	Время отбора	Отбор в минутах	t°С	Точки отбора	V пробы	V газа / мин.	V газа / час	V газа / сутки
1	14.06.19	в 12 ⁰⁰	15	18,0	Т.Н. 2	129	8,6	516	12384
2	14.06.19	в 14 ⁰⁰	15	18,0	Т.Н. 2	134	8,9	535	12840
3	04.09.19	в 10 ⁰⁰	10	25,3	Т.Н. 2	145	14,5	870	20880
4	04.09.19	в 12 ⁰⁰	10	25,5	Т.Н. 2	159	15,9	954	22896
5	04.09.19	в 13 ⁰⁰	15	25,6	Т.Н. 1	119	7,9	474	11376
6	04.09.19	в 14 ⁰⁰	10	25,8	Т.Н. 2	176	17,6	1056	25344
7	15.08.21	в 10 ⁰⁰	10	26,3	Т.Н. 2	227	22,7	1362	32688
8	15.08.21	в 11 ⁰⁰	10	26,5	Т.Н. 2	254	25,4	1524	36574
9	15.08.21	в 11 ³⁰	15	26,5	Т.Н. 1	65	4,3	258	6192
10	15.08.21	в 13 ⁰⁰	10	26,8	Т.Н. 2	248	24,8	1488	35712
11	15.06.22	в 13 ⁰⁰	10	18,0	Т.Н. 3	26	2,6	156	3744
12	15.06.22	в 14 ⁰⁰	10	18,1	Т.Н. 2	164	16,4	984	23616
13	15.06.22	в 15 ⁰⁰	10	18,1	Т.Н. 2	305	30,5	1827	43869
14	20.08.22	в 11 ³⁰	15	27,3	Т.Н. 1	97,5	6,5	390	9360
15	20.08.22	в 12 ⁰⁰	10	27,3	Т.Н. 2	3765	37,6	2259	54235
16	20.08.22	в 13 ⁰⁰	10	27,4	Т.Н. 2	217	21,7	1302	31248
17	20.08.22	в 15 ⁰⁰	10	27,4	Т.Н. 2	366	36,6	2195	52678
18	20.08.22	в 12 ⁰⁰	10	27,3	Т.Н. 3	88	8,8	528	12672

изменялся в течение дня почти в два раза, а незначительные изменения температуры воды в это время не влияли на объемы его выбросов (табл. 1). Наиболее значительные объемы выбросов наблюдались у сипа, расположенного на центральной постройке. Дебит изменялся от 8,6 до 37,6 мл/мин (12,3–54,4 л/сут). Для сипов южной и северной построек скорости выходов газов менялись от 2,6 до 8,8 мл/мин. При анализе выбросов флюидов за разные года, можно сделать предположение, что их поступления с каждым годом увеличиваются (табл. 1). За время наблюдения поступление пузырьков газа происходило спокойно, но их объемы могут возрасти в периоды сейсмической активности [Обжиров и др., 2013].

Наши результаты по объемам выбросов газов почти не отличаются от результатов исследователей, которые были получены с помощью подводной видеозаписи и пассивного акустического метода. По их данным скорости выбросов газа в одной точке изменялись от 23,0 до 48,5 л/сут [Будников и др., 2019]. В летний сезон они зафиксировали изменение объемов выбросов от 9,3 до 63,0 л/сут в течение двух часов [Будников и др., 2019].

Непостоянные объемы выбросов газов в бухте Ласпи характеризуются и различным газовым составом флюидов. Флюиды бухты Ласпи имеют многокомпонентный газовый состав. Он по данным опробования непостоянный даже в течение нескольких часов (табл. 2). В пробах преобладают углеводородные газы, которые представлены в основном метаном. Его концентрации изменяются от 55,7 до 60,4%. Содержание этилена в анализах проб составляло от 0,96 до 1,03%, а пропана от 0,002 до 0,039%. Общая концентрация других углеводородов не превышает 0,01% (табл. 2).

Кроме углеводородных газов во флюидах присутствует азот (9,62–23,61%), кислород (4,76–8,96%), углекислый газ (0,23 до 0,34%) и гелий (0,43–1,19%) (табл. 2). Содержания газов во флюиде в какой-то мере контролируются соотношением их молекулярных весов. Чем молекулярный вес выше, тем ниже содержание этого газа в растворе. Можно выделить два ряда таких соотношений. Первый ряд можно представить в следующем виде [(молекулярный вес) формула соединения (содержания в %)]:

[(16) CH₄(55,7–60,4)]; [(28) N₂(9,6–23,6)]; [(32) O₂(4,8–8,9)]; [(44) CO₂(0,236–0,341)].

Второй ряд включает инертные газы и тяжелые углеводороды и представлен:

[(4) He(0,43–1,19)]; [(28) C₂H₄(0,97–1,03)]; [(44) C₃H₈(0,0019–0,0023)]; [(58) C₄H₁₀(0,0004–0,0005)]; [(72) C₅H₁₂(0,00017–0,00037)].

По составу флюиды бухты Ласпи имеют сходство с газами источника Аджи-Су (Черные воды), который расположен в зоне Севастопольско-Ульяновского разлома глубинного заложения в породах таврической серии [Альбов, Самулева, 1970]. Вместе с водой из источника поступает газ в объеме около 1,5 л/сут. В состав флюидов входят CH₄ — 23%, тяжелые углеводороды — 0,91%, CO₂ — 0,4%, H₂S — 0,1%,

Таблица 2

Состав углеводородных и неуглеводородных газов флюидов холодных сипов бухты Ласпи

№ пробы	Ед.изм.	Пр. 1	Пр. 3	Пр. 4	Пр. 5
CH ₄	%	60,45	55,74	59,39	58,27
C ₂ H ₄	%	1,04	0,97	1,01	0,98
C ₂ H ₆	x10 ⁻⁶	0,82	2,36	2,07	4,32
C ₃ H ₈	%	0,0023	0,0019	0,002	0,0023
C ₃ H ₆	x10 ⁻⁶	2,5	5,3	5,1	4,7
C ₄ H ₁₀	x10 ⁻⁶	62,4	57	59,2	62,5
iC ₄ H ₁₀	x10 ⁻⁶	520	401	418	494
nC ₅ H ₁₂	x10 ⁻⁶	3	2,6	2,2	3,1
iC ₅ H ₁₂	x10 ⁻⁶	38,4	33,6	34,2	40,6
neo- C ₅ H ₁₂	x10 ⁻⁶	192	171	183	578
N ₂	%	23,61	19,07	9,62	16,82
O ₂	%	8,96	7,32	4,76	7,56
CO ₂	%	0,34	0,24	0,26	0,25
He	%	1,01	0,62	0,43	1,19

O₂ — 1,8%, N₂ — 72%, кроме этого в нем отмечается He, Ne, Ar и Xe [Альбов, Самулева, 1970]. Возможно, флюиды бухты Ласпи не всегда сохраняют такой состав. Он может меняться во времени, что косвенно подтверждает результаты многолетних наблюдений за газами грязевых вулканов суши [Шнюков и др., 2013].

Наличие во флюидах бухты Ласпи CO₂, CH₄, N₂ и He, по предположению некоторых исследователей, указывает на их связь с глубинными процессами. Похожий набор газов имеют холодные сипы и грязевых вулканов [Шнюков и др., 2013]. Аналогичное разнообразие газов во флюидах было выявлено при изучении газовых включений в гераклитах, кварцевых и кальцитовых жилах Крыма и ряда месторождений [Гаськов и др., 2006; Шнюков и др., 2013]. При их изучении была установлена связь с магматическими очагами гипабиссального уровня, которые генерируют парогазовую смесь H₂O, CO₂, N₂, H₂S и CH₄ [Гаськов и др., 2006]. Похожий состав газов бухты Ласпи указывает на их связь с глубинными процессами. Вероятно, часть углеводородов Ласпи имеют термогенную природу за счет генерации их в недрах осадочно-породного чехла, на это указывают данные изотопов углерода метана (-35,22‰) [Малахова и др., 2015].

Неожиданным фактом для авторов исследования было присутствие в составе флюида бухты Ласпи высоких содержаний кислорода. Подобное наблюдается в минеральном источнике Аджи-Су [Альбов, Самулева, 1970]. Для обоснования генезиса кислорода в смеси газа в районе исследования необходимы дополнительные исследования.

Следует отметить, что флюиды бухты Ласпи по разнообразию газов имеют некоторое сходство и отличие от холодных сипов Черного моря и грязевых вулканов [Леин, 2005; Шнюков и др., 2013]. По

Таблица 3

Результаты гидрохимического опробования бухты Ласпи

№	Дата отбора	№ пробы	Время отбора	Точки отбора	Сумма солей, г/л
1	18.09.22	1-А	11 ⁰⁰	Т.Н. 2	12,9
2	18.09.22	2-А	12 ⁰⁰	к Ю на 0,5 м от Т.Н. 2	18,6
3	18.09.22	3-А	12 ³⁰	Т.Н.Б. 2	18,7
4	18.09.22	4-А	13 ⁰⁰	Т.Н. 2	16,7
5	18.09.22	5-А	13 ³⁰	Т.Н.Б. 3	18,8
6	18.09.22	6-А	14 ⁰⁰	Т.Н. 2	9,7
7	18.09.22	7-А	14 ³⁰	Т.Н.Б. 3	18,8
8	18.09.22	8-А	15 ⁰⁰	к Ю на 1,0 м от Т.Н. 2	18,7
9	18.09.22	9-А	15 ³⁰	Т.Н. 2	13,2
10	18.09.22	10-А	16 ⁰⁰	Т.Н.Б. 5	18,7
11	18.09.22	11-А	16 ³⁰	Т.Н.Б. 7	18,8
12	21.09.22	12-А	10 ⁰⁰	Т.Н. 2	9,2
13	21.09.22	13-А	10 ³⁰	к Ю на 1,0 м от Т.Н. 2	18,8
14	21.09.22	14-А	11 ⁰⁰	Т.Н. 2	14,7
15	21.09.22	15-А	12 ⁰⁰	Т.Н. 2	12,3
16	21.09.22	16-А	12 ¹⁰	Т.Н.Б. 8	18,7
17	21.09.22	17-А	12 ¹⁵	Т.Н.Б. 6	18,7
18	21.09.22	18-А	12 ²⁰	Т.Н.Б. 7	18,8
19	21.09.22	19-А	12 ³⁰	Т.Н.Б. 5	18,6
20	21.09.22	20-А	12 ⁴⁰	Т.Н.Б. 1	18,7
21	21.09.22	21-А	12 ⁵⁰	Т.Н.Б. 4	18,8
11	21.09.22	11-А	13 ⁰⁰	Т.Н. 3	15,2
12	21.09.22	12-А	13 ³⁰	к Ю на 0,5 м от Т.Н. 3	18,6
13	21.09.22	13-А	14 ⁰⁰	Т.Н. 2	9,8
10	02.10.22	1	10 ²⁰	Т.Н. 2	16,5
11	02.10.22	2	10 ⁴⁰	Т.Н. 2	14,7
12	02.10.22	3	11 ³⁰	Т.Н. 2	6,8
13	02.10.22	4	12 ⁰⁰	Т.Н.Б. 5	18,8
14	02.10.22	5	12 ¹⁰	Т.Н.Б. 3	18,6
15	02.10.22	6	12 ⁰⁰	Т.Н. 2	16,5
16	02.10.22	7	12 ²⁵	к Ю на 0,5 м от Т.Н. 2	18,7
17	02.10.22	8	12 ⁴⁵	к Ю на 1,0 м от Т.Н. 2	18,8
18	02.10.22	9	13 ⁰⁰	Т.Н. 2	9,5
19	02.10.22	10	13 ³⁰	Т.Н. 1	14,3
20	02.10.22	11	14 ⁰⁰	к Ю на 1,0 м от Т.Н. 3	18,7
21	02.10.22	11	13 ⁰⁰	Т.Н. 2	12,5

данным опробования факелов сипов Днепровского каньона в состав флюидов входили следующие газы: метан (94,9–99,0%), азот (0,17–5,10%), углекислый газ (0,00–0,90%) и водород (0,00–0,25%) [Леин, 2005].

По данным гидрохимической съемки дна бухты Ласпи было установлено, что соленость морской воды изменяется в интервале от 18,5 до 18,8‰ (табл. 3), что характерно для прибрежной части Черного моря. Нет значительных различий солености в центральной части и береговой зоне, на которую опираются выходы оврагов. Подобные результаты

были получены исследователями с помощью зонда RCM 9 LW AANDERAA INSTRUMENTS (Норвегия), который был установлен на высоте полметра от дна над выходом сипа. По этим замерам содержание солей в воде в течение суток изменялось всего от 18,26 до 18,34‰ [Будников и др., 2019]. Совсем другие результаты показали пробы воды, взятые из устьев сипов во время выбросов газа. В них соленость изменялась от 9,5 до 16,7‰ (табл. 3). Пробы отбирались в разные дни через один час. Распределение содержаний в них солей, возможно, связано с импульсным периодическим поступлением опресненных растворов. Объемы их выбросов незначительны, что доказывают данные проб, взятых на расстоянии 0,5 и 1,0 м от центра выходов газа (табл. 3).

Водные растворы сипов бухты Ласпи взаимосвязаны с газовыми флюидами и имеют общую импульсную природу выбросов и единый генезис образования. По объемам выбросов и минерализации растворы из сипов бухты Ласпи имеют много общего с сопочными водами грязевых вулканов Керченского полуострова. Вода из них характеризуется содержанием солей от 3,8 до 12,4‰, а незначительные объемы выбросов растворов из грифонов высыхают на солнце [Шнюков и др., 2013].

Результаты наших исследований подтвердили первичное предположение о том, что флюидные потоки в бухте Ласпи имеют глубинную природу образования [Лысенко, Шик, 2013]. На это указывают следующие признаки: приуроченность их выходов к зоне пересечения разломов; периодичность и пульсирующий характер извержений; непостоянство объемов выбросов и состава газов; присутствие CH_4 , N_2 , He , CO_2 и тяжелых углеводородных газов; изотопный состав углерода; наличие водных растворов и содержания Ni, Co, Zn, Cu Mn и V в карбонате построек [Лысенко, Шик, 2015].

Особенности бактериальных пляжных построек бухты Ласпи. Бухта Ласпи является природным ландшафтным памятником побережья Южного берега Крыма. Наиболее интересными и уникальными объектами в ней являются гряды пляжных бактериальных построек. Они имеют довольно оригинальную форму, чем отличаются от трубовидных или плоских построек Черного моря [Шнюков и др., 2013].

В настоящее время не все исследователи признают, что выходы газа в бухте Ласпи приурочены к бактериальным постройкам. Некоторые считают, что многочисленные струйки газа выходят из дырчатых образований «скальных выходов», которые им не удалось опробовать [Малахова и др., 2015]. В прибрежной части бухты много крупных глыб юрских мраморовидных известняков, которые слагают скальные обрывы ласпинского амфитеатра. Но в коренных обнажениях склонов отсутствуют выходы конгломератов, подобные пляжным постройкам. Как было сказано выше, создание «скальных выходов» конгломератов связано с современными процессами

образования карбонатного цемента сообществом архей и бактерий. Существование микроорганизмов по переработке метана было предсказано в наших первых работах [Лысенко, Шик, 2013]. В настоящее время в песчаных отложениях рядом с постройками выявлены сероокисляющие эпсилон-протеобактерии семейства *Thiovulaceae*, *Desulfobacteraceae* и консорциумом ANME-2 архей, а также аэробные метанотрофы *Methylococcales*, *Methylobacter*, *Methylomonas* и *Methylicorpusculum*. Последний вид бактерий встречается в осадках пресных водоемов [Тихонова и др., 2020]. Одновременное существование аэробных, анаэробных и пресноводных условий для сообществ микроорганизмов возможно только во внутренней части постройки или у выходов флюидов, которые содержат сернистые газы, кислород и опресненные воды.

В то же время исследователи Института биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН (ИнБЮМ) не обнаружили каких-либо признаков развития микроорганизмов (микробные пленки, нити, обрастания и т.д.), подобных тем, которые описаны в работе Лысенко и Шика [Малахова и др., 2015]. В своих работах исследователи ИнБЮМ дают характеристику находкам бактериальных матов «хлопковидных выделений белого цвета», которые они выявили в Херсонеской, Голубой и Мраморной бухтах [Малахова и др., 2015; Тихонова и др., 2020]. Похожие выделения они искали в бухте Ласпи, но не нашли. Белый налет слизи, как отмечалось выше, встречается у выходов газа, но из-за незначительных размеров его трудно заметить.

Обрастания метанотрофных прокариот и архей не обладают белой окраской, что было установлено на трубчатых строениях, поднятых с больших глубин Черного моря. Наросты бактериального обрастания имели коричнево-черную, коричневатую-оранжевую, розовато-оранжевую и оранжевую окраску [Шнюков и др., 2004]. Подобную цветовую гамму имеют бактериальные маты на постройках бухты Ласпи.

Сообщества архей и бактерий в процессе жизнедеятельности образуют не только органическое вещество, но производят карбонатный материал и сульфиды. Их наличие видно на поверхности свежих сколов образцов построек. Черная органика сгорает в пламени горелки, а микроточки сульфидов окисляются на воздухе до гидроокислов железа. Подобная сульфидная минерализация описывается исследователями при характеристике современных и древних карбонатов просачивания углеводородов [Aharon, 1994; Birgel et al., 2010].

Дополнительным доказательством жизнедеятельности сообществ архей и бактерий являются замеры pH около выходов пузырьков газа. При проведении измерений они изменялись с 8,2–8,4 в морской воде до 7,1–7,4 над центром выхода газа. Повышение кислотности около выходов пузырьков газа связано с биохимическими реакциями по переработке метана сообществом прокариот, что установлено

при проведении опытов по жизнедеятельности прокариот [Birgel et al., 2010; Лысенко, 2019].

Данные изотопного состава углерода и кислорода часто являются материалом для расшифровки генезиса формирования карбоната в постройках. Результаты опробования кальцита цемента на $\delta^{13}\text{C}$ (–20,93; –20,83‰) свидетельствуют о том, что для его образования сообщества прокариот и архей использовали метан из флюидов сипов (табл. 4). Он характеризуется более тяжелым изотопным составом углерода, чем аутигенные карбонаты плит и трубчатых строений Черного моря (от –35 до –46‰) [Леин, 2005]. Это связано с разным генезисом метана, который использовался для переработки. Изотопная разница между $\delta^{13}\text{C}$ карбоната и метана Ласпи составляет –12,4 и –14,3‰, что примерно соответствует подобным результатам по Черному морю [Леин, 2005].

В пробах терригенного материала постройки наблюдаются некоторые различия в составе $\delta^{13}\text{C}$. Первый анализ характеризуется довольно тяжелым углеродом — 3,36‰, а второй более легким — 7,61‰. С чем связаны такие различия? В пробах присутствовал мелко песчаный материал верхнеюрских известняков, у которых изотопный состав углерода находился в интервале от +1,8 до +3,4‰ [Рудько и др., 2017]. Выделить из этих проб аутигенный материал не удалось, но результаты показали его присутствие.

Пляжные бактериальные постройки Ласпи покрыты растительностью, колониями моллюсков митилястеров, а также там встречаются болянусы, серпулиды и полихеты [Лысенко, Шик, 2013]. Симбиоз фауны с сообществом архей и бактерий подтверждают анализы изотопного состава створок митилястеров и раковин серпулид. Более легкий состав $\delta^{13}\text{C}$ характерен для митилястеров (–9,96‰), а более тяжелый у серпулид (–3,58‰) (табл. 4). Эти данные свидетельствуют об их связи с микромиром по использованию органики прокариот. Подтверждением такого симбиоза являются находки исследователями *Methyloprofundus*, у которых были установлены эндосимбиотические связи с мидиями [Тихонова и др., 2020].

Кислород является составной частью карбонатов, а его изотопный состав часто указывает на источник образования. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в составе карбонатного материала цемента построек изменяются от –2,47 до –2,08‰ (VPDB) (табл. 4). Эти данные сильно отличаются от изотопного состава воды в прибрежной зоне, у которой $\delta^{18}\text{O}$ изменяется от –32,3 до –32,8‰. Легкий состав имеет кислород сульфатов морской воды (от –15,5 до –20,0‰). Ближе всего к значениям $\delta^{18}\text{O}$ цемента построек подходят данные об иловых водах придонных осадков (от –0,5 до –3,2‰) [Леин, 2005]. В бухте Ласпи постройка находится на коренных породах таврической серии, где отсутствуют иловые и придонные воды. Поэтому можно предположить, что для создания построек

Таблица 4

Данные результатов изотопного состава углерода и кислорода карбонатного материала пляжной постройки бухты Ласпи

№	Номер пробы	Характеристика породы	$\delta^{13}\text{C}$ (VPDB), ‰	$\delta^{18}\text{O}$ (VPDB), ‰
1	Л-414 ¹	Аутигенный карбонат цемента	-20,83	-2,20
2	Л-4151	Терригенный материал, цементируемый аутигенным карбонатом	-3,36	-2,08
3	Л-412 ²	Створки ракушек митилястеров	-9,96	-0,65
4	Л-413 ²	Раковины серпулид	-3,58	-0,35
5	Л-414 ²	Аутигенный карбонат цемента	-20,92	-2,47
6	Л-4152	Терригенный материал, цементируемый аутигенным карбонатом	-7,60	-2,18

Примечание: анализы проб Л-414¹ были выполнены в лаборатории КФУ ИГиНТ г. Казани; пробы Л-414² были проанализированы в лаборатории ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН г. Миасс.

сообщества архей и бактерий используют кислород флюидов и водных растворов.

Результаты наших исследований подтвердили, что создание пляжных бактериальных построек связано с деятельностью сообществ бактерий и архей по переработке метана. На их участие в создании цемента указывают следующие признаки: повышенные содержания в карбонате фосфора и стронция; наличие черного органического вещества; сферолитовые образования карбонатов; микроточки сульфидов; присутствие метанотрофных бактерий и архей; изотопный состав аутигенных карбонатов и существование рядом биоценоза крупной фауны. По этим признакам пляжные бактериальные постройки бухты Ласпи не отличаются от современных и древних аутигенных карбонатных образований на дне морей и океанов [Aharon, 1994; Леин, 2005; Campbell, 2006]. У них разная внешняя форма, но генезис и материал для образования построек одинаковый. В научных статьях у разных исследователей эти образования имеют разные названия. В этом множестве наименований нет указаний

на генезис и состав исходного материала для их формирования. Карбонатный материал построек создан с участием прокариот и архей, поэтому эти образования нужно относить к группе микробиолитов [Burne, Moore, 1987]. Они созданы при переработке метана, поэтому такие карбонатные создания можно называть метанолитами. Их формирование в различных точках Земли происходило в течение значительного временного интервала. Поэтому, название метанолитов должно сопровождаться указанием их возраста. Пляжные бактериальные постройки бухты Ласпи по этой классификации называются метанолитами голоцена.

Закключение. В результате исследований процессов дегазации в бухте Ласпи впервые было установлено, что флюиды имеют многокомпонентный газовый состав с присутствием углеводородов и водных растворов. По всем признакам они имеют глубинный генезис, а объемы выбросов и состав флюидов контролируются тектоникой Горного Крыма.

Пляжные бактериальные постройки подводного берегового склона бухты Ласпи являются уникальными геолого-биологическими объектами в зоне соприкосновения и взаимодействия литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы. Их формирование происходило за счет переработки углеводородных флюидов археями и бактериями. Образование карбоната шло за счет переработки метана, что позволяет пляжные постройки Ласпи называть метанолитами голоцена.

В настоящее время доказаны существования связей между составом и объемом выбросов газов с тектонической активностью региона [Обжиров, 2013]. Современные поступления газов в бухте Ласпи имеют связь с сейсмическими процессами. В будущем систематические наблюдения за газовыми выходами в бухте Ласпи будут являться информацией об изменениях напряжений земной коры и о выбросах газов в атмосферу.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Н.В. Шик, заслуженному методисту ГБОУ ДО «Севастопольского центра туризма, краеведения, спорта и экскурсий», за оказанную помощь в отборе проб воды и газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Альбов С.В., Самулева В.И. Районирование и характеристика минеральных вод // Гидрогеология СССР. Т. 8. Крым. М.: Недра, 1970. С. 263–276.

Будников А.А., Иванова И.Н., Малахова Т.В., Кириллов Е.В. Измерение гидрологических параметров воды над метановым сипом в бухте Ласпи в течение непрерывных in situ экспериментов // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2019. № 3. Ст. № 193090 (7 с.).

Гаськов И.В., Симонов В.А., Ковязин С.В. Эволюция физико-химических параметров и геохимических особенностей магматических расплавов в процессе развития колчеданных рудно-магматических систем Рудного

Алтая и Тувы // Геология и геофизика. 2006. Т. 47 (12). С. 1360–1370.

Егоров В.Н., Артемов С.Б., Гулин С.Б. Метановые сипы в Черном море средообразующая и экологическая роль. Севастополь.: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. 345 с.

Леин А.Ю. Потоки метана из холодных метановых сипов Черного и Норвежского морей: количественные оценки // Геохимия. 2005. № 4. С. 438–453.

Лысенко В.И., Шик Н.В. Современные процессы образования карбонатов, связанные с углеводородной дегазацией, в бухте Ласпи (Южный берег Крыма) // Пространство и Время. 2013. Т. 2, № 12. С. 151–157.

Лысенко В.И. Экспериментальные работы по возрождению к жизни сообществ архей и бактерий миоцена из гераклитов. // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского — природного заповедника РАН. 2019. Т. 11, № 3. С. 17–41.

Малахова Т.В., Канапацкий Т.А., Егоров В.Н. и др. Микробные процессы и генезис струйных газовыделений прибрежных районов Крымского полуострова // Микробиология. 2015. Т. 84, № 6. С. 743–752.

Муратов М.В. Краткий очерк геологического строения Крымского полуострова. М.: ГМТИ геологии и охраны недр, 1960. 208 с.

Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: ООО «Геоинформцентр», 2002. 250 с.

Тихонова Е.Н., Тарновецкий И.Ю., Малахова Т.В. и др. Идентификация аэробных метанооксиляющих бактерий в прибрежных осадках Крымского полуострова // Микробиология. 2020. Т. 89, № 6. С. 737–747.

Обжиров А.И. Увеличение газовой составляющей при сейсмо-тектонической активизации и участие газа в возникновении землетрясений (Охотское море) // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32, № 2. С. 86–89.

Рудько С.В., Кузнецов А.Б., Покровский Б.Г. Sr-хемостратиграфия, $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ отложений Крымской карбо-

натной платформы (поздняя юра, северный Перететис) // Литология и полезные ископаемые. 2017. № 6. С. 58–77.

Шнюков Е.Ф., Леин А.Ю., Егоров В.Н. и др. Обнаружение в Черном море глубоководных карбонатных построек биогенного происхождения // ДАН Украины. 2004. № 1. С. 118–122.

Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Пасынков А.А. Газовый вулканизм Черного моря. Киев: Логос, 2013. 383 с.

Aharon P. Geology and biology of modern and ancient submarine Hydrocarbon seeps and vents: an introduction // Geo-Marine Letters. 1994. Vol. 14 (2). P. 69–73.

Birgel D., Feng D., Roberts H.H., et al. Changing redox conditions at cold seeps as revealed by authigenic carbonates from Alaminos Canyon, northern Gulf of Mexico // Chem Geol. 2011. Vol. 285. P. 82–96.

Burne R.V., Moore L.S. Mikrobiolites: Organosedimentary Deposits of Benthic Microbial Communities // Palaios. 1987. Vol. 3. P. 241–254.

Campbell K.A. Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: Past developments and future research directions // Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 2006. Vol. 232. P. 362–407.

Dimitrov L. Contribution to atmospheric methane by natural gas seepages on the Bulgarian continental shelf // Continental Shelf Researches. 2002. Vol. 22. P. 2429–2442.

Статья поступила в редакцию 28.11.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 550.47:550.72:553.982.2

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-75-84

ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА НЕФТИ ЗАЛЕЖИ ПОКУРСКОЙ СВИТЫ РУССКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО НЕФТЕГАЗОНОСНОГО БАСЕЙНА

Полина Николаевна Шишина¹✉, Мария Александровна Большакова²,
Елена Всеволодовна Соболева³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; shishina_p@mail.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.bolshakova@oilmsu.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; phitan@yandex.ru

Аннотация. Исследованы состав и свойства нефти апт-сеноманской залежи Русского газонефтяного месторождения Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. Дана интерпретация геологической истории формирования залежей нефти Русского месторождения. Состав и свойства нефти свидетельствуют об ее смешанном генезисе. Данные указывают на то, что нефть подверглась воздействию вторичных процессов биodeградации, что хорошо согласуется с историей геологического развития северо-восточной части бассейна.

Ключевые слова: Русское месторождение, состав нефти, биомаркеры, биodeградация

Для цитирования: Шишина П.Н., Большакова М.А., Соболева Е.В. Геолого-геохимическая история формирования состава нефти залежи покурской свиты Русского месторождения Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 75–84.

GEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL HISTORY OF THE FORMATION OF THE OIL COMPOSITION OF THE POKURSKAYA FORMATION OF THE RUSSIAN DEPOSIT OF THE WEST SIBERIAN OIL AND GAS BASIN

Polina N. Shishina ✉, Mariya A. Bolshakova, Elena V. Soboleva

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; shishina_p@mail.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; m.bolshakova@oilmsu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; phitan@yandex.ru

Abstract. The composition and properties of oil from the Apt-Cenomanian deposit of the Russian gas and oil field of the West Siberian basin have been studied. It is shown that the composition and properties of oil may indicate their mixed genesis. The molecular composition of the oil suggests that the oil has undergone secondary biodegradation processes, which is in good agreement with the geological history of this part of the basin. A scenario for the formation of the Apt-Cenomanian oil deposit of the Russkoye field is proposed.

Keywords: Russkoye oilfield, oil composition, biomarkers, biodegradation

For citation: Shishina P.N., Bolshakova M.A., Soboleva E.V. Geological and geochemical history of the formation of the oil composition of the Pokurskaya formation of the Russian deposit of the West Siberian oil and gas basin. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 75–84. (In Russ.).

Введение. Русское газонефтяное месторождение находится в Пур-Тазовской нефтегазоносной области (НГО) Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна (НГБ) (рис. 1). Газонефтяная залежь приурочена к крупной антиклинальной складке в северной части Русского вала Часельского мегавала, оконтуренной по кровле сеноманского яруса изогипсой 900 м. Углы падения крыльев складки от 2,5 до 3,3°. Структура осложнена системой разломов, основной из них проходит через свод и делит складку на 2 блока. Его заложение начиналось в сантонский век, к моменту накопления глинистой пачки кампанского яруса амплитуда разлома составляла 75 м (рис. 2). До сеноманского века на этой территории происходили движения переменного знака, которые не привели к формированию по-

ложительной структуры. Наибольший рост (35% прироста) локального поднятия (ЛП) происходил в турон-кампанское время, в маастрихт-датские века происходило замедление восходящих движений (10% прироста) [Кулахметов, 1975]. Новейшие неоген-четвертичные подвижки фундамента Западно-Сибирской плиты в пределах Часельского мегавала привели к резкому блоковому поднятию, амплитуда разлома на Русском ЛП все время возрастала и увеличилась до 250 м, сформировались оперяющие разломы с амплитудой 20–50 м. Западный блок структуры был расколот разломом с амплитудой 164 м (рис. 3). В неогеновый период в сводовой части антиклинальной структуры были эродированы палеоген-неогеновые и частично верхнемеловые отложения мощностью до 400 м.



Рис. 1. Фрагмент карты России с местоположением Русского месторождения. Звезда — Русское газонефтяное месторождение

В результате общего поднятия на северо-востоке Западно-Сибирской плиты антиклинальные ловушки увеличили амплитуды. Часть ранее накопившихся осадков размывалась и сносилась в область новейших опусканий. Из-за этого в зоне активных воздыманий фундамента в продуктивных горизонтах происходило снижение гидростатического давления, что приводило к выделению растворенного в пластовых водах газа в свободную фазу, а также способствовало образованию зон повышенной трещиноватости пород, и, по всей вероятности, попаданию поверхностных вод с аэробными и анаэробными бактериями. Изменение пластового давления привело к активизации движения пластовых вод, вероятно, эти воды могли приносить новые порции газа из более глубоких горизонтов [Рудкевич, 1972; Кузин, 1973].

Нефтегазоносность Русского месторождения связана с покурской свитой апт-сеноманского нефтегазоносного комплекса. Продуктивные отложения (пласты ПК₁₋₇) представлены чередованием песчано-алевритовых и глинистых пластов общей мощности около 200 м. В разрезе насчитывается до 35 пластов и прослоев: песчаников, рыхлых песков и алевролитов, разделенных глинами. Нефтегазоносность среднеюрского и неокомского комплексов, которые являются продуктивными в Пур-Тазовской НГО, не доказана.

Породы-коллекторы составляют около 30% продуктивного разреза. Коллекторы порового типа представлены песчаниками с открытой пористостью,

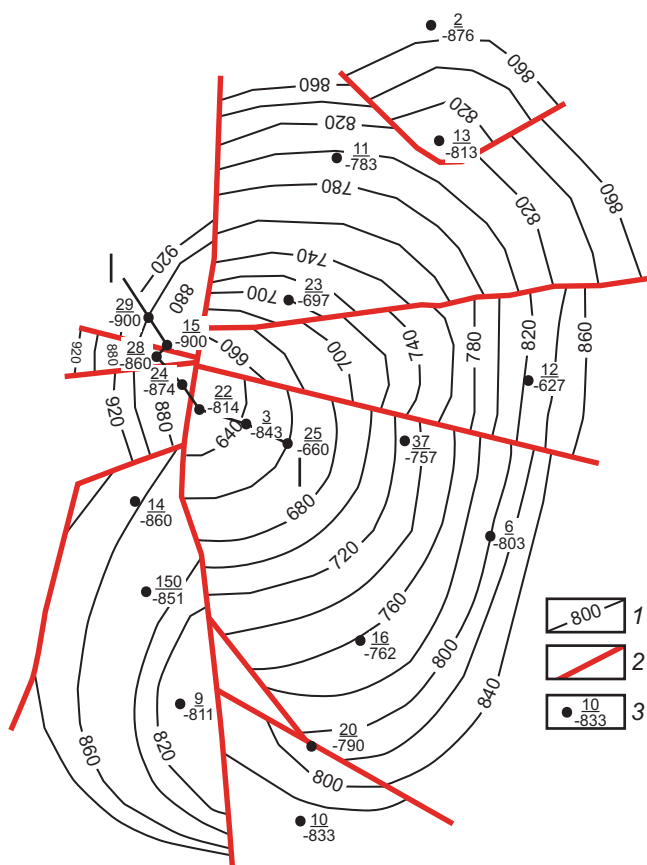


Рис. 2. Структурная карта по кровле покурской свиты Русского локального поднятия: 1 — изогипсы, м, 2 — тектонические нарушения, 3 — скважины; I-I — линия разреза [Иванова, 1989]

которая в слабо сцементированных коллекторах изменяется в пределах 26–35%. Проницаемость колеблется от 1 до 1650–1790 мД, среднее значение 136 мД. Эффективная мощность газоносных пластов 18–22 м, нефтенасыщенных (нефтяные оторочки) — до 12 м.

Выявлено 8 залежей, в том числе 5 газонефтяных, 2 газовые и 1 нефтяная (7 — в сеноманском ярусе, 1 — в туронском). Залежи экранируются региональным глинистым туронским флюидоупором.

Месторождение характеризуется сложными условиями залегания нефти. Интерпретация данных ГИС и опробования скважин на базе выполненной детальной корреляции пластов позволила установить положение водонефтяного контакта (ВНК) и газонефтяного (ГНК) в разных пачках и в пределах различных блоков. Обращает на себя внимание явно выраженное изменение ВНК с юга на север и различное его положение в основных блоках (I–IV): интервалы 826–858 (I), 845–873 (II), 854–871 (III), 858–870 (IV) м, а также залежах разных пластов покурской свиты: пласт ПК₁₋₂ (восточный блок) — ВНК 912 м, ПК₅ (восточный) — 885–860 м, ПК₁₋₄ (восточный) — 810–860 м, ПК₃ (западный блок) — 920 м, ПК₂ (западный 905 м), ПК₁ (западный 890 м) [Иванова, 1989].

Формирование залежей в покурской свите происходило в два этапа: сначала нефть заполнила ловушки, потом сухой метановый газ оттеснил нефть

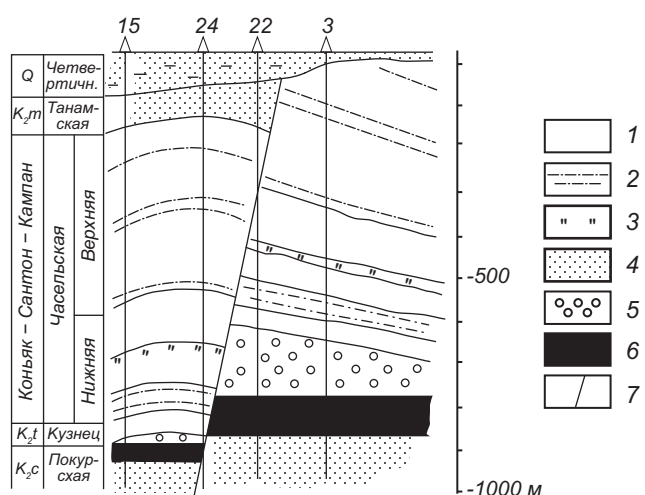


Рис. 3. Разрез по линии I–I (рис. 2) на Русском месторождении [Слепцов, 1972]: 1 — глины, 2 — алевролиты, 3 — опоки, 4 — песчаники, 5 — газ, 6 — нефть, 7 — линия сброса

и занял верхнюю часть структуры. О чем свидетельствует наличие остаточной нефтенасыщенности в пластах ниже ВНК и в газовых шапках [Дядюк и др., 1976]. Также отмечается, что в период образования трещин и формирования газовых шапок происходили процессы проникновения в залежь поверхностных вод, содержащих аэробные и анаэробные бактерии. Поэтому существует мнение, что первичная нефть Русского месторождения биodeградирована при участии бактерий, привнесенных в залежь с поверхностными водами [Соболева, 1979]. Условия для биodeградации в залежи были благоприятные — активная гидродинамика, невысокая пластовая температура, низкая минерализация законтурных вод, отсутствие сероводорода.

Нефти апт-сеноманского нефтегазоносного комплекса (НГК) по химическому составу и свойствам отличаются от нефтей залежей неокомского и юрского НГК. По физико-химическим параметрам нефти апт-сеноманского НГК характеризуются высокой плотностью, низкой температурой застывания, отсутствием легких фракций, кипящих до 220–250 °С, относительно небольшим содержанием смолисто-асфальтеновых компонентов (асфальтены 2,5–2,26, смолы 8,36–15,48%), нефть малосернистая, серы 0,20–0,37%, с незначительным содержанием твердых парафинов (C_{16+}) 0,54–2,51%. Плотность нефтей изменяется от 0,940 до 0,950 г/см³, молекулярная масса от 310 до 400, кинематическая вязкость при 50 °С от 46,6 до 122,4 сСт. Физико-химические параметры проб нефти, отобранные в разных интервалах даже одной скважины (скв. 33, 892–787 м) нефтяной оторочки, незначительно отличаются и не зависят от расстояния от ВНК. В интервале 787–798 м плотность нефти 0,944 г/см³, а в интервале 883–892 м ниже 0,939 г/см³, что зависит от фракционного состава — содержания относительно легких фракций — начала кипения (НК) нефти: в первой пробе НК = 248 °С, во второй НК = 223 °С,

а также количество асфальтенов. Такое распределения свойств по разрезу может указывать на относительно молодое формирование залежи, когда еще не произошло гравитационного распределения компонентов нефти.

Результаты предыдущих исследований [Соболева, 1979] свидетельствуют о том, что типичного для нефтей неокомского и юрского НГК преобладания пиков n -алканов и изопреноидов C_{12} – C_{32} , в нефти покурской залежи Русского месторождения не отмечается. По данным масс-спектрометрии, осуществленной в 1980-е годы, среди высокомолекулярных алканов отмечается низкая концентрация n -алканов и относительно высокая разветвленных изоалканов, в их числе имеющих геминальные радикалы, а также низкое содержание моноциклических нафтен. Нефть состоит из циклоалкановых УВ разной цикличности с преобладанием полициклических структур, обнаружены циклоалканы с длинными алифатическими радикалами. Концентрации бициклических и трициклических нафтен почти одинаковые, они преобладают над моноциклическими. Преобладание би- и трициклических нафтен над моноциклическими можно объяснить составом исходного для нефтей ОВ и/или одинаковой катагенетической зрелостью.

По новым данным (начало XXI века) хромато-масс-спектрометрии (ХМС) в составе нефти отмечается гомологическая серия хейлантанов (t_{19} – t_{31}), среди которых преобладает t_{31} . Среди диастериомеров незначительно больше геоэпимеров, т.е. преобразование био- в геоэпимеры еще не закончилось. Среди гомологов хейлантанов t_{19} – t_{23} преобладает t_{23} , поэтому можно предположить, что нефтегазоматеринские породы (НГМП) этих нефтей накапливались в море или соленых озерах, также $(t_{19} + t_{20}) > t_{21} \approx t_{23}$, что указывает на участие в генерации нефти ОВ континентального генезиса.

Стераны и гопаны были обнаружены в незначительных концентрациях, что можно объяснить составом исходного ОВ, где было мало предшественников этих УВ или они еще не образовались из-за низкой катагенетической зрелости ОВ НГМП и находятся в составе геополимеров керогена.

Из нефти Русского месторождения были выделены адамантановые УВ с метильными и этильными радикалами, их содержание на фракцию 200–250 °С достигает 4,07% (на нефть 0,041%), по их содержанию она сходна с конденсатами апт-сеноманского НГК Медвежьего месторождения — 4,95%. Адамантаны в биоструктурах живого вещества не известны, они могут образоваться в результате мягкого термокатализа. Такая большая концентрация трициклических нафтен с мостиковой структурой может быть объяснена относительным накоплением их в процессе биodeградации, поскольку бактерии не включают их в свой метаболизм.

Ароматические УВ представлены в основном структурами, в которых к ароматическим циклам

присоединены алкильные цепи, а также «гибридные» УВ, содержащие ароматические кольца, конденсированные с циклоалкановыми. Среди аренов отмечается преобладание моноароматических УВ с длинными алифатическими радикалами, и плавное снижение концентраций бициклических УВ гомологического ряда нафталина. В более высококипящих фракциях ароматические УВ представлены в основном гибридными алкилциклановыми структурами с одним бензольным кольцом. С повышением температуры кипения фракций концентрация нафталиновых УВ, а также ароматических УВ, конденсированных с нафтеновыми кольцами (гибридных), возрастает от 2,7% (фракция 200–250 °С) до 46,1% (400–450 °С). По-видимому, нафталиновый фрагмент является частью полиароматических нафтеново-ароматических структур. Особенности распределения этих ароматических УВ подчеркивают относительно низкую степень катагенетического преобразования биоструктур — ароматизация затронула только одно или два кольца полициклических нафтеновых УВ, сохранены алкильные радикалы.

Асфальтены характеризуются (по данным ЯМР) относительно невысокой степенью ароматичности (до 50%), в нефтях неокомских и юрских залежей она достигает 66%, что может быть связано с более низкой степенью катагенетического преобразования нефтей апт-сеноманского НГК (термический процесс перераспределения водорода еще слабо преобразовал эти структуры).

Главные отличительные особенности молекулярного состава нефти Русского месторождения — полное отсутствие низкомолекулярных УВ бензиновых фракций, а также нормальных и изопреноидных алканов в средних фракциях, преобладание полициклических нафтеновых УВ, распределение которых по цикличности также отличается от нефтей других НГК. Отсутствие пиков *n*-алканов и изопренанов на хроматограммах средних фракций позволили назвать их «безалкановыми». О генезисе этих нефтей имеются разные точки зрения, возможно, дополняющие друг друга — либо это молодые незрелые нефти, образовавшиеся в конце протокатагенеза до главной фазы нефтеобразования, либо биodeградированные в залежи в условиях криптогипергенеза.

Органическое вещество (ОВ) глинистых пород апт-сеноманского НГК в погруженных участках северо-восточной части НГБ участвовало в генерации УВ нефтей сеноманских залежей, что выявлено корреляционными связями в распределении циклоалкановых и ароматических УВ в нефтях и ОВ пород. Безалкановые нефти геохимически молодые, так как НГМП, генерировавшие УВ этих нефтей в геологической истории в самых глубоких участках НГБ находились в начале главной зоны нефтеобразования (ГЗН) на грациях ПК₃ — МК₁. Можно предположить, что эти нефти образовались на самых ранних этапах главной фазы нефтеобразования (ГФН). Вероятно, большие концентрации газа,

который выделялся из пластовых вод при снижении давления во время неотектонического воздымания, и низкая степень литификации отложений способствовали десорбции высокомолекулярных органических соединений (УВ и гетероатомных компонентов), миграции и аккумуляции их в ловушках. На геохимическую молодость этих нефтей указывают особенности их молекулярного состава: 1) отсутствие низкомолекулярных УВ бензиновых фракций, которые образуются в условиях ГФН; 2) наличие цикланов с длинными алифатическими радикалами, что указывает на слабое развитие процессов термической деструкции; 3) низкая степень ароматичности высококипящих фракций и асфальтенов, которая должна увеличиваться в процессе термокаталитических реакций диспропорционирования водорода; 4) среди полиароматических УВ преобладают гибридные с одним бензольным кольцом и двумя или тремя циклогексановыми, что также связано с относительно низкими температурами катагенетического преобразования ОВ НГМП (реакции дегидрирования и перераспределения водорода) в осадочном разрезе на данной территории.

Нефти являются частично биodeградированными, что выразилось в отсутствии *n*-алканов и изопреноидов в средних фракциях. Предположение о первично генерируемых нефтях, лишенных этих УВ, опровергается данными о составе битумоидов пород апт-сеноманского комплекса, эти УВ содержатся в них в значительных количествах [Соболева, 1979]. Внедрение инфильтрационных вод и вместе с ними бактерий в пластовые воды газонефтяных залежей могло произойти в начале неогенового периода, поскольку этот район приурочен к зонам наибольшего неотектонического воздымания фундамента с амплитудой деформаций 150–250 м и эрозией до 400 м неогеновых, палеогеновых и даже частично верхнемеловых пород. Пути проникновения метеорных вод могли быть зоны разломов, формированию путей миграции поверхностных вод способствовала также эрозия, о которой упоминалось ранее. В залежах покурской свиты минерализация (в среднем 9–10 г/л), гидрохимическая характеристика (воды хлор-кальциевые, отсутствие или незначительная концентрация сульфатов) законтурных вод, состав водорастворенных газов — метановый, рН среды и пластовые температуры (около 20 °С) были благоприятны для метаболизма аэробных и анаэробных бактерий.

Исследованные биodeградированные нефти многих НГБ находятся на разных стадиях деградации. Исследователями были разработаны критерии и шкалы, основанные на изменении молекулярного состава УВ разных классов, для определения стадии биodeградации от низкой до самой высокой [Bailey, 1973; Chosson et al., 1992]

Как уже отмечалось, по составу биомаркеров (отсутствие или присутствие определенных УВ) можно определить *степень* процесса биodeградации нефти

в залежи: содержание н-алканов C_5 – C_{15} снижено (*незначительная степень*); 90% C_5 – C_{35} н-алканов удалено (*слабая*); алкилциклогексаны и гибридные алкилциклогексанбензолы удалены, содержание изоалканов снижено (*умеренная*); изопреноиды (пристан, фитан и i - C_{11} – C_{18}) и метилнафталины удалены, арены уменьшаются в порядке увеличения молекулярной массы (*умеренная*); бициклические нафтенy C_{14} – C_{16} удалены (*интенсивная*); биостераны ($\alpha\alpha\alpha$) уничтожаются раньше геостеранов ($\alpha\beta\beta$) и диастеранов ($\alpha\beta\alpha$), прегнаны (C_{21} – C_{22}) удалены, стераны C_{27} – C_{29} изменены, 25-норгопаны — сформированы (*сильная*); биodeградация 17 α (H)-гопанов происходит по схеме от C_{27} до C_{35} , биогопаны ($\beta\beta$) также уничтожаются раньше нефтяных ($\alpha\beta$ и $\beta\alpha$) гопанов (*очень сильная*); гопаны удалены, диастераны изменены, биodeградация идет по схеме от C_{27} , C_{28} , C_{29} (*жесткая*); диастераны и трициклические терпаны (хейлантаны C_{19} – C_{40}) удалены, ароматические стероиды изменены (*крайняя степень*). Следует отметить, что 18 α (H)-олеанан устойчивее к биodeградации, чем гопаны, гаммацеран — один из самых стойких к биodeградации, порфирины являются высоко стойкими к биodeградации.

Таким образом, общая последовательность увеличения стойкости к биodeградации у биомаркеров следующая: нормальные алканы (наиболее восприимчивы) (1) > нециклические изопреноиды (2) > гопаны (25-норгопаны — 10-метилноргопаны присутствуют) (3) > стераны (4) > гопаны (отсутствуют 25-норгопаны) (5) > диастераны (6) > ароматические стероиды (7) > трициклические терпаны (8) > 18 α (H)-олеанан (9) > гаммацеран (10) > порфирины (наименее восприимчивы) (11).

Исследователи процессов биodeградации пришли к выводу, что специфика и последовательность процессов, происходящих в течение биodeградации нефти в залежи, очень зависит от типов бактерий, включающих УВ в свой метаболизм.

Цель данной работы — уточнить геолого-геохимическую историю формирования состава нефти покурской газонефтяной залежи Русского месторождения, опираясь на современные данные особенностей ее молекулярного состава.

Материалы и методы исследования. Данная работа базируется на обобщении геологических материалов по строению и формированию залежи аптсеноманского комплекса Русского месторождения Западно-Сибирского НГБ, на изучении и обобщении свойств и состава нефтей этой залежи на разных аналитических уровнях и изменении их состава во время вторичных гипергенетических процессах биodeградации в залежи.

В распоряжении авторов имелось больше информации о составе и свойствах нефтей Русского нефтегазового месторождения конца прошлого века [Соболева, 1979], а также более поздняя ХХI века (2021–2022). Нефти исследовались на разных аналитических уровнях и разными методами. Ме-

тодом хромато-масс-спектрометрии (ХМС) был исследован молекулярный состав пробы нефти из нефтяной оторочки, поэтому дальнейшие обсуждения будут касаться как ранней, так и более поздней информации об исследованных нефтях.

Выделение насыщенных и ненасыщенных компонентов нефти проводилось с использованием жидкостно-адсорбционной хроматографии. Сорбент — аргентированный силикагель, насыщенные углеводороды десорбировались гексаном, ароматические — толуолом. Исследование молекулярного состава нефти выполнялось на хромато-масс-спектрометре GC-MS Agilent. Условия хроматографического интерфейса следующие: газ-носитель — гелий, капиллярная кварцевая колонка DB-5MS — длиной 30 м, внутренний диаметр 0,25 мм, толщина пленки 0,25 μ m. Скорость программирования температуры термостата колонки 8–4–3 °C/мин, начальная температура 60 °C, конечная — 300 °C, время программирования — 63 мин, при изотермическом режиме 300 °C — 10 мин. Условия масс-спектрометрического анализа: электронная ионизация 70 eV (EI), диапазон масс 50–800 AMU, скорость сканирования — до 2000 AMU/сек, температура ионного источника 250 °C. Компьютерная обработка полученных результатов проводилась в ПО компании Agilent с записью ионов полным ионным током TIC.

В табл. 1 представлены «осколки ионизации» (m/z), по которым интерпретировался состав УВ и гетероароматных компонентов нефти.

Таблица 1
«Осколки ионизации» (m/z), углеводороды и сернистые гетероароматные соединения в составе нефти покурской свиты Русского месторождения

Насыщенные алкановые и нафтеновые УВ по «осколкам ионизации»	Ненасыщенные компоненты (ароматических УВ и сернистые соединения) по «осколкам ионизации»
m/z 85 (alkanes)	m/z 142 (methyl naphthalenes)
m/z 191 (terpanes)	m/z 156 (dimethyl-naphthalenes)
m/z 217 (regular-steranes)	m/z 178 (phenanthrene)
m/z 218 (iso-steranes)	m/z 184 (dibenzothiophene)
m/z 259 (dia-steranes)	m/z 192 (methyl phenanthrenes)
	m/z 198 (methyl dibenzothiophenes)
	m/z 231 (tri-aromatic steroids)

Результаты и их обсуждение. Проведен хромато-масс-спектрометрический анализ (ХМС) безалкановой (рис. 4) нефти Русского месторождения, по полученным масс-фрагментограммам произведена геолого-геохимическая интерпретация: рассчитаны коэффициенты, позволяющие судить о типе органического вещества, условиях накопления и литологическом составе НГМП для исследованной нефти, а также об их зрелости.

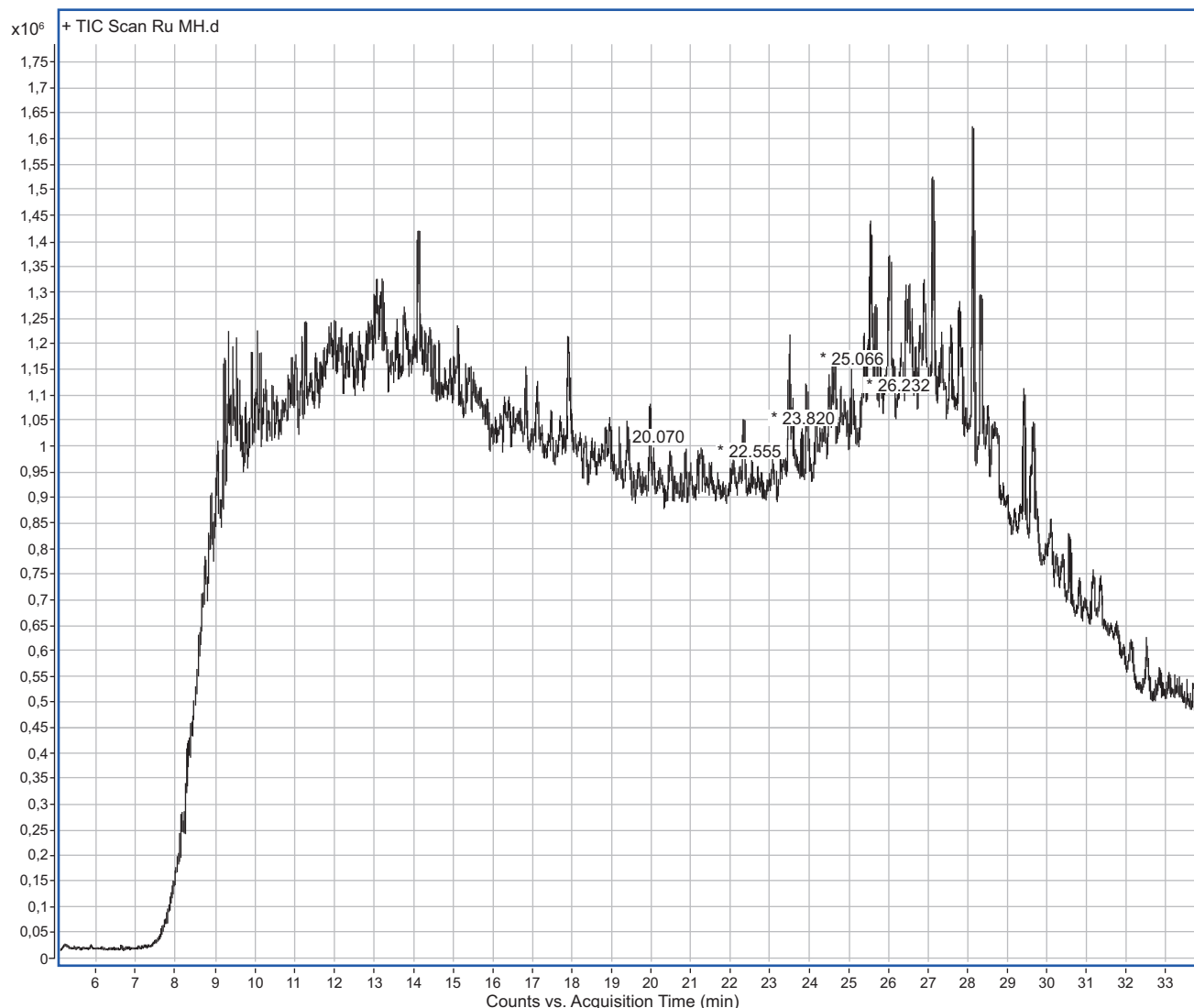


Рис. 4. Масс-фрагментограмма нефти (общий ионный ток — ТИС) покурской залежи Русского месторождения

Основываясь на рассчитанных коэффициентах, можно заключить, что органическое вещество НГМП накапливалось в условиях морских лагун и/или солоноватоводных озер в относительно восстановительных условиях, где, всего вероятнее, отлагалось гумусово-сапропелевое органическое вещество (тип II₁). Поскольку в нефти присутствуют гомологическая серия трициклических нафтен хейлантанов t19–t29 и пентациклический олеанан (C₃₀H₅₂), предполагаем, что эти УВ образовались из биомолекул высшей растительности с аналогичной структурой углеродного скелета. Соленость воды водного бассейна подтверждает наличие гаммацетана, образующегося из спирта тетрахиманола — биомолекулы липоидов живого вещества бактерий галофилов. Как уже упоминалось ранее, смешанное гумусово-сапропелевое ОВ (тип II₁) в отличие от чисто сапропелевого начинает генерировать жидкие углеводородные флюиды в условиях протокатагенеза (ПКЗ) до ГЗН.

В табл. 2 и 3 представлены геохимические коэффициенты, определяющие тип ОВ и условия накопления НГМП.

Основываясь на рассчитанных коэффициентах, можно заключить, что органическое вещество НГМП накапливалось в условиях морских лагун и/или солоноватоводных озер в относительно восстановительных условиях, где, всего вероятнее, отлагалось гумусово-сапропелевое органическое вещество (тип II₁). Поскольку в нефти присутствуют гомологическая серия трициклических нафтен хейлантанов t19–t29 и пентациклический олеанан (C₃₀H₅₂), предполагаем, что эти УВ образовались из биомолекул высшей растительности с аналогичной структурой углеродного скелета. Соленость воды водного бассейна подтверждает наличие гаммацетана, образующегося из спирта тетрахиманола — биомолекулы липоидов живого вещества бактерий галофилов. Как уже упоминалось ранее, смешанное гумусово-сапропелевое ОВ (тип II₁) в отличие от чисто сапропелевого начинает генерировать жидкие углеводородные флюиды в условиях протокатагенеза (ПКЗ) до ГЗН.

По соотношениям УВ (табл. 4) можно предположить, что в литологическом составе НГМП преобладала глинистая составляющая. В нефти

Таблица 2

Коэффициенты, определяющие условия накопления органического вещества нефтегазоматеринских пород

Коэффициент	Значение	Интерпретация
Соотношение изомеров метилфенантрена 9MP/2MP [Peters et al., 2005]	0,982	>1 морские или лагуна-ные (озерные) условия (соленое озеро); <1 пресноводные условия
Соотношение хейлантанов: $2\Sigma(t_{19}-t_{20}) / \Sigma(t_{23}-t_{26})$ [Peters et al., 2005]	0,727	>1 исходное континентальное ОВ; <1 морское ОВ
Соотношение хейлантанов $\Sigma(t_{23}-t_{26})/\Sigma(t_{28}-t_{31})$ [Peters et al., 2005]	0,435	>1 исходное морское ОВ; <1 континентальное ОВ
Соотношение хейлантанов, t_{26}/t_{25} [Zumberge, 2000]	1,538	>1 исходное ОВ озерного генезиса
Низкое значение отношения гопанов H3122R / H30 α [Zumberge, 2000]	0,369	Исходное ОВ озерного генезиса
Индекс нечетности гомогопанов: $[H31 + (6H33) + H35] / [(4H32) + (4H34)]$	1,118	1,1–2,0 восстановительные условия седиментации и раннего диагенеза

также содержатся УВ гомологического ряда перегруппированных стеранов — диастераны $C_{27}-C_{29}$, которые образуются из стеролов и/или стеринов на ранних стадиях литогенеза в каталитических реакциях, где катализаторами являются глинистые алюмосиликаты.

Результаты интерпретации молекулярного состава нефти, полученные по коэффициентам (табл. 2; 3), подтверждаются по треугольным диа-

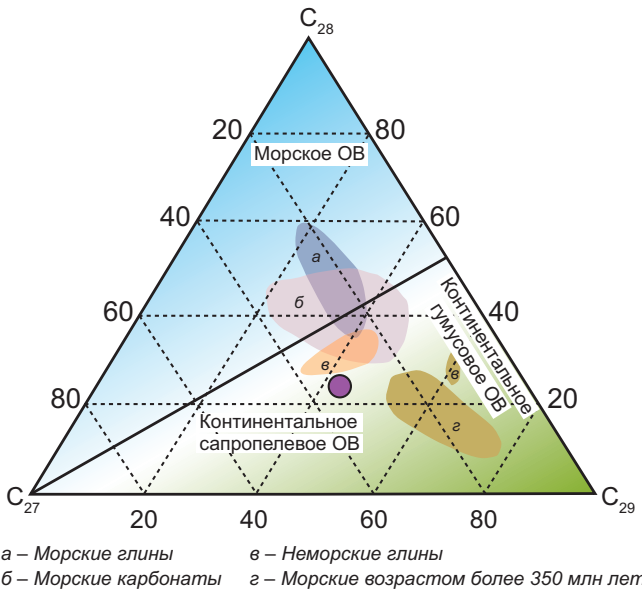


Рис. 5. Определение типа органического вещества и литологического состава нефтегазоматеринских пород по соотношению моноароматических стероидов $C_{27}-C_{29}$ в составе нефти

Таблица 3

Коэффициенты, определяющие литологический состав нефтегазоматеринских пород

Коэффициент	Значение	Интерпретация
Отношение диастеранов и регулярных стеранов: $DIA/REG = dia-C_{29}(S+R) / reg-C_{29}(S+R)$ [Воробьева, 1992; Арефьев, 1993]	0,600	0,5–0,7 глинистый состав НГМП
Преобладание гопана C_{30} над адиантаном C_{29} : $(H30/H29)$ [Петров, 1984; Peters et al., 2005]	2,003	>1 глинистый состав НГМП
Соотношение моноароматических стероидов: $MAC29/MA(C_{28}+C_{29})$ [Peters et al., 2005]	0,839	> 0,5 — континентальные глинистые НГМП
Соотношение 4-метилдибензотиофена к фенантрону: $4-MDBT / P$ [Чахмахчев, 1995]	2,531	глинистый состав НГМП не более 0,38; карбонатный 4,2–8,3; кремнистый 0,3–1,8

граммам, построенным по составу стеранов и моноароматических стероидов. (рис. 5; 6).

По полученным данным можно судить, что накопление исходного ОВ смешанного преимущественно сапропелевого состава происходило в морских лагунах и/или слабосоленых озерах в кремнисто-глинистых илах в относительно восстановительных условиях седиментогенеза.

Можно предположить, что в формировании состава исследованной нефти принимала участие ОВ не одной НГМП — известно, что основным генератором нефти в Западной Сибири является баженовский горизонт (I_3 волжский век), характеристики органического вещества которого в целом соответствуют составу нефти Русского месторождения. Но обращает на себя внимание наличие в составе нефти олеанана, что свидетельствует о более молодом возрасте исходного для нефти ОВ, поскольку его обнаруживают в ОВ, начиная с отложений начала мелового периода.

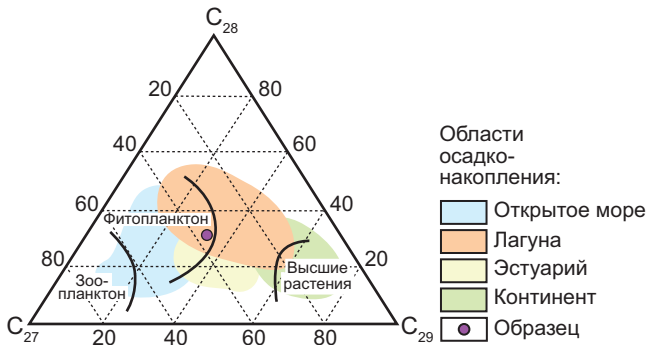


Рис. 6. Определение вида биопродуктов органического вещества нефтегазоматеринских пород и условий его накопления по соотношению стеранов $C_{27}-C_{29}$ в составе нефти

Таблица 4

Коэффициенты, определяющие зрелость органического вещества нефтегазоматеринских пород и нефти

Коэффициент	Значение	Интерпретация
Соотношение моноароматических (МА) и триароматических (ТА) стероидов: $TA_{28}/(TA_{28}+MA_{29})$ [Peters et al., 2005; Соболева, 2023]	0,216	По мере возрастания степени катагенеза моноароматические стероиды трансформируются в триароматические
Соотношение между изостеранами ($\alpha\beta\beta$) и биостеранами ($\alpha\alpha\alpha$) $C_{29}H_{52}$: $\alpha\beta\beta/\alpha\alpha\alpha$ [Петров, 1984]	1,455	В «незрелых» геохимически молодых нефтях (начало ГЗН) равно 0,6–0,7, в зрелых 3,0–5,5
Коэффициент изомеризации для стеранов состава $C_{29}H_{52}$: $\alpha\beta\beta/(\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta)$	0,461	Возрастает от 0 в «незрелом» ОВ и достигает равновесного значения 0,67–0,71 на средних стадиях катагенеза
Отношение суммы моретанов ($\beta\alpha m$) к гопанам ($\alpha\beta n$) состава $C_{29}H_{52}$ и/или $C_{30}H_{54}$: $(\beta\alpha_{29}+\beta\alpha_{30})/(\alpha\beta_{29}+\alpha\beta_{30})$ [Peters et al., 2005]	0,194	Коэффициенты уменьшаются с ростом зрелости ОВ и нефти от 0,8 до 0,15 на средних стадиях катагенеза, достигая минимума в 0,05 в высоко зрелом ОВ
Соотношение $T_s/(T_s + T_m)$ или T_s/T_m [Peters et al., 2005; Арефьев, 1993; Виноградова, 2001]	1,204	Увеличивается с повышением степени зрелости, в начале ГЗН составляет 1, на поздних стадиях катагенеза $T_s/T_m = 5-10$
Соотношение 18 α -30-норнеогопана ($C_{29}Ts$) и 17 α -H30- норгопана ($H_{29}\alpha\beta$): $C_{29}Ts/(C_{29}Ts+H_{29}\alpha\beta)$ [Peters et al., 2005]	0,447	Увеличивается с возрастанием степени катагенеза
Метилфенантроновый индекс: $MPI-1 = 1,5 [(2-MP) + (3-MP)] / [P + (1-MP) + (9-MP)]$ [Соболева, 2023]	0,822	Значение MPI-1 увеличивается до конца ГЗН (0,4–1,6)
Соотношение структурных изомеров дибензотиофена: 4-MDBT/1-MDBT [Бушнев, 1999]	2,142	
	433,7	Выведена зависимость между T_{max} , ОСВ (R°) и 4-MDBT/1-MDBT $T_{max} = 5 \cdot (4-MDBT/1-MDBT) + 423 \text{ }^\circ C$
	0,670	$R^\circ = 0,07 \cdot (4-MDBT/1-MDBT) + 0,52\%$

По результатам интерпретации значений коэффициентов (табл. 4) по молекулярному составу нефти сеноманской залежи органическое вещество НГМП находится в самом начале главной зоны нефтеобразования (ГЗН), вероятно на грациях ПК₃–МК₁.

Баженовский горизонт в этой части бассейна достиг грации мезокатагенеза МК₁, т.е. молекулярные индикаторы зрелости, которые удалось установить в исследованной нефти позволяют нам предполагать ее смешанный генезис — основная часть нефти была вероятно сгенерирована из ОВ пород баженовского горизонта. Но и вклад ОВ соб-

ственно глинистых отложений апт-сеноманского НГК нельзя исключить, как отмечалось выше предыдущими исследователями, предполагалось наличие корреляционных связей между составом ОВ пород и нефтей апт-сеноманского НГК Русского месторождения.

По полученным данным хромато-масс-спектрометрического анализа проведена оценка степени биodeградации нефти (рис. 7). В образцах отсутствуют н-алканы, алкилциклогексаны и изопреноидные соединения, как уже упоминалось ранее, их отсутствие указывает на начало жесткой степени биodeградации [Wenger, 2002].

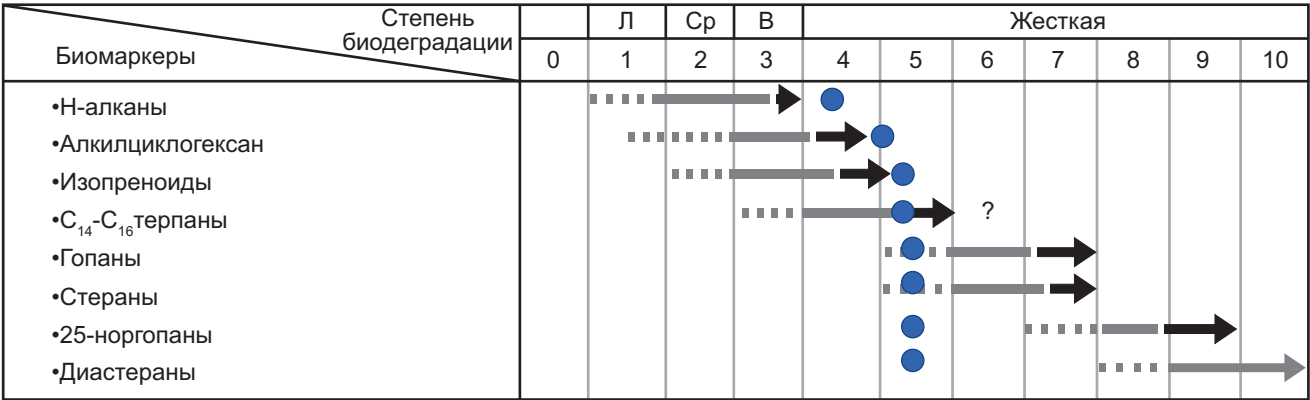


Рис. 7. Биомаркерная шкала биodeградации для нефти Русского месторождения

Заключение и выводы. Почти каждое из рассмотренных свойств и особенностей состава безалкановых нефтей и в большей мере состава их индивидуальных компонентов указывает на геолого-геохимические факторы, действовавшие на нефть в процессе ее геохимической эволюции или на состав исходного ОВ, но не всегда можно отдельные факты интерпретировать однозначно.

Сопоставляя выводы, сделанные по аналитическим данным 1980 гг. и новым данным по ХМС, приходим к заключению, что нефти сеноманской газонефтяной залежи Русского месторождения геохимически относительно молодые и образовались из органического вещества II типа кремнисто-глинистых НГМП, находящегося на ранних грациях катагенеза (ПК₃–МК₁). Наиболее вероятными нефтегазоматеринскими породами являются отложения баженовского горизонта, но молекулярный состав нефти также свидетельствует, что в формировании исследованной нефти принимали участие и обогащенные органическим веществом глинистые прослои меловых отложений, в которых отмечаются биомаркеры террагенного ОВ.

Во время неоген-четвертичных подвижек фундамента Западно-Сибирской плиты в районе Часельского мегавала произошло формирование блокового поднятия, разбитого многочисленными разломами, формировались тектонически экранированные ловушки и пути вертикальной миграции в них из НГМП.

В это же время была эродирована верхняя часть палеоген-неогеновых отложений. Изменились термобарические пластовые условия, изменился фазовый состав залежи. По всей вероятности, возникли ус-

ловия для проникновения инфильтрационных вод и вместе с ними бактерий, в частности, аэробных углеводородоокисляющих и некоторых анаэробных, с поверхности в пластовые законтурные воды залежи.

Результатом этих тектонических перестроек в неогеновый период стало изменение состава и свойств нефти в залежи, так как она подверглась биохимическому окислению. Сегодня мы наблюдаем нефть с довольно высокой плотностью, отсутствием в составе легкокипящих соединений бензиновой фракции и в составе алканов — алканов нормального и изопреноидного строения (типа Б₁ по классификации Ал.А. Петрова [1978]). Молекулярный состав нефти подтверждает биodeградацию умеренной степени, когда в нефти были уничтожены большинство алкановых УВ (н-алканы и изопреноиды) и моноциклические нафтенy. Умеренная степень биodeградации подтверждается наличием в нефти как геостеранов (C₂₇–C₂₉) и нефтяных го-панов (C₂₉–C₃₅), так и биостеранов и биогопанов. Концентрации холестанов (C₂₇), метилхолестанов (C₂₈) и этилхолестанов (C₂₉) близки.

Таким образом, проанализировав состав нефти покурской залежи Русского месторождения, можно заключить, что эта нефть геохимически относительно молодая, т.е. слабо измененная термokatалитическими факторами катагенетических процессов; источниками нефти предположительно являются верхнеюрские и меловые породы, обогащенные смешанным органическим веществом. Кроме того, нефть биodeградирована в залежи, что привело к почти полному уничтожению в ней н-алканов, изоалканов, алкильных радикалов регулярных стеранов и моноароматических стероидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бушнев Д.А. Основы геохимической интерпретации данных по составу и распределению индивидуальных органических соединений в нефтях и осадочных породах. Сыктывкар: Геопринт, 1999. 48 с.
- Виноградова Т.Л., Чахмахчев В.А., Агафонова З.Г. и др. Углеводородные и гетероатомные соединения — показатели термической зрелости органического вещества пород и нафтидов // Геология нефти и газа. 2001. № 6.
- Дядюк Н.П., Слепцов В.Т., Кислухин В.И. и др. Геология и обоснование нефтегазопроисхождения работ на 1976–1977 гг. в пределах северных нефтегазоносных областей Западно-Сибирской низменности // Геологический отчет ЗапСибНИГНИ. Тюмень, 1976. 211 с.
- Иванова М.М., Гутман И.С., Титунин Е.П. и др. Промыслово-геологические особенности Русского газонефтяного месторождения // Геология нефти и газа. 1989. № 8.
- Кузин И.Л. Основные этапы неотектонического развития Западно-Сибирской плиты и их роль в формировании нефтяных и газовых месторождений. Л.: Издательство СЗНИИ «Наследие», 1973.
- Кулахметов Н.Х. Особенности геологического строения и нефтегазоносность арктических районов Западно-Сибирской низменности, западной части Енисей-Хатангской впадины и акватории Карского моря, Геологический отчет ЗапСибНИГНИ. Тюмень, 1975. 533 с.
- Петров Ал.А. Углеводороды нефти. М.: Недра, 1984. 263 с.
- Рудкевич М.Я., Лобода В.Г., Задорожный П.П. Неотектонический этап в истории развития Западно-Сибирской плиты. [Текст] Новые данные по тектонике Западно-Сибирской низменности. Тр. ЗапСибНИГНИ, вып. 50. Тюмень, 1972. С. 66–75.
- Слепцов В.Т. О дизъюнктивных нарушениях на Русском и Южно-Русском месторождениях. [Текст] Структурно-формационные и палеотектонические критерии нефтегазоносности. Тр. ЗапСибНИГНИ, вып. 61. Тюмень, 1972. С. 19–123.
- Соболева Е. В. Условия залегания и возможный генезис безалкановых нефтей (на примере нефтей апт-сеноманского комплекса Западной Сибири): Дисс. ... канд. геол.-минер. н. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 1979.
- Соболева Е.В. Химия горючих ископаемых. М.: Издательство МГУ, 2023. 312 с.
- Bailey N.J.L., Jobsen A.M., Rogers M.A. Bacterial degradation of crude oil: comparison of field and experimental data // Chemical Geology. 1973. Vol. 11. P. 203–221.
- Chosson P., Connan J., Dessort D., et al. In vitro biodegradation of steranes and terpanes: a clue to understanding geological situations // Biological Markers in Sediments and Petroleum, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992. P. 320–349.

Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The Biomarker Guide. Vol. 1. Cambridge University Press, 2005.

Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. The Biomarker Guide. Vol. 2. Cambridge University Press, 2006.

Wenger L.M., Davis C.L., Isaksen G.H. Multiple controls on petroleum biodegradation and impact on oil quality // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2002. Vol. 5. P. 375–83.

Статья поступила в редакцию 10.12.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 549.651.2 (477.75)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-85-95

ПЛАГИОКЛАЗ ИНТРУЗИВНЫХ ПОРОД ОСТРОВОДУЖНОГО ПЕРВОМАЙСКО-АЮДАГСКОГО КОМПЛЕКСА ГОРНОГО КРЫМА — ОТ ПЛАГИОЛЕРЦОЛИТОВ ДО ПЛАГИОГРАНИТОВ

Георгий Николаевич Овсянников¹✉, Эрнст Максович Спиридонов²,
Сергей Владимирович Филимонов³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия; george2098@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4470-5788>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ernstspiridon@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; sefi@geol.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5487-8906>

Аннотация. Среднеюрский гипабиссальный островодужный первомайско-аюдагский интрузивный комплекс в мезозоидах Горного Крыма включает: плагиолерцолиты, оливиновые габбронорит-долериты, бескварцевые и кварцевые габбронорит-долериты, бескварцевые и кварцевые габбронорит-диориты, кварцевые диориты, плагиограниты. Их характерная особенность — обилие анортита (An_{92-90}) и битовнита (An_{89-73}), которых нет только в кварцевых диоритах и плагиогранитах. Такой состав плагиоклаза типичен для островодужных базитов. Из-за обилия анортита и битовнита, которые бедны кремнеземом, многие типы габброидов комплекса богаты кварцем. Анортит и битовнит обогащены железом до 0,9–1,0 масс.% FeO. От анортита к альбит-олигоклазу содержание калия возрастает по экспоненте от сотых долей до 1,4 масс.% K_2O . Даже при небольшой степени эпигенетических метаморфических изменений содержание калия в плагиоклазе заметно падает. В габброидах центральных частей интрузивов удлинение кристаллов плагиоклаза (от анортита до андезина) от 2 до 5,5, обычно 3–4. Эффузивоподобные резко порфировидные микрогаббро-долериты зоны закалки содержат вкрапленники плагиоклаза с удлинением до 10, в их мелкозернистой матрице развиты расщепленные лейсты плагиоклаза с удлинением до 10 и более.

Ключевые слова: анортит, битовнит, лабрадор, андезин, олигоклаз, островодужный первомайско-аюдагский интрузивный комплекс, мезозойды Горного Крыма

Для цитирования: Овсянников Г.Н., Спиридонов Э.М., Филимонов С.В. Плагиоклаз интрузивных пород островодужного первомайско-аюдагского комплекса Горного Крыма — от плагиолерцолитов до плагиогранитов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 85–95.

PLAGIOCLASE OF INTRUSIVE ROCKS FROM THE ISLAND ARC PERVOMAY-AYUDAG COMPLEX (MOUNTAIN CRIMEA) — FROM PLAGIOLERZOLITES TO PLAGIOGRANITES

Georgiy N. Ovsyannikov¹✉, Ernst M. Spiridonov², Sergey V. Filimonov³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Institute of volcanology and seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia george2098@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-4470-5788>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ernstspiridon@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; sefi@geol.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5487-8906>

Abstract. The Middle Jurassic hypabyssal island-arc pervomay-ayudag intrusive complex includes plagiolerzolites, olivine gabbro-norites, quartz gabbro-norites, quartz gabbro-norite-diorites, quartz diorites, plagiogranites. Ultramafic and mafic rocks contain anorthite (An_{92-90}) and bytownite (An_{89-73}). Plagiogranites containing andesine and oligoclase, up to albite-oligoclase (An_{19-9}). This composition of plagioclase is typical for island-arc rocks. Due to the abundance of anorthite and bytownite, which are poor in silica, many types of gabbroids of the pervomay-ayudag complex are enriched with quartz. Calcium-rich plagioclases of the complex are enriched with FeO up to 0.9 wt.%. From anorthite to oligoclase, the K_2O content gradually increases up to 1.4 wt.%. During the alteration process, plagioclase significantly depletes with K_2O . In the gabbroids of the central parts of intrusive bodies, the elongation of plagioclase crystals from anorthite to andesine is 2–5, usually 3–4. The porphyritic gabbroids of the quenching zone contain long-prismatic plagioclase crystals with elongation up to 10, and the fine-grained matrix contains skeleton crystals.

Keywords: anorthite, bytownite, labradorite, andesine, oligoclase, pervomay-ayudag intrusive complex, mezo-zoids of Mountainous Crimea

For citation: Ovsyannikov G.N., Spiridonov E.M., Filimonov S.V. Plagioclase of intrusive rocks from the island arc pervomay-ayudag complex (Mountain Crimea) — from plagiolerzolites to plagiogranites. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 85–95. (In Russ.).

Введение. Согласно исследованиям авторов и других ученых [Спиридонов и др., 1989, 1990, 2019a, 2023; Meijers et al., 2010; Nikishin et al., 2015; Popov et al., 2019], в мезозоидах Горного Крыма существовала среднеюрская — байосская вулканическая островная дуга, протянувшаяся от района Севастополя и Симферополя до Карадага. В байосское время произошел всплеск магматической активности в мезозоидах Горного Крыма — возникла толща шаровых лав базальтов Балаклавы, затем внедрились интрузивы первомайско-аюдагского габбронорит-плагиогранитного комплекса, которые пересечены субвулканическими телами и дайками базальтов и андезитов бодракского субвулканического комплекса, накопились вулканыты карадагской вулканической серии [Фирсов, 1963; Багдасарян, Лебединский, 1967; Лебединский, Шалимов, 1967; Спиридонов и др., 1990, 2019b; Никитин, Болотов, 2006–2007]. Широкое распространение анортита во многих типах пород первомайско-аюдагского комплекса [Кравченко, 1958; Спиридонов и др., 1990–2023] исключило гипотезу о гранитоидной природе интрузивов Южного Крыма, выдвинутую в работе [Павлинов, 1946]. При эпигенетическом региональном низкоградном метаморфизме позднеюрского возраста среднеюрские магматические породы были в значительной степени превращены в зеленокаменные [Спиридонов, 1989]. Ранее эффект превращения юрских вулканитов Крыма в зеленокаменные и палеотипные описали Д.И. Щербаков [1915] и Ф.Ю. Левинсон-Лессинг [1929]. Низкоградный метаморфизм проявлен крайне неоднородно. Поэтому удалось обнаружить значительное количество довольно свежих интрузивных пород островодужного первомайско-аюдагского комплекса, детально изучить их минеральный состав, получить массу анализов плагиоклаза. Это позволило дать надежные наименования широкому кругу магматических горных пород Горного Крыма.

Геология Горного Крыма. Горный Крым — это мезозойское покровно-складчатое сооружение, состоящее из северной Лозовской и южной Горнокрымской тектонических зон [Милеев и др., 2009]. Значительную часть складчатого комплекса составляют терригенные флишевые толщи T_2 – J_1 таврической и эскиордынской серий, сложно дислоцированные и несогласно перекрытые J_2 угленосными конгломерат-песчано-глинистыми толщами, заметно дислоцированными [Муратов, 1973, Милеев и др., 2009; Nikishin et al., 2015]. По геофизическим данным мощность блоков терригенных пород — до 4,5 км. Более древние толщи составляют ядра Качинского, Южнобережного и Туакского поднятий.

Терригенные толщи пересечены и контактово метаморфизованы небольшими по размерам интрузивами островодужного среднеюрского раннебайосского первомайско-аюдагского комплекса, которые развиты в Горно-Крымской (Аю-Даг, Балаклава, Лебединский, Донузоран и др.) и в Лозовской зоне (Первомайский-Кушнарёвский, Джидайский и др.)

[Спиридонов и др., 1990; 2022]. Байосский возраст интрузивных пород первомайско-аюдагского комплекса подтвержден изотопными датировками по циркону [Морозова и др., 2012; 2017]. Данный комплекс объединяет распространенные в Горном Крыму штоки, нередко куполовидные — ранее их часто именовали лакколитами [Лучицкий, 1939; Павлинов, 1946; Кравченко, 1958; Муратов, 1973], дайкообразные и силлообразные тела [Лебединский, Шалимов, 1967; Латыпов, Панов, 2008] габбронорит-долеритов от оливиновых до кварцевых (с обособлениями плагиоцерцолитов), кварцсодержащих и кварцевых габбронорит-диоритов и кварцевых диоритов (с шлирами и жилами гранодиоритов, плагиогранитов и гранофировых гранитов), плагиогранитов. Родоначальные для первомайско-аюдагского комплекса расплавы внедрялись механически активно, дополнительно сминая, раздвигая и пронизывая дислоцированные породы рамы [Спиридонов и др., 1990; 2019b; 2021; 2023].

Интрузивы первомайско-аюдагского комплекса: Аю-Даг и Кушнарёвский — Первомайский пересечены жерлами лавовых брекчий, субвулканическими дайками базальтов и андезитов позднебайосской островодужной бодракско-карадагской вулканической серии [Спиридонов и др., 1990; Никитин, Болотов, 2006–2007].

В процессе накопления многокилометровых терригенно-карбонатных толщ позднеюрского возраста и последующего их шарьирования [Милеев и др., 2009] допозднеюрские осадочные, вулканические толщи и интрузивные тела были погружены на глубину не менее 5–7 км, в той или иной степени тектонизированы и захвачены низкоградным метаморфизмом в условиях цеолитовой, а затем пренит-пумпеллиитовой фаций. При этом, магматические породы в различной степени были замещены агрегатами альбита, хлорита, клиноцоизита, смектитов, иддингсита, кальцита и иных карбонатов, пренита, пумпеллиита, ломонтита и иных цеолитов, лизардита, антигорита, пирита [Спиридонов, 1989; Спиридонов и др., 2023]. Окатанные обломки зеленокаменно измененных магматических пород среднеюрского возраста входят в состав конгломератов терминальной юры — раннего мела (берриас) [Муратов, 1973].

Интрузивы первомайско-аюдагского комплекса. Изучены интрузивы двух тектонических зон Горного Крыма. В Горнокрымской тектонической зоне интрузивы комплекса размещены в зоне Салгино-Октябрьского разлома северо-северо-западного простирания, поперечного к простиранию складчатых структур региона (Аю-Даг, ЮЗ Кастель). В Лозовской тектонической зоне, в бассейнах рек Бодрак и Салгир размещение интрузивов комплекса контролирует зона субширотного Бодракского разлома (интрузивы Лебединского, Джидай, Донузоран, Первомайский).

Интрузивные тела Балаклавы обнажены в береговых обрывах под Севастополем (N 44,501174,

Е 33,514038). Серия дайкообразных и линзообразных тел СВ и ССВ простирается с поперечником до первых сотен метров сложены преимущественно плагиоцеролитами и оливиновыми габбронорит-долеритами, восточнее — преимущественно безоливиновыми габбронорит-долеритами и долеритами. [Спиридонов и др., 2019]. В центре интрузивов развиты среднезернистые, изредка средне-крупнозернистые плагиоцеролиты с обильными псевдоморфозами серпентина по оливину с вкрапленностью хромшпинелидов, псевдоморфозами серпентина по ромбопироксену, авгитом, армоколлитом, плагиоклазом от анортита до лабрадора, магнезиальным ильменитом. Эти породы ранее были описаны как пикриты [Плошко и др., 1979]. Эндоконтактовые зоны обычно сложены мелкозернистыми оливиновыми габбронорит-долеритами. Интрузивы сильно тектонизированы, их контакты сорваны, породы брекчированы и интенсивно серпентинизированы. Вмещают интрузивы Балаклавы подушечные лавы базальтов байоса [Лебединский, Шалимов, 1967].

Интрузив ЮЗ склона г. Кагель протягивается вдоль западного склона горы Кагель, местами соприкасаясь с более молодым интрузивом фаялитовых плагиогранитов. В центре (N 44,635465, E 34,380855) интрузив сложен среднезернистыми габбронорит-долеритами, краевые зоны — мелкозернистыми габброидами. Интрузив прорвал и контактово метаморфизовал сложно дислоцированный флиш таврической серии. В составе интрузивных пород — плагиоклаз от анортита до андезина, авгит, бронзит, гиперстен, реликтовый хромшпинелид, титаномagnetит, ильменит, апатит и типичные для комплекса редкие акцессории — бадделит, цирконолит, чевкинит.

Интрузив Аю-Даг (N 44,557147, E 34,335593) — самый крупный интрузив первомайско-аюдагского комплекса с поперечником 3×2 км. Имеет многокупольную вытянутую форму, сложное строение. Интрузив сложен среднезернистыми, средне-крупнозернистыми, реже пегматоидными и порфировидными средне-мелкозернистыми кварцевыми и кварц-содержащими габбронорит-долеритами, кварцевыми габбронорит-диоритами и кварцевыми диоритами с шширами и жилами гранодиоритов, плагиогранитов и гранофировых гранитов; для габброидов Аю-Дага характерны такситовые, нередко полосчатые текстуры и складки магматического течения, светлые полосы слагают анортит и битовнит, темные обогащены пироксенами и титаномagnetитом (рис. 1, а-в) [Кравченко, 1958; Лебединский, Шалимов, 1967; Спиридонов и др., 1990–2023]. Породы слагают плагиоклаз от анортита до олигоклаза, авгит, бронзит, пжонит, гиперстен, ферроавгит, феррошиперстен, паргасит и эденит (редкие), биотит, кварц, титаномagnetит, ильменит, апатит, акцессорные бадделит, цирконолит, чевкинит-Се, перрьерит-Се, алланит-Се, циркон, торит [Спиридонов и др., 2018; 2019в; 2022].

Аюдагский интрузив окружен ореолом контактового метаморфизма шириной 5–10 м. Его образуют узловатые сланцы и роговики актинолит-роговиковой фации; роговики с биотитом, андалузитом, турмалином, магнетитом амфибол-роговиковой фации, роговики с силлиманитом — пироксен-роговиковой фации [Кравченко, 1958].

Шток Донузоран размером около 30×30 м залегает среди терригенного флиша таврической серии в верховьях одноименного оврага (N 44,753208, E 34,020270). Порфировидные мелкозернистые габбронорит-долериты слагают зональный плагиоклаз от анортита до олигоклаза, псевдоморфозы серпентина по оливину с массой включений хромшпинелидов, реликты авгита и ромбопироксена, биотит, кварц, армоколлит, титаномagnetит, ильменит, апатит и иные акцессорные минералы.

Силлообразный интрузив Лебединского (это так называемый силл Лебединского) и сходные с ним расположены в 5 км выше по течению р. Бодрак от пос. Трудолюбовка (N 44,752948, E 34,051047). Обнаружено три интрузива, субсогласных напластованию на крыле крупной круто залегающей складки флишевой толщи. Мощность тел составляет 4–7 м, длина — 1500–2000 м, мощность зон закалки до 1 м. Тонко- и мелкозернистые габбро-долериты эндоконтакта содержат миндалины с кальцитом и иными метаморфогенными минералами. Центральные части тел слагают среднезернистые массивные оливиновые габбронорит-долериты. В том месте, где река Бодрак течет поперек интрузива Лебединского, интрузив пересекает ороговикованный флиш таврической серии перпендикулярно слоистости, наблюдаются и апофизы габбро-долеритов мощностью до 20 см во вмещающие породы. Около этих тел аргиллиты таврической серии заметно контактово метаморфизованы [Латышев, Панов, 2007].

В центре силлообразного интрузива Лебединского среди преобладающих оливиновых габбронорит-долеритов развиты участки оливинсодержащих, кварцсодержащих и кварцевых габбронорит-долеритов. Кварцевые габбронорит-долериты содержат заметное количество биотита и алланита-Се. Эти горные породы слагают плагиоклаз от анортита — битовнита до олигоклаза, псевдоморфозы серпентина по оливину с включениями хромшпинелидов, псевдоморфозы серпентина по ромбопироксену, авгит, биотит, кварц, армоколлит, титаномagnetит, ильменит, апатит, бадделит.

Джидайский интрузив — удлиненный шток размером 2,3×0,05–0,4 км, расположенный в бассейне одноименного оврага (N 44,782461, E 34,000265) сложен оливинсодержащими, кварцсодержащими и кварцевыми габбронорит-долеритами. В центре интрузива развиты средне-крупнозернистые породы. Породы эндоконтактовых зон, мощность которых достигает 15 м, — порфировидные мелкозернистые, нередко миндалекаменные. Породы слагает плагиоклаз от битовнита до олигоклаза,

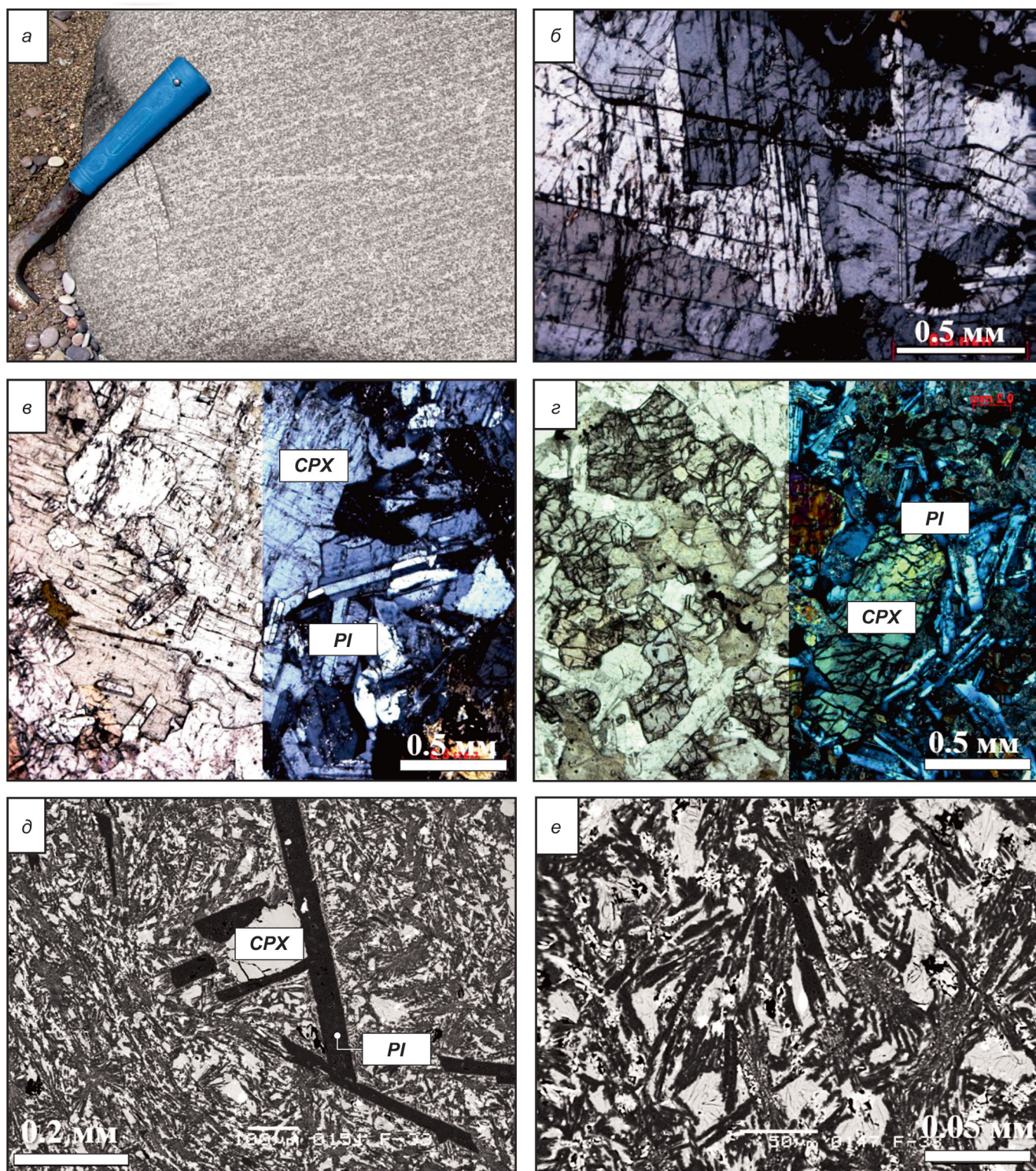


Рис. 1. Породы первомайско-аюдагского комплекса. *а* — габбронорит-долериты интрузива Аю-Даг с полосчатыми текстурами течения. Обнажение, светлые полосы обогащены плагиоклазом, темные — пироксенами и титаномagnetитом; *б* — прослой анортозитового состава в габбронорит-долеритах интрузива Аю-Даг — срастание кристаллов битовнита. Шлиф в проходящем свете, николи X; *в* — габбронорит-долериты интрузива Аю-Даг с пойкилофитовой структурой. В проходящем свете, слева — при 1 никеле, справа — николи X; *г* — оливиновые габбронорит-долериты интрузива Лебединского. В проходящем свете, слева — при 1 никеле, справа — николи X. CPX — пироксены, Pl — плагиоклаз; *д*, *е* — эффузивоподобные резко порфировидные микрогаббронорит-долериты с вкрапленниками длиннопризматического лабрадора и авгита (CPX). Удлиненные лейсты плагиоклаза частью расщеплены. Нижний эндоконтакт Ферсмановского (Лозовского) интрузива. В отраженных электронах

псевдоморфозы серпентина по оливину и ромбопироксену, авгит, кварц, титаномagnetит, ильменит, апатит и иные акцессории. Таблитчатые кристаллы

лабрадора и андезина нередко образуют текстуры течения. Вмещающие породы — терригенный флиш эскиордынской серии.

Первомайский (Кушнаревский) интрузив.

Этот шток размером около 400×100 м расположен в верховьях Кушнаревской балки (N 44,779564, E 34,027949). Внедрился в зону Бодракского разлома. Интрузив в нижней части сложен преимущественно мелкозернистыми бескварцевыми (с единичными кристаллами оливина), кварцсодержащими и кварцевыми габбронорит-долеритами, выше — мелкозернистыми кварцевыми габбронорит-диоритами и кварцевыми диоритами с заметным количеством биотита и множеством шлиров плагиогранитного состава с поперечником от первых мм до 15–25 см. В средней части интрузива известны вертикальные жилы плагиогранитов мощностью до 15 см с неровными «горячими» контактами. Верхняя часть интрузива сложена мелко- и среднезернистыми роговообманково-биотитовыми плагиогранитами. Мощность ороговикованных терригенных пород эскиординской серии до 10 м. С ними контактируют порфировидные микрогаббро-долериты.

Великолепная эпигенетическая метаморфогенная минерализация развита преимущественно в шлирах плагиогранитов среди габброидов; в ее составе — пренит, пумпеллиит, ломонтит, анальцит и иные цеолиты, апофиллит, актинолит, датолит, пирит и множество других метаморфогенно-гидротермальных образований.

Верхняя выветрелая часть интрузива служит основанием кораллового рифа раннемелового возраста (валанжин-готтерив) [Муратов, 1973; Никитин, Болотов, 2006].

Материалы и методы исследования. Изучена обширная коллекция пород первомайско-аюдагского комплекса Горного Крыма — плагиоцерциты интрузива Балаклавы; оливиновые габбронорит-долериты Лебединского, Донузوران, Уртопай, Джидайрского и Балаклавы; бескварцевые и кварцевые габбронорит-долериты интрузивов Аю-Даг, Партенит, Лебединского, ЮЗ Кастели, Ферсмановского (Лозовского), Донузوران, Джидайрского, Первомайского; бескварцевые и кварцевые габбронорит-диориты интрузивов Аю-Даг, Джидайрского, Первомайского; кварцевые диориты и плагиограниты интрузива Первомайского, которую собрали Э.М. Спиридонов, Е.С. Семиколенных, Г.Н. Овсянников, С.В. Филимонов, Е.В. Путинцева, В.И. Лысенко, Арк.В. Тевелев, И.В. Шалимов.

Наши наблюдения показали, что уже при слабом проявлении регионально низкоградного метаморфизма в плагиоклазе заметно снижается содержание калия и существенно снижается содержание стронция и бария. Поскольку в Горном Крыму низкоградный метаморфизм в условиях цеолитовой и пренит-пумпеллиитовой фаций проявлен повсеместно и интенсивно [Спиридонов, 1989], при изучении магматических пород был проведен поиск наименее метаморфизованных образцов и для плагиоклаза мы ограничились анализом на основные химические элементы. Состав плагиоклаза определен в лабора-

тории локальных методов исследования вещества геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (аналитик-исследователь Н.Н. Коротаева). Количественный анализ выполнен с помощью электронного микроскопа с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max^N. Анализ выполнен в режиме сфокусированного зонда, ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока 0,7 нА, время экспозиции 100 с. Использованы стандарты USNM-133868, USNM-143966, USNM-746, USNM-164905 Национального института стандартов США [Jarosewich et al., 1980]. Получены многочисленные изображения в режиме отраженных электронов и более 200 полных анализов плагиоклаза. Из них отобрано 128 наиболее качественных анализов (анортит — 8, битовнит — 54, лабрадор — 29, андезин — 28, олигоклаз — 9), которые характеризуют вариации состава плагиоклаза в породах семи типичных интрузивах комплекса: Аю-Даг — 53 анализа, Первомайский — 15, Лебединского — 21, Донузوران — 16, ЮЗ Кастели — 13, Джидайрский — 7, Балаклава — 5. Пересчет на формулы выполнен на 32 атома кислорода, количества Fe²⁺ и Fe³⁺ рассчитаны по балансу зарядов. 28 представительных анализов плагиоклаза даны в табл. 1–5.

Плагиоклаз горных пород островодужного первомайско-аюдагского интрузивного комплекса. Горные породы комплекса сложены семью минеральными ассоциациями, которые в целом отвечают петрогенетической схеме Н.Л. Боуэна [Спиридонов и др., 2022].

Первую минеральную ассоциацию образуют кумулятивные **Mg оливин и алюмомагнезиохромит** [Спиридонов и др., 20196, 2023]. Минеральные ассоциации от 2 до 7 включают плагиоклаз и рассмотрены ниже. Подробное описание пород первомайско-аюдагского комплекса приведено в [Спиридонов и др., 2023]

Анортит. Анортит совместно с оливином, хромшпинелидами (алюмохромит до хромтитаномагнетита и Zn хромульвошпинели), магнезиальным бронзитом и эндиопсидом образуют *вторую минеральную ассоциацию* [Спиридонов и др., 1989, 20196, 2023]. Анортит слагает центральные части крупных кристаллов плагиоклаза — до 12 мм в пегматоидных габброидах (рис. 2–3). Удлинение его призматических кристаллов от 2 до 5, обычно 3–4. Состав варьирует незначительно. Наиболее кальциевый анортит развит в плагиоцерцитах Балаклавы — An_{94–91}. Оливиновые габбронорит-долериты Донузорана содержат An_{92–91}. Состав анортита габбронорит-долеритов Аю-Дага, Партенита и ЮЗ Кастели, в которых оливин растворен, но сохранились реликты хромшпинелида, — An_{91–90}, (табл. 1; рис. 2–3). Зональность в кристаллах анортита обычно выражена слабо. Более отчетливо она проявлена во вкрапленниках анортита в габброидах Кастели (рис. 2, б).

Битовнит совместно с магнезиальным авгитом, бронзитом, пижонитом, армолколитом, апатитом,

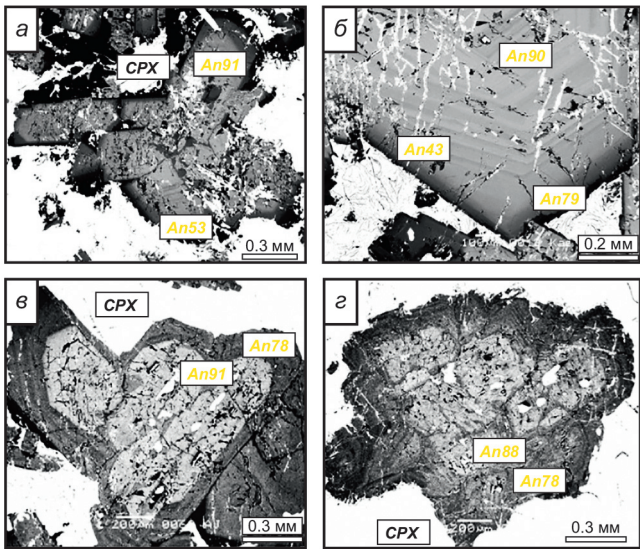


Рис. 2. а — анортит An91-90 (табл. 1, ан. 3 и 5) в ядрах крупных кристаллов плагиоклаза с четко выраженной оторочкой ритмично зонального битовнита An78-73 (серый) с каймами лабрадора An67-53 (черный) среди крупных выделений пироксенов (срх, белые). Вверху на анортит вместе с битовнитом нарос апатит (ар, белый). Габбронорит-долериты центра интрузива Аю-Даг; б — вкрапленник анортита An90 с каймой битовнита An79, лабрадора, андезина An43. Ксеноморфные пироксены (белые). Габбронорит-долериты с офитовой структурой. Интрузив ЮЗ Кастель. В анортите просечки и гнезда метаморфогенного клиноцоизита (czo, светлые); в, з — анортит An91 (табл. 1, ан. 1 и 2) с включениями магнезиального бронзита и эндиопсида (светлые), с резко выраженной оторочкой ритмично зонального битовнита An79-73 (серый) с каймами лабрадора An69-58 (черный) среди крупных выделений пироксенов (белые). Габбронорит-долериты центра интрузива Аю-Даг. Желтые цифры — состав плагиоклаза An мол. %. В отраженных электронах

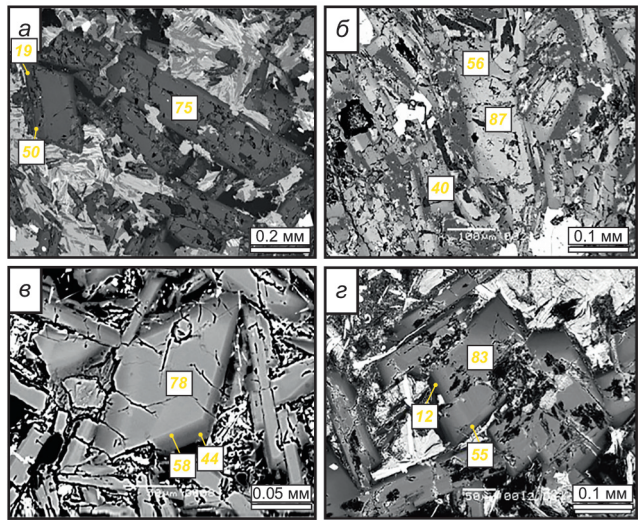


Рис. 3. Битовнит: а, в — кристаллы битовнита с каймами лабрадора и андезина. Кварцевые габбронорит-долериты Первомайского интрузива. б, з — таблицы битовнита с каймами лабрадора, андезина, олигоклаза. Оливиновые габбронорит-долериты интрузивов Джидайр (б) (табл. 2, ан. 10) и Донузоран (з). В отраженных электронах. Цифры — состав плагиоклаза An мол. %

Таблица 1

Химический состав (масс.%) анортита габброидов интрузива Аю-Даг

Компоненты	1	2	3	4	5
SiO ₂	44,55	45,06	44,87	44,70	45,41
Al ₂ O ₃	34,68	37,60	34,69	34,70	37,25
Fe ₂ O ₃	0,57	0,55	0,71	0,48	0,48
CaO	18,48	18,59	18,36	18,28	18,32
Na ₂ O	0,92	0,98	1,02	1,09	1,09
K ₂ O	0,06	0,04	0,05	нпо	0,04
сумма	99,26	102,82	99,70	99,25	102,59
Число атомов в формуле					
Si	8,28	8,07	8,30	8,30	8,15
Al	7,60	7,93	7,57	7,59	7,87
Fe ³⁺	0,09	0,08	0,11	0,08	0,07
сумма	15,97	16,08	15,98	15,97	16,09
Ca	3,69	3,57	3,64	3,64	3,52
Na	0,33	0,34	0,37	0,39	0,38
K	0,01	0,01	0,01	—	0,01
сумма	4,03	3,92	4,02	4,03	3,91
O	32				
An, мол.%	91,6	91,1	90,5	90,3	90,1
Ab, мол.%	8,2	8,7	9,2	9,7	9,7
Or, мол.%	0,2	0,2	0,3	—	0,2

Примечание. Здесь и далее количество Fe²⁺ и Fe³⁺ рассчитано по балансу зарядов. нпо — ниже предела обнаружения.

пирротинном образуют *третью минеральную ассоциацию*. Минеральные агрегаты третьей ассоциации образуют большую часть объема множества интрузивов первомайско-аюдагского комплекса. Часть битовнита развита в виде оторочек на кристаллах анортита (рис. 2), большая часть слагает обособленные кристаллы (рис. 1, б) и ядра зональных кристаллов (рис. 3); в породах эндоконтакта — мелкие таблитчатые кристаллы.

Рисунок зональности ряда кристаллов битовнита резко отличен от рисунка зональности кристаллов анортита. На кристаллах битовнита отсутствуют следы растворения в магматических условиях. Вероятно, формирование битовнита произошло в условиях, существенно отличных от условий кристаллизации анортита.

Удлинение кристаллов битовнита от 2 до 5,5, обычно составляет 3–4. Высоко кальциевый битовнит развит в плагиолерцолитах Балаклавы — An_{89–83} и в оливиновых габбронорит-долеритах интрузивов Донузоран An_{89–79}, Джидайрский An_{89–78}, Лебединский An_{88–80}. Не столь высоко кальциевый битовнит развит в бескварцевых и кварцсодержащих габбронорит-долеритах Аю-Дага — Партенита An_{84–73}, Первомайского (Кушнарёвского) — An_{84–74}, Ферсмановского (Лозовского, южных Курцов) — An_{81–79}, ЮЗ Кастели — An₇₉.

Таблица 2

Химический состав (масс.%) битовнита габбронорит-долеритов интрузивов: ЮЗ Кастели (ан. 6), Первомайского (ан. 7), Донузоран (ан. 8), Лебединского (ан. 9), Джидайрского (ан. 10), Аю-Даг (ан. 11)

Компоненты	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	45,21	46,56	47,53	47,47	47,43	48,53
Al ₂ O ₃	34,31	33,03	34,98	32,82	32,55	31,77
Fe ₂ O ₃	0,61	0,65	0,66	0,75	0,86	0,69
CaO	17,93	16,86	16,39	16,56	16,04	15,18
Na ₂ O	1,19	1,74	2,06	2,11	2,26	2,89
K ₂ O	нпо	0,10	0,09	0,09	0,09	0,07
сумма	99,25	98,94	101,71	99,8	99,23	99,13
Число атомов в формуле						
Si	8,40	8,65	8,56	8,73	8,77	8,94
Al	7,51	7,24	7,43	7,12	7,09	6,90
Fe ³⁺	0,09	0,10	0,10	0,11	0,13	0,11
сумма	16,00	15,99	16,09	15,96	15,99	15,95
Ca	3,57	3,36	3,17	3,26	3,18	3,00
Na	0,43	0,63	0,72	0,76	0,81	1,03
K	–	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
сумма	4,00	4,01	3,91	4,04	4,01	4,05
O	32					
An, мол.%	89,3	83,8	81,1	80,7	79,3	74,1
Ab, мол.%	10,7	15,6	18,4	18,8	20,2	25,5
Or, мол.%	–	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4

Химический состав битовнита дан в табл. 2. Судя по результатам пересчета, Fe в составе битовнита (табл. 2) и анортита (табл. 1) крымских габброидов — трехвалентное.

Лабрадор совместно с железистым авгитом, гиперстеном, магнезиальным ильменитом, титаномagnetитом, апатитом, чевкинитом (Ce), бадделейтом, цирконолитом, халькопиритом слагает четвертую минеральную ассоциацию [Спиридонов и др., 2018, 2019в]. Агрегаты минералов 4 ассоциации слагают значительную часть объема множества интрузивов первомайско-аюдагского комплекса.

Лабрадор распространен довольно широко, формирует каймы на кристаллах битовнита, слагает отдельные кристаллы, лейсты лабрадора «обтекают» вкраплиники авгита и срastaются с его внешними зонами; лабрадор иногда содержит вростки апатита (рис. 2, а; 4). Удлинение кристаллов 2,5–5, обычно около 3–4. Высоко кальциевый лабрадор развит в габбронорит-долеритах интрузивов Джидайрский An_{69–52}, Лебединский An_{66–51}, ЮЗ Кастели An_{64–57}; умеренно кальциевый — в габброидах Первомайского An_{60–51} и Аю-Дага An_{59–52}; низко кальциевый — в габброидах Донузорана An_{55–51} (табл. 3). Содержание калия невелико, но заметно выше, чем в анортите и битовните. Как следует из пересчетов анализов лабрадора, вероятная валентность железа

Таблица 3

Химический состав (масс.%) лабрадора габброидов интрузивов: Аю-Даг (ан. 12), ЮЗ Кастели (ан. 13), Лебединского (ан. 14), Первомайского (ан. 15), Балаклавы (ан. 16), Джидайрского (ан. 17)

Компоненты	12	13	14	15	16	17
SiO ₂	50,6	52,18	53,01	53,22	53,87	54,72
Al ₂ O ₃	31,1	29,47	29,58	28,63	27,46	27,75
Fe ₂ O ₃	0,91	0,58	0,41	0,04	0,65	0,53
FeO	–	0,13	0,16	0,58	0,33	0,25
CaO	14,04	12,58	11,68	11,49	10,59	10,61
Na ₂ O	3,45	4,25	4,55	4,60	5,09	5,21
K ₂ O	0,16	0,10	0,28	0,30	0,31	0,37
сумма	100,26	99,29	99,67	98,86	98,29	99,44
Число атомов в формуле						
Si	9,21	9,55	9,63	9,76	9,92	9,95
Al	6,67	6,35	6,34	6,18	5,96	5,95
Fe ³⁺	0,13	0,08	0,06	0,01	0,09	0,07
сумма	16,01	15,98	16,03	15,95	15,97	15,97
Ca	2,74	2,47	2,28	2,26	2,09	2,06
Fe ²⁺	–	0,02	0,02	0,09	0,05	0,04
Na	1,21	1,51	1,60	1,63	1,82	1,85
K	0,04	0,02	0,07	0,07	0,07	0,08
сумма	3,99	4,02	3,97	4,05	4,03	4,03
O	32					
An, мол.%	68,6	61,7	57,7	57,0	52,5	51,8
Ab, мол.%	30,5	37,7	40,7	41,3	45,7	46,0
Or, мол.%	0,9	0,6	1,6	1,8	1,8	2,2

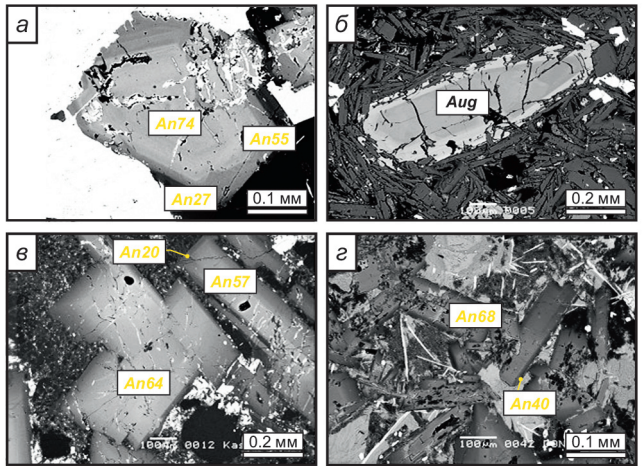


Рис. 4. Лабрадор: а — каймы лабрадора и андезина на кристаллах битовнита. Кварцевые габбронорит-долериты Аю-Дага, б — лейсты лабрадора обтекают вкраплиник авгита (Aug). Габбронорит-долериты Первомайского, в — срастание таблиц лабрадора с каймами андезина и олигоклаза. Габбронорит-долериты ЮЗ Кастели, г — таблицы лабрадора с каймами андезина. Оливиновые габбронорит-долериты Донузорана. Игольчатые кристаллы апатита (белые). В отраженных электронах. Цифры — состав плагиоклаза An мол. %

Таблица 4

Таблица 5

Химический состав (масс.%) андезина кварцевых габброидов интрузивов: Лебединского (ан. 18), Джидайрского (ан. 19), Балаклары (ан. 20), Первомайского (ан. 21), ЮЗ Кастели (ан. 22), Аю-Даг (ан. 23)

Компоненты	18	19	20	21	22	23
SiO ₂	55,46	56,08	56,07	56,69	55,83	59,06
Al ₂ O ₃	27,59	26,79	26,30	26,77	26,21	25,74
Fe ₂ O ₃	0,46	–	–	–	0,37	–
FeO	–	0,57	0,70	0,39	0,09	0,30
CaO	10,29	9,34	9,11	9,07	8,75	7,75
Na ₂ O	5,58	5,85	5,9	5,88	6,22	6,92
K ₂ O	0,33	0,33	0,33	0,60	0,20	0,29
сумма	99,71	98,96	98,41	99,40	97,67	100,06
Число атомов в формуле						
Si	10,03	10,20	10,26	10,27	10,27	10,57
Al	5,88	5,75	5,68	5,71	5,68	5,43
Fe ³⁺	0,07	–	–	–	0,05	–
сумма	15,98	15,95	15,94	15,98	16,00	16,00
Ca	1,99	1,83	1,78	1,76	1,72	1,48
Fe ²⁺	–	0,08	0,11	0,06	0,01	0,95
Na	1,95	2,06	2,09	2,06	2,22	2,40
K	0,08	0,08	0,08	0,14	0,05	0,07
сумма	4,02	4,05	4,06	4,02	4,00	4,00
O	32					
An, мол.%	49,5	46,0	45,1	44,4	43,2	37,6
Ab, мол.%	48,6	52,1	52,8	52,1	55,6	60,7
Or, мол.%	1,9	1,9	1,9	3,5	1,2	1,7

в его составе Fe³⁺ и Fe²⁺. Это коррелируется с обилием титаномagnetита в 4 минеральной ассоциации.

Андезин совместно с титаномagnetитом, ферроавгитом, эденитом, ильменитом и апатитом составляет пятую минеральную ассоциацию. Минеральные агрегаты пятой ассоциации занимают незначительную часть объема множества интрузивов первомайско-аюдагского комплекса. Широко распространены узкие каймы андезина вокруг кристаллов более кальциевого плагиоклаза и единичные мелкие кристаллы андезина в бескварцевых и кварцевых габбронорит-долеритах (рис. 2, б; 3; 4, г). Небольшие зональные кристаллы андезина составляют основную ткань кварцсодержащих и кварцевых габбронорит-диоритов и кварцевых диоритов интрузива Первомайского, где образуют текстуры течения. Удлинение кристаллов андезина от 2–2,5 (рис. 5) до 3–4.

Наиболее кальциевый андезин развит в габброидах интрузивов Джидайрский — An_{49–40}, Первомайский — An_{49–33}, Аю-Даг — An_{48–33}, ЮЗ Кастель — An₄₃; умеренно кальциевый — в габброидах интрузивов Лебединского — An_{44–30} и Донузран — An₄₀.

Содержание калия в андезине невелико, но заметно выше, чем в лабрадоре (табл. 4). Как следует из пересчетов анализов, вероятная валентность железа в андезине Fe³⁺ и чаще Fe²⁺, что коррелируется с на-

Химический состав (масс.%) олигоклаза кварцевых габброидов Аю-Дага (ан. 24 и 27) и ЮЗ Кастели (ан. 25 и 28), плагиогранитов интрузива Первомайский (ан. 26)

Компоненты	24	25	26	27	28
SiO ₂	61,33	61,51	64,07	64,32	65,6
Al ₂ O ₃	24,39	23,10	23,94	22,23	21,75
Fe ₂ O ₃	нпо	–	0,30	–	–
FeO	нпо	0,26	–	0,21	0,22
CaO	5,68	5,09	4,12	3,47	2,77
Na ₂ O	8,19	8,27	8,98	8,77	9,18
K ₂ O	0,32	0,51	0,79	0,99	1,39
сумма	99,91	98,74	102,20	99,99	100,91
Число атомов в формуле					
Si	10,91	11,07	11,11	11,42	11,51
Al	5,11	4,90	4,89	4,65	4,50
Fe ³⁺	–	–	0,04	–	–
сумма	16,02	15,97	16,04	16,07	16,01
Ca	1,08	0,98	0,76	0,66	0,52
Fe ²⁺	–	0,04	–	0,03	0,03
Na	2,83	2,89	3,02	3,02	3,13
K	0,07	0,12	0,18	0,22	0,31
сумма	3,98	4,03	3,96	3,93	3,99
O	32				
An, мол.%	27,2	24,6	19,3	16,9	13,2
Ab, мол.%	71,0	72,4	76,3	77,3	79,0
Or, мол.%	1,8	2,9	4,4	5,7	7,9

личием богатых Fe²⁺ пироксенов в 5 минеральной ассоциации.

Олигоклаз вместе с кварцем, биотитом, алланитом-(Ce), цирконом, апатитом образует шестую минеральную ассоциацию горных пород первомайско-аюдагского комплекса, широко развитую в верхней части Первомайского интрузива. Олигоклаз формирует внешние тонкие каймы кристаллов плагиоклаза в кварцсодержащих породах и коротко призматические кристаллы в кварцевых диоритах и плагиогранитах Первомайского интрузива. Наиболее кальциевый олигоклаз развит в кварцевых габброидах и габбронорит-диоритах интрузивов Первомайский — An_{28–18} и Аю-Даг — An_{27–14}; менее кальциевый в габброидах интрузивов Лебединского — An₂₂ и ЮЗ Кастели — An₂₀.

Олигоклаз содержит заметное количество калия (табл. 5). Как следует из пересчетов анализов, вероятная валентность железа в олигоклазе Fe³⁺ и чаще — Fe²⁺, что коррелируется с наличием высокожелезистого биотита в шестой минеральной ассоциации.

Альбит-олигоклаз и натровый олигоклаз вместе с кварцем, железистым биотитом до аннита, акцессорными фторопатитом, алланитом-(Ce), цирконом, K-Na полевым шпатом образуют наиболее позднюю — седьмую минеральную ассоциацию по-

род первомайско-аюдагского комплекса. Нередко это графические кварц-полевошпатовые сростания в промежутках кристаллов плагиоклаза, пироксенов, титаномagnetита (рис. 5). Графические сростания распространены в габброидах Аю-Дага и Партенита, в плагиогранитоидах Первомайского.

Обсуждение результатов. Особенность различных дифференциатов островодужного первомайско-аюдагского комплекса Горного Крыма — обилие анортита и битовнита — впервые установил С.М. Кравченко [1958]. Это характернейшая особенность островодужных магматических пород [Волинец, Колосков, 1976; Волинец и др., 1978; Кумеев, 1982; Almeev et al., 2013; Давыдова и др., 2018; Спиридонов и др., 2019а и мн. др.]. Как известно, островодужные магмы возникают при повышенном P_{H_2O} , которое понижает температуру кристаллизации анортита с 1600 °С в сухой системе до 1250–1300 °С при $P_{H_2O} = 5$ кб [Yoder et al., 1956–1957; Housh, Luhr, 1991]. Вероятно, это — основная причина обилия высоко кальциевого плагиоклаза в островодужных магматических породах.

Эволюцию состава плагиоклаза пород первомайско-аюдагского комплекса иллюстрирует рис. 6. На диаграммах приведены данные для 128 кристаллов свежих пород и 10 кристаллов плагиоклаза пород, низкоградно метаморфизованных.

Рисунок 6, а иллюстрирует известный тренд накопления калия в более натровом плагиоклазе. Но уровни накопления различаются в различных магматических формациях. В трондьемитах и плагиогранитах океанской стадии развития складчатых областей содержание калия в альбит-олигоклазе и натровом олигоклазе обычно менее 0,5 масс.% K_2O . В олигоклазе изученной островодужной формации мезозойд Горного Крыма до 1,4 масс.% K_2O , что почти аналогично молодым островодужным магматическим породам Камчатки [Волинец, Колосков, 1976; Давыдова и др., 2018].

Рисунок 6, б иллюстрирует вариации содержания железа в плагиоклазе первомайско-аюдагского комплекса. Для всех интрузивных тел первомайско-аюдагского комплекса (кроме самого крупного — Аю-Дага) характерны повышенные содержания железа в наиболее кальциевом плагиоклазе. Для интрузива Аю-даг установлен рост содержания железа от анортита An_{92} к битовниту An_{70} , возможная причина приведена далее. В более кремнекислых породах Аю-Дага содержание железа в плагиоклазе падает при снижении кальциевости, как и в иных интрузивах комплекса.

Вхождение железа в состав плагиоклаза — процесс, контролируемый температурой и составом расплава, давлением флюида в системе, изоморфизмом, наличием иных железосодержащих фаз. В плагиоклазе первомайско-аюдагского комплекса наблюдается характерная для толетитовых пород особенность: смена валентной формы железа — снижение содержания Fe^{3+} и повышение содержания Fe^{2+} со

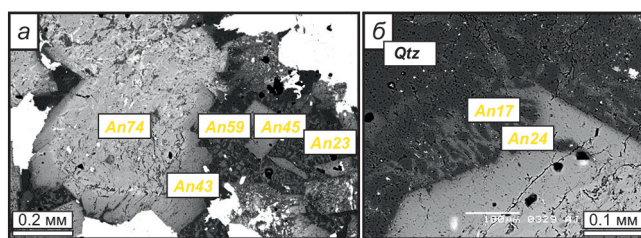


Рис. 5. Графические кварц-олигоклазовые сростания в промежутках кристаллов битовнита, лабрадора, андезина и пироксенов; справа — около скелетного кристалла андезина с тонкой каймой олигоклаза. Qtz — кварц. Порфирировидные кварцевые габбронорит-диориты интрузива Партенит. В отраженных электронах. Цифры — состав плагиоклаза An мол. %

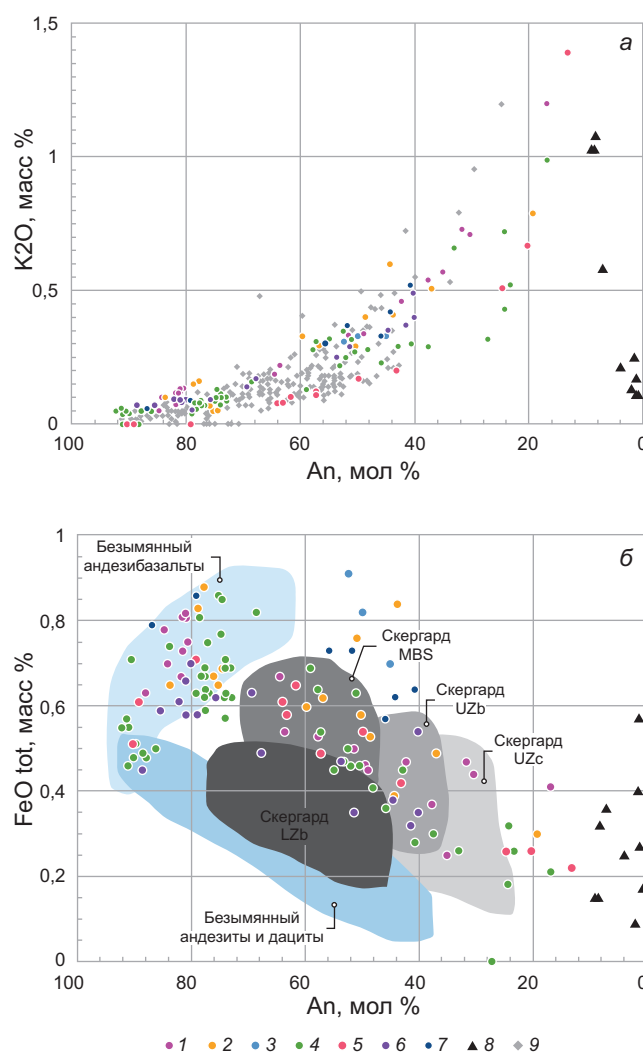


Рис. 6. Диаграмма состава плагиоклаза пород первомайско-аюдагского интрузивного комплекса в координатах: а — содержание анортита (мол. %) — содержание калия (масс. %). б — содержание анортита (мол. %) — содержание железа (масс. %). Плагиоклаз интрузивов: 1 — Лебединского, 2 — Первомайского (Кушнаревского) 3 — Балаклавы, 4 — Аю-Даг, 5 — ЮЗ Кастели, 6 — Донузоран, 7 — Джидайр, 8 — плагиоклаз низкоградно метаморфизованных пород (данные авторов). 9 — плагиоклаз островодужных пород вулканов Безымянный, Ключевской, Шивелуч, Плоские сопки, Камень [Давыдова и др., 2018, Almeev et al., 2013]. Поля составов плагиоклаза для пород вулкана Безымянный по [Almeev et al., 2013], для пород интрузива Скергард по [Humphreys, 2011]

снижением кальциевости. Но авторы статьи [Lundgaard, Tegner, 2004] свидетельствуют, что данный фактор имеет второстепенное значение в сравнении с температурой и составом расплава. Тем самым, по распределению и характеру эволюции железа в составе плагиоклаза нельзя судить о формационной принадлежности магматических пород. Например, андезибазальты Безымянного вулкана [Almeev et al., 2013] (известково-щелочная островодужная серия) эволюционируют преимущественно с увеличением содержания железа в составе плагиоклаза, тогда как другие породы центра (более кремнекислые) — с уменьшением (см. рис. 6, б). В расслоенном интрузиве Скергард (внутриплитные толеиты) для каждого элемента расслоенной серии характерна своя эволюция содержаний железа в плагиоклазе [Humphreys, 2011] (рис. 6, б): плагиоклазы зоны LZb лежат в области плагиоклазов Безымянного вулкана, а плагиоклазы UZc и UZb частично перекрывают область Безымянного вулкана и первомайско-аюдагского комплекса. Авторы [Lundgaard, Tegner, 2004] отмечают, что содержание железа в плагиоклазе крупных толеитовых интрузивов (Скергард, Стилутер, Бушвельд), как правило, не превышает 0,5 масс.%, тогда как для их эффузивных аналогов и известково-щелочных островодужных пород этот показатель нередко выше 0,5 масс.%. Наше исследование подтверждает это наблюдение. Повышенные содержания железа также установлены в богатом анортитом плагиоклазе пород Луны [Фрондел, 1968] и островодужных вулканитах Камчатки [Волынец, Колосков, 1976; Леснов и др., 1978; Almeev et al., 2013].

Заключение. Состав плагиоклаза раннебайосского первомайско-аюдагского интрузивного комплекса — островодужной плагиоцерцолит — габбронорит-долерит — габбронорит-диорит — кварцеводиорит — плагиогранитной формации Горного Крыма варьирует от An_{92} до An_{14} . Характерная особенность — обилие анортита An_{92-90} и битовнита An_{89-73} , которых нет только в кварцевых диоритах и плагиогранитах. Установлено соответствие выявленных особенностей плагиоклаза крымских пород тем закономерностям, которые присущи четвертичным островодужным вулканитам Камчатки. Это дополнительный аргумент в пользу островодужной

природы изученных крымских магматических пород.

В изученных породах от анортита к олигоклазу содержание калия растет по экспоненте от 0,05 до 1,4 масс.%, K_2O . Это общеизвестная зависимость для магматического плагиоклаза [Yoder et al., 1956–1957]. Конкретно такой уровень содержания калия характерен для островодужных магматических пород, в океанических толеитах — он ниже, в магматитах повышенной щелочности — значительно выше [Волынец, Колосков, 1976; Волынец и др., 1978; Кумеев, 1982; Давыдова и др., 2018; Спиридонов и др., 2019a].

Для всей серии пород первомайско-аюдагского комплекса от плагиоцерцолитов до плагиогранитов содержания железа выше в более кальциевом плагиоклазе — до 0,9–1,0 масс.% FeO_{tot} . В интрузиве Аю-Даг эволюция содержания железа в плагиоклазе более сложная; возможно, это обусловлено потерей железа анортитом и битовнитом при отжиге в этом наиболее крупном интрузиве комплекса. Пересчет прецизионных анализов плагиоклаза показал, что в анортите и битовните вероятно преобладает Fe^{3+} (табл. 1; 2), в лабрадоре — примерно равные количества Fe^{3+} и Fe^{2+} (табл. 3), в андезине и олигоклазе преобладает Fe^{2+} (табл. 4; 5). Для андезина и олигоклаза это коррелируется с особенностями состава парагенных темноцветных минералов.

Наши наблюдения и анализ литературных данных свидетельствуют, что содержание железа в плагиоклазе не является надежным критерием формационной принадлежности магматических пород.

В низкоградно метаморфизованных крымских породах в составе плагиоклаза снижено содержание кальция и калия, содержание железа не изменилось.

Благодарности. Авторы благодарны рецензентам Е.В. Кислову и анонимному рецензенту, а также А.Л. Перчуку и А.А. Арискину за внимание к нашей работе и конструктивные замечания.

Финансирование. Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ кафедр минералогии и петрологии геологического факультета МГУ, с использованием оборудования, полученного по программе развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багдасарян Г.П., Лебединский В.И. Новые данные об абсолютном возрасте магматических пород Горного Крыма // Докл. АН СССР. 1967. Т. 173. С. 149–152.
- Волынец О.Н., Колосков А.В. Плагиоклазы четвертичных эффузивов и малоглубинных интрузивов Камчатки. М.: Наука, 1976. 135 с.
- Волынец О.Н., Щека С.А., Дубик Ю.М. Оливин — анортитовые включения вулканов Камчатки и Курил // Включения в вулканических породах Курило-Камчатской островной дуги. М.: Наука, 1978. С. 124–167.
- Давыдова В.О., Плечов П.Ю., Щербаков В.Д. и др. Высоко калиевые базальтовые трахиандезиты ксеноли-

тов в пирокластических отложениях вулкана Безымянный, Камчатка // Геология и геофизика. 2018. Т. 59(9). С. 1087–1099.

Кравченко С.М. Петрографические особенности интрузивных массивов южной части центрального Крыма // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1958. № 11. С. 100–105.

Кумеев С.С. Полевые шпаты — петрогенетические индикаторы. М.: Недра, 1982. 207 с.

Латышев А.В., Панов Д.И. Юрские магматические тела в долине реки Бодрак, ЮЗ Крым // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2008. № 2. С. 70–78.

- Лебединский В.И., Шалимов А.И. Магматические проявления в структуре и геологической истории Горного Крыма // Сов. геология. 1967. № 2. С. 82–97.
- Левинсон-Лессинг Ф.Ю. Палеовулкан Карадаг в Крыму // Изв. Геол. комитета. 1926. Т. 45. 95 с.
- Леснов Ф.П., Королюк В.Н., Федоренко В.И. и др. Изоморфная примесь железа в плагиоклазах из базальтоидов вулканов Курил и Камчатки // Генетическая и экспериментальная минералогия. Вып. 7. Новосибирск: Наука, 1978. С. 98–100.
- Лучицкий В.И. Петрография Крыма. Петрография СССР. Серия 1. Региональная петрография. Вып. 8. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1939. 98 с.
- Милеев В.С., Никитин М.Ю., Рогов М.А. и др. Тектоника и геодинамическая эволюция Горного Крыма // Бюлл. МОИП. Сер. геол. 2009. Т. 84, вып. 3. С. 3–21.
- Морозова Е.Б., Сергеев С.А., Савельев А.Д. Меловые и юрские интрузии Горного Крыма: первые данные U-Pb датирования // Докл. РАН. 2017. Т. 474. С. 66–72.
- Морозова Е.Б., Сергеев С.А., Суфиев А.А. U-Pb цирконовый (Shrimp) возраст Джидайской интрузии как реперного объекта для геологии Крыма // Вестн. СПбГУ. Геология и география. 2012. № 4. С. 25–33.
- Муратов М.В. Геология Крымского полуострова. М.: Недра, 1973. 192 с.
- Никитин М.Ю., Болотов С.Н. Геологическое строение Крымского учебного полигона МГУ. Ч. 1. М.: МГУ, 2006. 135 с. Ч. 2. М.: МГУ, 2007. 110 с.
- Павлинов В.Н. Форма и механизмы образования малых интрузий типа лакколитов. М.: изд. МГРИ, 1946. 411 с.
- Плошко В.В., Сиденко О.Г., Иванов В.И. и др. Ассоциация пикритов и кварцевых диабазов Крыма // Докл. АН СССР. 1979. Т. 244. С. 442–445.
- Спиридонов Э.М. Метаморфические и метасоматические образования // Геологическое строение Качинского поднятия Горного Крыма. Т. II. М.: МГУ, 1989. С. 136–152.
- Спиридонов Э.М., Коротаева Н.Н., Ладыгин В.М. Хромшпинелиды, титаномagnetит и ильменит островодужных вулканитов Горного Крыма // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1989. № 6. С. 37–55.
- Спиридонов Э.М., Коротаева Н.Н., Ладыгин В.М. и др. Островодужные авгит-битовнит-лабрадоритовые дациты Карадага, Горный Крым // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019а. № 5. С. 53–61.
- Спиридонов Э.М., Кравченко С.М., Степанов В.К. и др. Эффузивоподобные породы в составе гипабиссальных интрузивов габбро-долеритов мезозоид Горного Крыма // Петрология и геодинамика геологических процессов. Иркутск, 2021. Т. 3. С. 107–109.
- Спиридонов Э.М., Овсянников Г.Н., Филимонов С.В. и др. Островодужный гипабиссальный первомайско-аюдагскиинтрузивный комплекс Горного Крыма: геология и петрология // Ломоносовские чтения МГУ-2023. Подсекция «Геология, геохимия, геофизика и водные ресурсы Крыма»: Сб. тез. докл. М., 2023. С. 22–33.
- Спиридонов Э.М., Овсянников Г.Н., Филимонов С.В. и др. Петрогенетическая схема Н.Л. Боуэна и минеральные ассоциации горных пород островодужного первомайско-аюдагского комплекса: от плагиоцерцолитов до плагиогранитов // Современные направления развития геохимии. Т. 2. Иркутск: Ин-географии СО РАН, 2022. С. 149–153.
- Спиридонов Э.М., Семиколенных Е.С., Лысенко В.И. и др. Армолколлит-содержащие островодужные плагиоцерцолиты и оливиновые габбронорит-долериты Балаклавы, Горный Крым // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019б. № 3. С. 51–60.
- Спиридонов Э.М., Фёдоров Т.О., Ряховский В.М. Магматические образования Горного Крыма. Статьи 1 и 2 // Бюлл. МОИП. Сер. геол. 1990. Т. 65, № 4. С. 102–112; № 6. С. 119–134.
- Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Семиколенных Е.С. Цирконолит, бадделит, циркон и торит островодужных кварцевых габбронорит-долеритов интрузива Аю-Даг (Горный Крым) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 5. С. 70–78.
- Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Семиколенных Е.С. и др. Чевкинит-(Ce) и перрьерит-(Ce) островодужных кварцевых габбронорит-долеритов интрузива Аю-Даг, Горный Крым // Зап. РМО. 2019в. Ч. 148. Вып. 4. С. 61–79.
- Фирсов Л.В. Абсолютная датировка изверженных пород Крыма в качестве реперных образований для байоса // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1963. № 4. С. 24–34.
- Фрондел Дж. Минералогия Луны. М.: Мир, 1978. 333 с.
- Щербаков Д.И. Зеленокаменные породы Алупки // Сб., посвященный проф. Ф.Ю. Левинсону-Лессингу. СПб., 1915. С. 117–122.
- Almeev R., Kimura J.-I., Ariskin A., et al. Decoding crystal fractionation in calc-alkaline magmas from the Bezymianny Volcano (Kamchatka, Russia) using mineral and bulk rock compositions // J. Volcan. Geotherm. Res. 2013. Vol. 263. P. 141–171.
- Housh T.B., Luhr J.F. Plagioclase-melt equilibria in hydrous systems // Amer. Mineral. 1991. Vol. 76. P. 477–492.
- Humphreys M.C.S. Silicate liquid immiscibility within the crystal mush: evidence from Ti in plagioclase from the Skaergaard intrusion // J. Petrol. 2011. Vol. 52. № 1. P. 147–174.
- Jarosewich E., Nelen J.A., Norberg J.A. Reference samples for electron microprobe analysis // Geostandards Newsletter. 1980. Vol. 4 (1). P. 43–47.
- Lundgaard K.L., Tegner C. Partitioning of ferric and ferrous iron between plagioclase and silicate melt // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2004. T. 147. С. 470–483.
- Meijers M.J.M., Vrouwe B., Hinsbergen D.J.J., et al. Jurassic arc volcanism on Crimea (Ukraine): implications for the paleo-subduction zone configuration of the Black Sea region // Lithos. 2010. Vol. 119. P. 412–426.
- Nikishin A.M., Wannier M., Alekseev A.S., et al. Mesozoic to recent geological history of southern Crimea and the Eastern Black Sea region. In: Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and Caucasus (M. Sosson, R.A. Stephenson, S.A. Adamia, eds.). Geol. Soc. London. Spec. Publ. 2015. P. 241–264.
- Popov D.V., Brovchenko V.D., Nekrylov N.A., et al. Removing a mask of alteration: Geochemistry and age of the Karadag volcanic sequence in SE Crimea // Lithos. 2019. Vol. 324. P. 371–384.
- Yoder H.S., Stewart D.B., Smith J.R. Ternary feldspars // Ann. Rep. Dir. Geophys. Lab., Carnegie Inst. Washington. Year Book № 55 (56). 1956 (1957). P. 190–206.

Статья поступила в редакцию 17.06.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 550.4.02

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-96-100

ДИНАМИКА ТРАНСФОРМАЦИИ КОЛЛОИДОВ ЖЕЛЕЗА В БОЛОТНЫХ ВОДАХ ПОД ВЛИЯНИЕМ БИОТЫ И ИНСОЛЯЦИИ

Ольга Юрьевна Дроздова¹, Алиса Романовна Алешина²,
Марина Александровна Макарова³, Владимир Владимирович Демин⁴,
Сергей Анатольевич Лапицкий⁵✉

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; drozdova@geol.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; lis.aleshina@yandex.ru

³ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия; frolikovam@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vvd.msu@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; lapitsky@geol.msu.ru ✉

Аннотация. Исследовано влияние биоты и инсоляции на устойчивость коллоидов железа в болотных водах. Изучена динамика процессов фото- и биотрансформации коллоидного железа. Показано, что механизмы этих изменений различны: при инсоляции снижение содержания железа в коллоидной фракции происходит за счет образования более крупных малорастворимых частиц гидроксида Fe ($>0,22$ мкм), а в присутствии биоты часть железа переходит во фракцию меньшего размера ($<1,4$ нм).

Ключевые слова: коллоиды, гидроксид железа, растворенное органическое вещество, болотные воды, облучение, биота

Для цитирования: Дроздова О.Ю., Алешина А.Р., Макарова М.А., Демин В.В., Лапицкий С.А. Динамика трансформации коллоидов железа в болотных водах под влиянием биоты и инсоляции // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 96–100.

DYNAMICS OF TRANSFORMATION OF IRON COLLOIDS IN MIRE WATERS UNDER THE INFLUENCE OF BIOTA AND INSOLATION

Olga Yu. Drozdova¹, Alisa R. Aleshina², Marina A. Makarova³, Vladimir V. Demin⁴,
Sergey A. Lapitskiy⁵✉

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; drozdova@geol.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; lis.aleshina@yandex.ru

³ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry RAS, Moscow, Russia; frolikovam@gmail.com

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vvd.msu@gmail.com

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; lapitsky@geol.msu.ru ✉

Abstract. In the work the influence of biota and irradiation on the stability of iron colloids in mire waters is studied. The dynamics of the processes of photo- and biotransformation of colloidal iron has been studied. It is shown that the mechanisms of these changes are different: during insolation, the decrease in the iron content in the colloidal fraction occurs due to the formation of larger poorly soluble hydroxide particles (>0.22 μm), and in the presence of biota, a part of iron passes into a fraction of a smaller size (<1.4 nm).

Keywords: colloids, iron hydroxide, dissolved organic matter, mire water, radiation, biota

For citation: Drozdova O.Yu., Aleshina A.R., Makarova M.A., Demin V.V., Lapitskiy S.A. Dynamics of transformation of iron colloids in mire waters under the influence of biota and insolation. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 96–100. (In Russ.).

Введение. Подвижность загрязняющих и питательных веществ в водных объектах часто контролируется сорбцией на поверхности коллоидных частиц. Образованию устойчивой коллоидной системы в поверхностных водах способствует присутствие природных органических соединений [Сериков и др., 2010].

Железо является одним из важнейших биогенных элементов и в поверхностных водах находится в истинно-растворенном, коллоидном и взвешенном

состояниях. Коллоиды железа чаще всего представлены его гидроксидами и крупными комплексами с высокомолекулярными гуминовыми веществами. С коллоидами железа в природных водах переносятся многие микроэлементы, в том числе и тяжелые металлы [Pokrovsky, Schott, 2002; Hasselov, von der Kammer, 2008].

Биодеградация и фотолиз растворенного органического вещества (РОВ) в поверхностных водах являются двумя основными факторами, контроли-

рующими не только потоки углерода, но и металлов, связанных с РОВ, таких как железо [Grunert et al., 2021]. Фотохимические трансформации соединений железа участвуют во многих важных геохимических и экологических процессах и влияют на доступность железа для первичных продуцентов и образование активных форм кислорода [Lv et al., 2022].

Прогноз состава и размера соединений железа имеет решающее значение для оценки качества вод. Прогнозирование по рН и насыщению растворенным кислородом может быть ошибочным из-за связывания железа с органическим веществом в природных водах [Wang et al., 2023].

Таким образом, исследования трансформации коллоидных соединений РОВ и железа в природных водах под воздействием различных факторов играют важную роль в изучении миграции не только их самих, но и многих микроэлементов. Данная работа направлена на изучение динамики трансформации коллоидов железа под воздействием биоты и инсоляции в водах богатых РОВ и железом.

Материалы и методы исследований. Исследование проводили с образцами вод болота, расположенного в устье р. Малая Сеньга на территории Мещерской низменности Владимирской области (N 55°49' E 39°22'). Особенности физико-географических условий территории обуславливают высокое содержание железа и гуминовых веществ в поверхностных водах [Сидоренко, 1966]. В исследуемых водах *in situ* измеряли электропроводность (кондуктометр Hanna HI 9033), значения рН (рН-метр Hanna HI 9025) и отбирались пробы для определения содержания основных анионов, катионов, железа, растворенного органического углерода (в соответствии с ГОСТ 31861-2012).

Исследование заключалось в проведении серии экспериментов с образцами вод болота: (1) инкубация в течение 10 дней без доступа света в присутствии нативного микробного комплекса; (2) облучение солнечным и УФ-излучением стерильных образцов на протяжении 25 суток.

Для оценки влияния биоты на коллоиды железа образцы вод болота, пропущенные через фильтры с размером пор 100 мкм (в растворе оставались водные микроорганизмы), все время экспериментов находились в темном месте без доступа света, таким образом, изменения в растворе происходили в результате воздействия биоты. Инкубация проводилась в стерильных кварцевых колбах объемом 250 мл закрытыми стерильными пробками, пропускающими воздух.

Перед постановкой экспериментов по оценке влияния солнечного и УФ-облучения образцы пропускались через фильтр с размером пор <0,22 мкм (ФиТреМ, ИННИТ) для соблюдения стерильности и исключения возможного влияния биоты. В экспериментах по УФ-облучению использовались две УФ-лампы (ДКБУ 9): интенсивность излучения

лампы составляла 48 кВт/м² при максимуме на длине волны 360 нм (УФ-А).

Во всех экспериментах через определенные промежутки времени отбирались пробы, которые пропускались через фильтры с размером пор 0,22 мкм и 1,4 мкм (Millipore), что позволило отследить динамику процессов, протекающих под воздействием биоты и облучения. Таким образом, в пробах определяли содержание железа в дисперсной фазе (>0,22 мкм), коллоидной (1,4 мкм — 0,22 мкм) и истинно-растворенной форме (<1,4 мкм). Все эксперименты проводили в трех повторностях.

Константы скоростей изменения содержания коллоидного железа в ходе экспериментов определялись по уравнению реакции первого порядка:

$$C_t = C_0 e^{-kt},$$

где k — константа скорости первого порядка (сутки⁻¹), C_0 — начальная концентрация железа в коллоидной форме, C_t — концентрация железа в коллоидной форме в момент времени t .

Для расчета форм нахождения железа и состояния насыщения раствора по отношению к возможным твердым фазам использовали программу Visual MINTEQ версии 3.1 для Windows [Gustafsson, 2013]. При проведении расчетов использовались основные гидрохимические характеристики (рН, содержание растворенных катионов, анионов, железа, органического углерода), полученные до и после проведения экспериментов. Содержание органических веществ вводили с использованием Стокгольмской модели (SHM) комплексообразования металлов с органическим веществом [Gustafsson, 2001].

В исходных образцах и всех фильтрах определяли содержание: неорганических анионов (на ионном хроматографе Dionex ICS-2000, Thermo), основных катионов и железа (на атомно-абсорбционном спектрометре с непрерывным источником света ContrAA 700, Analytik Jena Company и на оптическом эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 5110 ICP-OES) и растворенного органического углерода (POY) (на анализаторе LiquiTOCtrace, Elementar). Определение содержания Fe[II] в исследуемых растворах природных вод проводилось по реакции образования окрашенных комплексов Fe²⁺ с феррозином [Viollier et al., 2000]. Определение в растворенной форме количества катионных, анионных и нейтральных соединений железа проводили методом ионообменной хроматографии с использованием смол: ДЭАЭ-целлюлозы (Sigma Aldrich) и Dowex 50 WX 8, 200–400 меш (Serva).

Результаты исследований и их обсуждение. Основные гидрохимические характеристики изучаемых болотных вод представлены в табл. 1. Исследуемые воды характеризуются высоким содержанием органического вещества и железа и относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы

Таблица 1

Основные гидрохимические характеристики исследуемых вод

pH	æ	POУ	Fe _{общ}	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	NO ₃ ⁻
ед.	мкСм/см	мг/л										
4,7	80	130	5,0	0,1	1,2	4,1	0,7	0,1	2,1	5,5	0,2	0,2

[Алекин, 1970]. Значения удельной электропроводности (æ) исследуемых природных вод составляет 80 мкСм/см, а значения pH 4,7. Концентрации основных неорганических анионов и катионов невысокие.

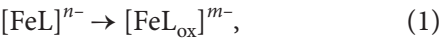
Содержание железа в исследуемых водах составляет 5,0 мг/л, при этом практически все железо находится в коллоидной форме 1,4 нм — 0,22 мкм (рис. 1).

Полученные результаты ионообменной хроматографии показали, что во фракции <0,22 мкм железо находится преимущественно в анионной форме (83%). Расчеты с использованием программы Visual MINTEQ показали, что в растворенной форме 99% железа представлено комплексами с органическими лигандами (L). Таким образом, большая часть Fe в исследованных водах находится в виде коллоидов, представленных соединениями с органическими веществами. Это могут быть комплексы вида [FeL]ⁿ⁻, которые могут быть образованы с высокомолекулярными соединениями, такими как гуминовые вещества (ГВ), или коллоиды гидроксида железа, стабилизированные РОВ, которые являются устойчивыми и не подвергаются агломерации в более крупные частицы и коагуляции.

Влияние биоты. В экспериментах с нестерильными образцами (в присутствии биоты) наблюдается лишь небольшое снижение содержания коллоидного железа (рис. 2) за счет перехода его в низкомолекулярную фракцию, увеличение содержания истинно-растворенной формы (<1,4 нм) составило около 30% от исходного содержания железа в этой форме.

Наблюдаемые изменения могут быть связаны с тем, что биота разрушает аллохтонные органические вещества с образованием менее ароматических

и более низкомолекулярных соединений [Fasching et al., 2014], что приводит к снижению размеров комплексов [FeL]ⁿ⁻:



где L — органический лиганд, L_{ox} — преобразованный (окисленный) органический лиганд.

Влияние облучения. В ходе экспериментов при УФ облучении и инсоляции pH исследуемых проб повышался с 4,7 до 6,9 и 6,5, соответственно. Это связано с минерализацией РОВ до CO₂ и HCO₃⁻ [Zhu et al., 2016].

Снижение содержания общего железа во фракции <0,22 мкм вод болота за 25 дней экспозиции на 53% и 20% при УФ-облучении и инсоляции, соответственно, обусловлено переходом железа в дисперсную фазу (>0,22 мкм) (рис. 3).

Это говорит о нарушении устойчивости коллоидного раствора и о процессе коагуляции с образованием осадка в виде Fe(OH)₃. Результаты физико-химического моделирования показали, что после облучения раствор становится пересыщенным по отношению к ферригидриту (табл. 2). При облучении содержание в растворенной фракции органического углерода снижается с большей скоростью, чем содержание железа (за 25 дней облучения концентрация РОУ снизилась на 50–70%, а железа на 20–50%). Это привело к увеличению молярного соотношения [Fe]/[РОУ] в 2 раза с 0,01 до 0,02, т.е. органических лигандов становится недостаточно для связывания железа, что и может приводить к увеличению индексов насыщения раствора по отношению к ферригидриту.

Наблюдается увеличение содержания Fe(II) уже после одного дня облучения (рис. 3). Восстановление

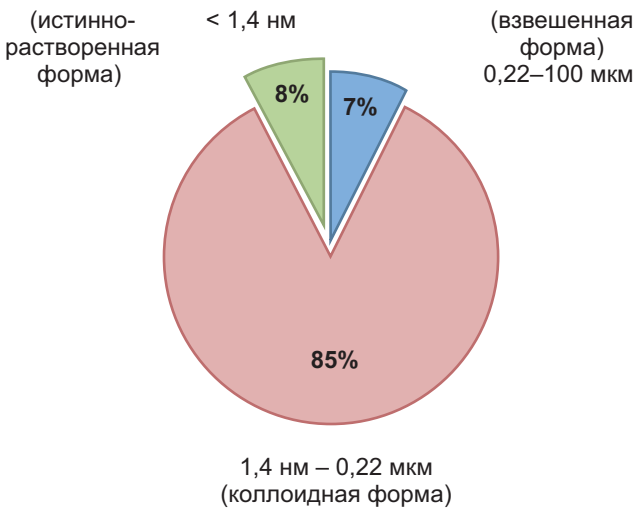


Рис. 1. Распределение Fe по формам (в %) в исследуемых водах

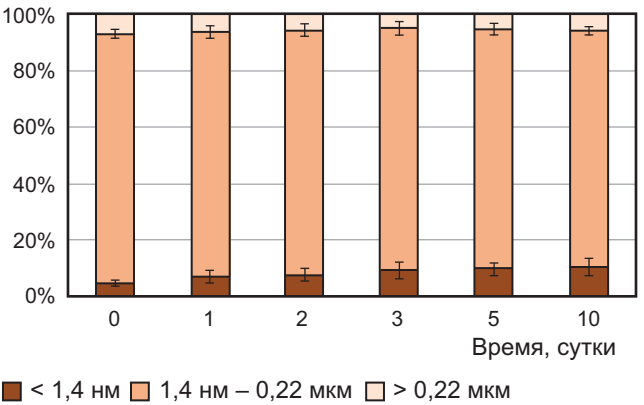


Рис. 2. Изменение количества различных форм Fe (в %) под воздействием биоты в ходе экспериментов

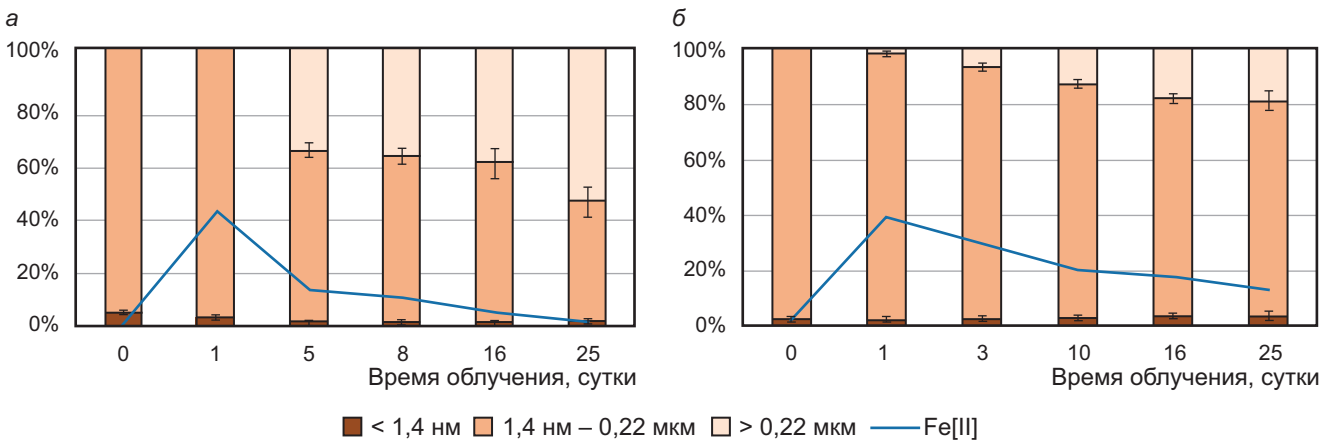


Рис. 3. Изменение количества различных форм Fe (в %) под воздействием УФ-облучения (а) и инсоляции (б) в ходе экспериментов

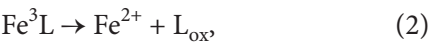
Таблица 2

Значения индексов насыщения раствора по отношению к ферригидриту			
Вариант эксперимента	Биота	Инсоляция	УФ-облучение
До эксперимента	0,43	0,43	0,43
После эксперимента	0,43	0,51	4,0

Таблица 3

Значения констант скорости снижения количества коллоидного Fe			
Вариант эксперимента	Биота	Инсоляция	УФ-облучение
k , сутки ⁻¹	0,005	0,010	0,024
R^2	0,76	0,91	0,83

Fe(III) до Fe(II) при разрушении комплексов $[FeL]^n$ может происходить при взаимодействии с органическими лигандами [Немодрук, Безрогова, 1972], например, в результате переноса заряда от лиганда к металлу [Garg et al., 2015] по реакции:



В насыщенных кислородом водах при нейтральном pH, Fe(II) быстро окисляется и Fe(III) подвергается гидролизу с последующей полимеризацией [Garg et al., 2013; Zhu et al., 2016] по реакциям.



Вторым вариантом нарушения устойчивости коллоидов железа может быть фотодегградация РОВ, стабилизирующего коллоиды гидроксида Fe(III), что привело к образованию более крупных частиц и их коагуляции.

Полученные значения констант скоростей (k) показали, что фототрансформация коллоидного железа происходит быстрее, чем в присутствии биоты (табл. 3). При этом скорости трансформации выше при облучении пробы только УФ-излучением.

Механизмы происходящей трансформации коллоидов железа различаются: при инсоляции снижение содержания Fe во фракции 1,4 нм — 0,22 мкм происходит за счет образования более крупных малорастворимых частиц гидроксида, а в присутствии биоты часть коллоидного железа переходит в более низкомолекулярную фракцию (<1,4 нм).

Одной из особенностей металлов является то, что после попадания в водную среду их биодоступность и токсичность в значительной степени определяется формой нахождения [Голованова, Маловская, 2016]. Как было показано ранее на примере болотных вод [Drozdova et al., 2020] часть металлов (например, Pb, Cr, Co, La и Zn) может связываться с образующимися под влиянием инсоляции крупными (более 0,22 мкм) частицами гидроксида Fe(III). Известно, что микрочастицы и наночастицы практически не осаждаются в потоке, так частицы размером 0,03–0,05 мм не осаждаются при скорости воды более 0,25 мм/с [Орлов и др., 2011]. Но существуют условия, когда эти частицы могут осаждаться, например, при изменении гидродинамических условий, что приведет к накоплению не только гидроксидов железа, но и других металлов в донных отложениях.

Заключение. Исследование показало, что под влиянием биоты, УФ-облучения и естественной инсоляции содержание коллоидной формы железа в природных водах, насыщенных кислородом, снижается. При этом динамика и механизмы, приводящие к такому изменению в водах с высоким содержанием РОВ и железа, различаются в зависимости от фактора трансформации. В присутствии биоты коллоиды железа переходят в соединения меньшего размера, что может повысить их миграционную способность и биодоступность. Облучение болотных вод приводит к коагуляции коллоидов железа с образованием более крупных частиц.

Финансирование. Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 21-77-10028.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеозидат, 1970. 413 с.
- Голованова О.А., Маловская Е.А. Динамика загрязнения ионами тяжелых металлов поверхностных вод рек сибирского региона // Вестник Омского университета. 2016. № 3. С. 64–73.
- Немодрук А.А., Безрогова Е.В. Фотохимические реакции в аналитической химии. М.: Химия, 1972. 167 с.
- Орлов Б.В., Бойкова И.Г., Печников В.Г. Экологическая реабилитация московской городской водоотводящей системы // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 7. С. 5–7.
- Серииков Л.В., Шиян Л.Н., Тропина Е.А. и др. Коллоидно-химические свойства соединений железа в природных водах // Известия ТПУ. 2010. Т. 316, № 3. С. 28–33.
- Сидоренко А.В. Гидрогеология СССР. Т. 1. Московская и смежные области. М.: Недра, 1966. 423 с.
- Drozdova O.Yu., Aleshina A.R., Tikhonov V.V., et al. Coagulation of organo-mineral colloids and formation of low molecular weight organic and metal complexes in boreal humic river water under UV-irradiation // Chemosphere. 2020. Vol. 250. 126216. P. 1–10.
- Fasching C., Behounek B., Singer G., et al. Microbial degradation of terrigenous dissolved organic matter and potential consequences for carbon cycling in brown-water streams // Scientific Reports. 2014. Vol. 4. 4981. P. 1–7.
- Garg S., Jiang C., Waite T.D. Mechanistic insights into iron redox transformations in the presence of natural organic matter: Impact of pH and light // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2015. Vol. 165. P. 14–34.
- Garg S., Ito H., Rose A.L., et al. Mechanism and kinetics of dark iron redox transformations in acidic natural organic matter solutions // Environmental Science & Technology. 2013. Vol. 47 (4). P. 1861–1869.
- Grunert B.K., Tzortziou M., Neale P., et al. DOM degradation by light and microbes along the Yukon River-coastal Ocean continuum // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. 10236. P. 1–14.
- Gustafsson J.P. Modeling the Acid–Base Properties and Metal Complexation of Humic Substances with the Stockholm Humic Model // Journal of Colloid and Interface Science. 2001. Vol. 244 (1). P. 102–112.
- Gustafsson J.P. Visual MINTEQ Ver. 3.1 (2013). Retrieved from <https://vminteq.lwr.kth.se> (дата обращения: 01.04.2023).
- Hasselov M., von der Kammer F. Iron oxides as geochemical nanovectors for metal transport in soil–river systems // Elements. 2008. Vol. 4. P. 401–406.
- Lv Y., Liu J., Zhu R., et al. Photoreductive dissolution of iron (hydr)oxides and its geochemical significance // ACS Earth Space Chem. 2022. Vol. 6, 4. P. 811–829.
- Pokrovsky O.S., Schott J. Iron colloids/organic matter associated transport of major and trace elements in small boreal rivers and their estuaries (NW Russia) // Chemical Geology. 2002. Vol. 190, Iss. 1–4. P. 141–179.
- Viollier E., Inglett P.W., Hunter K., et al. The ferrozine method revisited: Fe(II)/Fe(III) determination in natural waters // Applied Geochemistry. 2000. Vol. 15. P. 785–790.
- Wang T., Li W., Parra F.R., et al. Delimiting conditions under which natural organic matter can control Fe speciation and size in freshwaters // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 860. P. 160406.
- Zhu M., Frandsen C., Wallace A.F., et al. Precipitation pathways for ferrihydrite formation in acidic solutions // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2016. Vol. 172. P. 247–264.

Статья поступила в редакцию 04.10.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 556.34

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-101-107

ОЦЕНКА ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ОДНОВРЕМЕННОЙ КАЛИБРОВКИ СЕРИИ ПРОФИЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

Дмитрий Дмитриевич Луканов^{1✉}, Иван Александрович Расторгуев²,
Сергей Владимирович Юрьев³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; dmitrii_lukanov@mail.ru ✉

² НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия; stiar@mail.ru

³ АО «Институт Гидропроект», Москва, Россия; s.yurev@hydroproject.ru

Аннотация. В статье дается описание алгоритма для одновременной калибровки нескольких геофильтрационных профильных моделей. В качестве параметров калибровки рассматриваются свойства проницаемости и граничные условия. Была разработана специальная процедура, выполняющая последовательный запуск каждой модели. В результате получены расчетные уровни по пьезометрам для каждой модели, которые передаются модулю PEST. С помощью него модуль PEST оценивает чувствительность модели (моделей) к значениям параметров и затем итерационно подбирает параметры так, чтобы они удовлетворяли критерию сходимости.

Ключевые слова: определение параметров, численное моделирование, PEST, Python, Feflow, геофильтрация, проницаемость, профильная модель

Для цитирования: Луканов Д.Д., Расторгуев И.А., Юрьев С.В. Оценка геофильтрационных параметров на основе одновременной калибровки серии профильных моделей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 101–107.

ESTIMATION OF GROUNDWATER FLOW PARAMETERS BASED ON SIMULTANEOUS CALIBRATION FOR A SERIES OF VERTICAL PLANAR MODELS

Dmitriy D. Lukanov^{1✉}, Ivan A. Rastorguev², Sergey V. Yurev³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; dmitrii_lukanov@mail.ru ✉

² NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; stiar@mail.ru

³ JSC «Hydroproject Institute», Moscow, Russia; s.yurev@hydroproject.ru

Abstract. The article describes an algorithm for simultaneous calibration of several groundwater flow vertical planar models. Permeability properties and boundary conditions are considered as calibration parameters. A special procedure that runs each model sequentially was developed. The calculated levels for each model are the result of procedure work. These calculated levels of observation wells are transferred to the PEST module. The PEST module uses it to evaluate the sensitivity of the model(s) to parameter values and then iteratively selects parameters so that they could satisfy the convergence criterion.

Keywords: parameter estimation, numerical simulation, PEST, Python, Feflow, groundwater flow, permeability, profile model

For citation: Lukanov D.D., Rastorguev I.A., Yurev S.V. Estimation of groundwater flow parameters based on simultaneous calibration for a series of vertical planar models. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 101–107. (In Russ.).

Введение. Существенным этапом геофильтрационного моделирования является калибровка модели. Процесс калибровки состоит в проверке соответствия модельных данных реальным (натурным) гидрогеологическим условиям. Одним из вариантов калибровки является проведение серии прямых расчетов, на основе которых определяется соответствие расчетных уровней с измеренными уровнями, полученными по данным режимных наблюдений. Основной сложностью калибровки является направленный поиск оптимальных параметров, при которых расчетные и фактические данные различаются меньше всего. Направленный поиск может быть выполнен автоматически, с использованием программных

модулей, подключаемых извне к модели. Описание применения кодов для автоматической калибровки дано в работах [Свительман, 2017; Трофимова, 2017]. Примером таких модулей, упоминаемых в этих работах, может быть пакет Ostrich [Matott, 2017] или Pest [Doherty, 2015]. Последний пакет будет задействован в этой работе для осуществления калибровки в автоматическом режиме.

Ввиду различных причин не всегда удается построить трехмерную модель на участок строительства так, чтобы модель позволяла практически полностью учесть геологическое строение и граничные условия территории, поэтому одна трехмерная модель может быть заменена несколькими про-

фильными моделями. Отдельно калибровка каждой модели невозможна, так как в каждой из них есть сквозные параметры, принимающие участие во всех моделях. Единые параметры для всех моделей требуют одновременной калибровки. Однако, известные программные комплексы для моделирования не дают возможности проведения одновременной калибровки нескольких моделей и требуется разработка своего собственного средства, позволяющего осуществлять единовременную калибровку. Кроме того, доступный интерфейс вызова оптимизации в средах типа DHI Feflow или Modflow не всегда позволяет калибровать граничные условия. Но это можно сделать, используя внешние коды. Далее приводится описание применения внешних кодов, позволяющих калибровать одновременно параметры проницаемости и граничные условия для нескольких моделей. Модели разработаны в среде DHI Feflow в конечно-элементной постановке.

Целью данной работы являлось создание алгоритма одновременной калибровки нескольких моделей на примере трех профилей. Одной из сложностей являлось непостоянство граничных условий, связанных с быстрым изменением уровня акватории, обусловленных приливо-отливными явлениями. В результате была разработана процедура в коде на Python v2.7, с использованием API интерфейса Feflow IFM и оптимизационного модуля PEST, позволяющая калибровать не только фильтрационные параметры, но и граничные условия моделей.

Описание задачи. Постановка задачи основывается на расчете фильтрации из акватории через перемычку в котлован по трем профилям и определении водоприточности по каждому из них. Для определения величины суммарного притока воды в строительный котлован, отделенный от акватории перемычкой со шпунтовыми стенками, и определения положения депрессионной кривой на период строительства одного строящегося Объекта были разработаны три профильные геофильтрационные модели. Эти модели обладают единым набором свойств проницаемости в соответствии с выбранными для расчетов геологическими разрезами (рис. 1). На разрезе 3-3 находится пьезометр 4, на разрезе 4-4 — пьезометры 8, 9 и 8-1, на разрезе 5-5 — пьезометры 12 и 12-1.

Фильтрационные параметры и граничные условия. В геологическом строении участка работ принимают участие современные песчаные и суглинистые отложения, техногенные отложения, а также магматические породы архейского фундамента.

Калибровка созданных геофильтрационных моделей состояла в проверке соответствия модельных данных реальным (натурным) гидрогеологическим условиям для заданной схематизации. Калибровка по единому для всех моделей набору параметров заключалась в проведении серии одновременных расчетов по профилям 3-3, 4-4, 5-5, на основе которых определялось соответствие расчетных уровней

с измеренными уровнями, полученными по данным режимных наблюдений.

Модели калибровались при стационарных расчетах для уровней, которые были не единовременно замерены в пьезометрах 4, 8, 8-1, 9, 12 и 12-1 (табл. 1).

В качестве набора параметров для калибровки моделей выступали фильтрационные свойства и граничные условия (уровень акватории).

В качестве фактических данных используются 4 скважины. При этом количество искомым параметров составило 17 штук, что существенно превосходит количество исходных данных. Четыре известных и 17 неизвестных — такая задача решается в рамках определенных априори диапазонов значений. В табл. 2 приведены калибруемые параметры и вариации значений.

Таблица 1

Уровни подземных вод, используемые при калибровке

№ пьезометра	Абс. отм. уровня в пьезометре, м	Разрез
04	−9,26	3-3
08	−4,96	4-4
8-1	−5,56	4-4
09	−3,32	4-4
12	−4,46	5-5
12-1	−8,02	5-5

Таблица 2

Калибруемые параметры и интервалы их значений

Элемент	Значения коэффициентов фильтрации, м/сут		
	Начальное значение	Min	Max
ИГЭ-501 выветрелая зона	2,8	0,01	3
ИГЭ-222	0,9	0,1	1
ИГЭ-422	0,2	0,1	5
ИГЭ-452	50	10	100
Стена в грунте* 3-3	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}	0,5
Стена в грунте* 4-4	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}	0,5
Стена в грунте* 5-5	0,05	10^{-6}	0,5
ИГЭ-501 сохранный зона	0,001	10^{-5}	0,01
ИГЭ-214	5	1	6,8
ИГЭ-215	0,7	0,3	4
ИГЭ-451	70	10	100
Валунно-галечниковый грунт	20	10,36	1590
ИГЭ-113	7	2,75	28,79
Шпунтовые стенки	0,005	10^{-6}	0,05
ИГЭ-211	22	20	100
ИГЭ-213	7	5	20
ИГЭ-236	0,05	0,01	0,5
Уровень, м			
Акватория	−0,1	−1,61	1,7

Примечание. *Стена в грунте представляет собой буронабивные сваи.

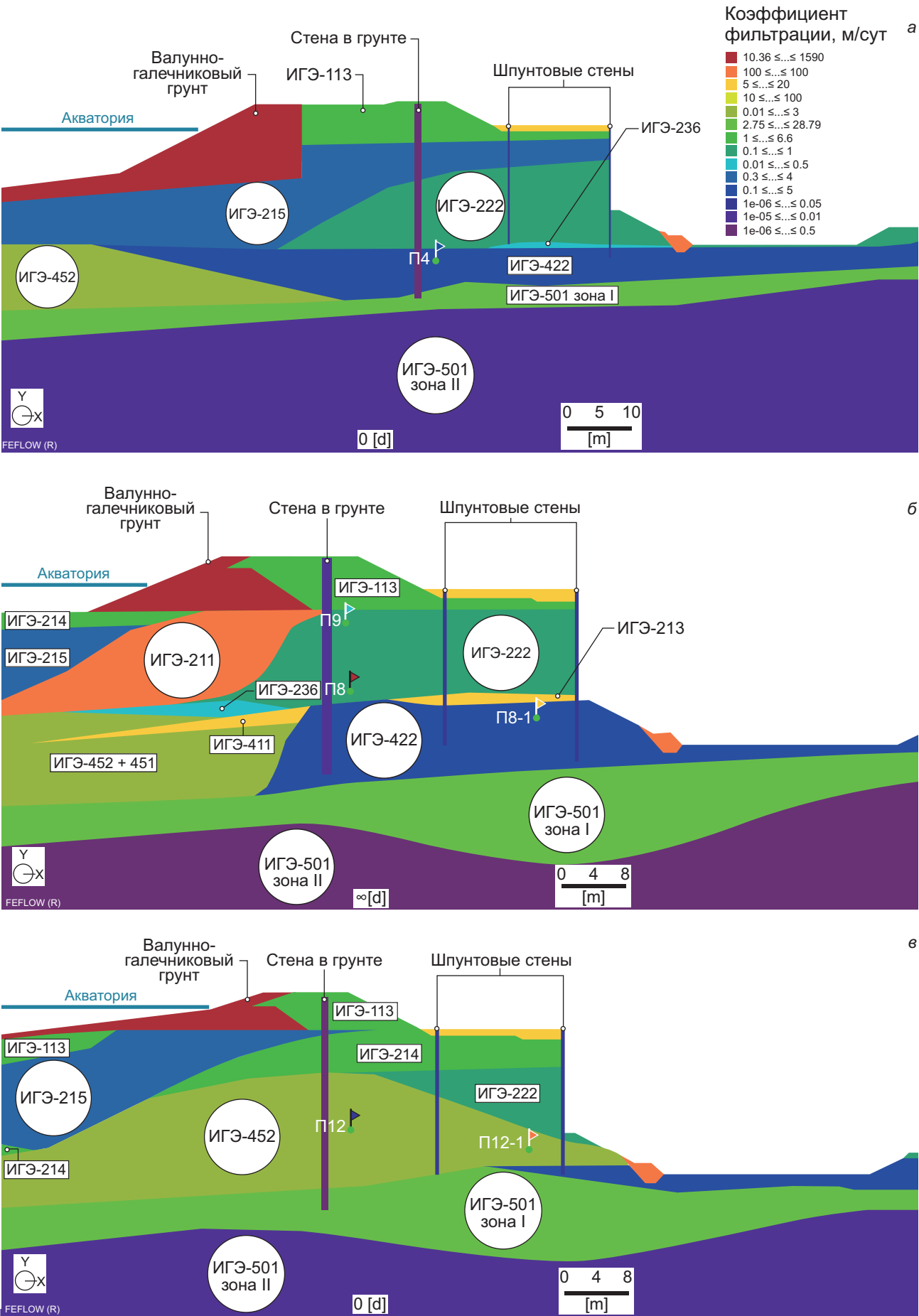


Рис. 1. Схематизация гидрогеологических условий на разрезе 3-3 (а), 4-4 (б), 5-5 (в)

Схема работы калибровочного алгоритма. Для единовременной калибровки 3-х профильных моделей для данного объекта была разработана специальная процедура. Процедура реализована в коде на Python v2.7 с использованием API интерфейса Feflow IFM и оптимизационного модуля PEST [Doherty, 2015]. Последний является открытым кодом и применяется для решения обратных задач, в том числе и геофильтрационных. Данный код позволил автоматизировать процесс калибровки.

Для первоначального запуска оптимизационного модуля PEST подготавливается контрольный файл настроек, который содержит в себе оптимизационные критерии, диапазоны изменения параметров, начальные значения параметров (табл. 2) и прочее.

Процедура выполняет три последовательных вызова моделей (1-й вызов для профиля 3-3, 2-й вызов для профиля 4-4 и 3-й для профиля 5-5). Перед вызовом моделей процедура считывает из файла исходные данные и начальные условия — значения параметров ИГЭ и уровня акватории. Результат работы процедуры — расчетные уровни по пьезометрам для трех разрезов, которые сохраняются в выходной файл. Этот выходной файл используется для вызова модуля PEST. С помощью него модуль оценивает чувствительность модели (моделей) к значениям параметров и затем итерационно подбирает параметры так, чтобы они удовлетворяли критерию сходимости.

Основным критерием сходимости, заложенным в процедуру выполнения оптимизации PEST, является среднеквадратичное отклонение, которое вычисляется следующим образом:

$$RMS = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (calc_i - obs_i)^2 \right]^{1/2},$$

где *calc* и *obs* — расчетные и фактические переменные (уровни воды), *N* — общее количество наблюдений.

Кроме критерия сходимости по среднеквадратичному отклонению задается количество вызовов (итераций) оптимизационной процедуры (35 рекомендуется по умолчанию). Третьим критерием остановки оптимизационных расчетов является разница между среднеквадратичными отклонениями на итерациях (текущей и предыдущей). При достижении одного из трех вышеописанных критериев оптимизация останавливается.

Блок-схема работы алгоритма показана на рис. 2. Зависимость функции качества калибровки (среднеквадратичного отклонения) от числа итераций показана на рис. 3.

Результаты калибровки и их обсуждение. Полученные по результатам калибровки параметры и модельные уровни приведены в табл. 3 и 4. Таким образом, среднеквадратичное отклонение между расчетными и наблюдаемыми уровнями составило

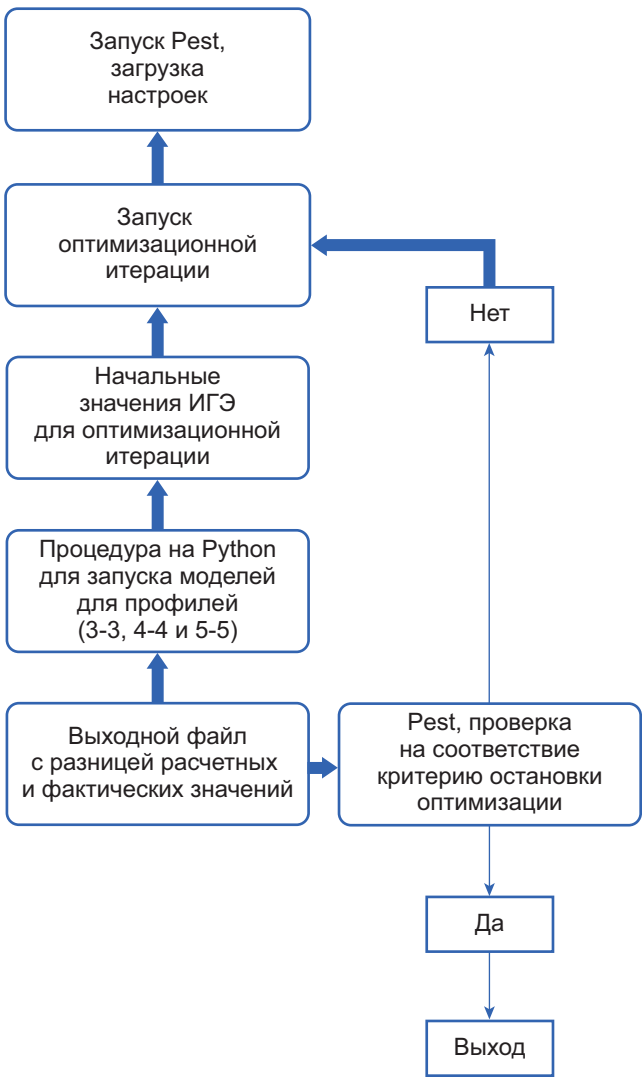


Рис. 2. Блок-схема работы калибровочного алгоритма

Таблица 3

Значения модельных уровней, полученных по результатам калибровки уровней

Уровни на 13.03.2022			
Пьезометр	Измеренный уровень, м	Уровень на модели, м	Разница, м
12	−4,46	−5,09	0,63
12-1	−8,02	−7,52	−0,5
9	−3,32	−3,54	0,22
8	−4,96	−3,77	−1,19
8-1	−5,56	−7,52	1,96
4	−9,26	−7,59	−1,67
		ср. кв. откл	1,21

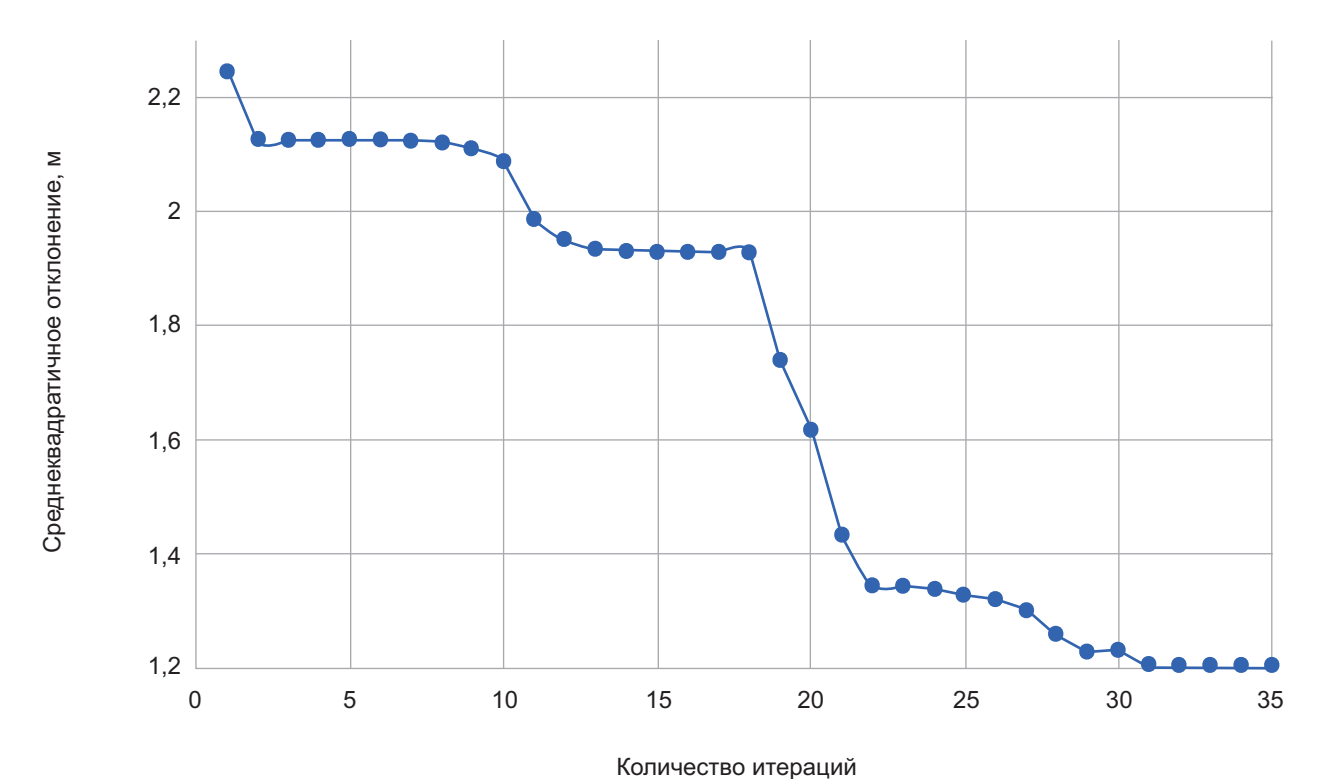


Рис. 3. Ход оптимизации при увеличении числа итераций

Таблица 4
Значения фильтрационных параметров,
полученных по результатам калибровки уровней

Параметр	Значение, м/сут
ИГЭ-501 зона I	3
ИГЭ-222	1
ИГЭ-422	0,1
ИГЭ-452	10
Стена в грунте 3-3	10 ⁻⁶
Стена в грунте 4-4	0,07
Стена в грунте 5-5	0,5
ИГЭ-501 зона II	0,001
ИГЭ-214	1,88
ИГЭ-215	0,3
ИГЭ-451	10
Валунно-галечниковый грунт	1000
ИГЭ-113	2,75
Шпунтовые стенки	0,01
ИГЭ-211	100
ИГЭ-213	20
ИГЭ-236	0,5
Параметр	Значение, м
Акватория	-1,61

1,21 м при данных калибруемых параметрах и вариациях их значений.

Различие проницаемостей стен в грунте для разрезов 3-3, 4-4 и 5-5 объясняется отсутствием сплошности их установки в коренные породы для разреза 4-4 и 5-5. Полученный в ходе калибровки уровень на акватории соответствует средним значениям колебания уровня на период замеров.

На основе полученных значений параметров были определены положения депрессионных кривых на всех трех разрезах при различных уровнях моря (рис. 4), а также оценены величины притока в строительный котлован через перемычку и выполненные дальнейшие прогнозные расчеты для обоснования проектных решений.

Выводы. Заложенный в коде на интерпретаторе Python 2.7 алгоритм позволил автоматизировать все вызовы, обращаясь последовательно то к вызовам моделей в среде Feflow, то к оптимизационному модулю PEST.

Кроме калибровки параметров проницаемости также было откалибровано граничное условие — уровень на акватории.

Данный подход с одновременной калибровкой сразу трех моделей может быть применен к любым моделям, разработанным как в среде DHI FEFLOW, так и в любой другой среде, например, Modflow. Количество моделей для единовременной калибровки при этом не ограничено. Но в любом случае, для лучшего качества калибровки необходимы единовременные замеры по уровневому режиму и по уровням на акватории.

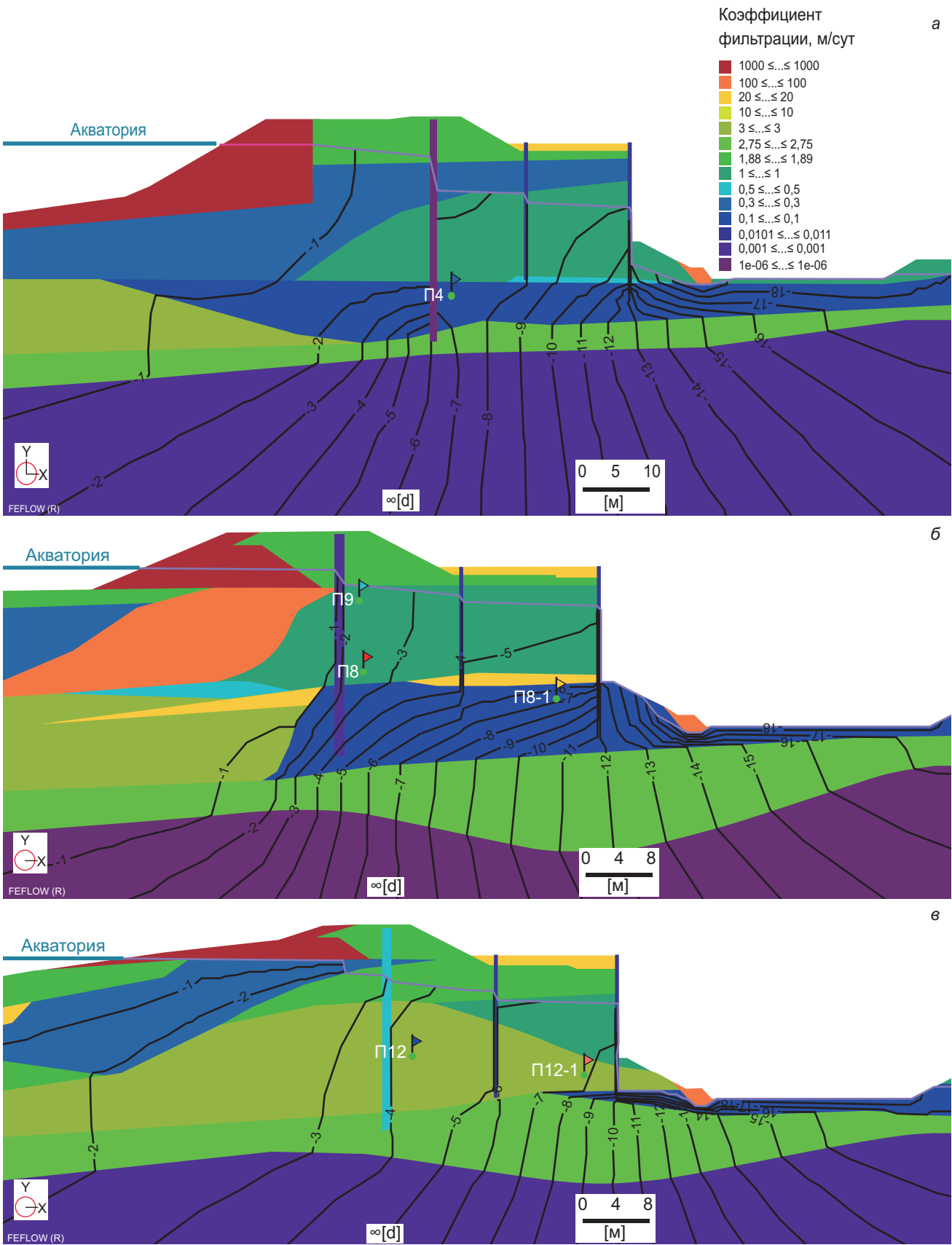


Рис. 4. Положение депрессионной кривой на разрезе 3-3 (а), 4-4 (б), 5-5 (в)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Свительман В.С., Савельева Е.А. Обзор программных средств анализа неопределенности / Препринт № IBRAE-2017-05. М.: ИБРАЭ РАН, 2017. 8 с.

Трофимова Ю.В., Свительман В.С., Расторгуев А.В. Определение положения источников загрязнения подземных вод по данным мониторинга // Инженерные изыскания в строительстве: Материалы Тринадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: ООО Геомаркетинг, 2017.

Diersch H.-J.G. FEFLOW Software—Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System—Reference Manual. Berlin: WASY GmbH, 2005.

Doherty J. Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models. Watermark Numerical Computing. Brisbane, Australia, 2017.

Harbaugh A.W. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model — the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, 2005.

Matott L.S. OSTRICH: an Optimization Software Tool, Documentation and User's Guide, Version 17.12.19. University at Buffalo Center for Computational Research. 2017. URL: <http://www.civil.uwaterloo.ca/envmodelling/Ostrich.html>

Статья поступила в редакцию 29.12.2023,
одобрена после рецензирования 22.03.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 550.370

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-108-118

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ В МОРСКОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ

Андрей Викторович Кошурников^{1✉}, Дмитрий Александрович Алексеев²,
Павел Юрьевич Пушкарёв³, Алексей Юрьевич Гунар⁴,
Ермолай Игоревич Балихин⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; koshurnikov@msu-geophysics.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-6160-7795>

² Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия; Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; alexeevgeo@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; pavel_pushkarev@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2894-2609>

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; gunar@msu-geophysics.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Ermolaybalihin@mail.ru

Аннотация. Используя численное моделирование полезного сигнала на основе характерной геоэлектрической модели подводной мерзлоты и реальные записи сигнала-помехи, мы провели сравнительный анализ помехоподавления при зондировании становлением поля с применением морской буксируемой диполь-дипольной измерительной установки в режимах накопления с разнополярными импульсами тока и шумоподобными сигналами (ШПС). Для серии токовых последовательностей в форме ШПС с различной длительностью и количеством импульсов, а также для сигнала в режиме накопления с наложением идентичного сигнала-помехи, были получены оценки кривых становления поля, отвечающих рассматриваемой геоэлектрической модели при времени записи, составляющем порядка 8–13 с на одну точку зондирования. По результатам сравнения полученных кривых, реконструированных по зашумленным синтетическим данным в режиме накопления и ШПС, установлено, что в режиме ШПС с импульсами длительностью 100 мкс и 1 мс относительная погрешность в режиме ШПС в среднем по профилю оказывается существенно ниже (до 1,5 раз), чем аналогичная погрешность в режиме накопления, и остается в пределах приемлемой величины (до нескольких процентов) до более поздних времен.

Ключевые слова: подводная мерзлота, морская электроразведка, зондирование становлением поля, импульсная переходная характеристика, Арктический шельф, псевдослучайные последовательности, шумоподобные сигналы

Для цитирования: Кошурников А.В., Алексеев Д.А., Пушкарёв П.Ю., Гунар А.Ю., Балихин Е.И. Теоретический анализ применения шумоподобных сигналов в морской импульсной электроразведке // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 108–118.

THEORETICAL ANALYSIS OF THE APPLICATION OF PSEUDO-NOISE SIGNALS IN MARINE PULSE ELECTROMAGNETIC PROSPECTING

Andrey V. Koshurnikov^{1✉}, Dmitriy A. Alekseev², Pavel Yu. Pushkarev³,
Aleksey Yu. Gunar⁴, Ermolay I. Balikhin⁵

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; koshurnikov@msu-geophysics.ru ✉

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia; Schmidt Institute of Physics RAS, Moscow, Russia; alexeevgeo@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; pavel_pushkarev@list.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; gunar@msu-geophysics.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Ermolaybalihin@mail.ru

Abstract. Using numerical modeling of a useful signal based on a characteristic geoelectric model of underwater permafrost and real recordings of a noise signal, we conducted a comparative analysis of noise suppression during transient sounding using a marine towed dipole-dipole array in accumulation modes with opposite-polar current pulses and pseudo-noise signals (PNS). For a series of current sequences in the form of PNS with different durations and numbers of pulses, as well as for a signal in the accumulation mode, with the superposition of an identical noise signal, transient sounding curves were obtained corresponding to the geoelectric model under consideration at a recording time of the order of 8–13 s per station. Based on the results of comparison of the obtained curves reconstructed from noisy synthetic data in the accumulation and PNS modes, it was established that in the PNS mode with pulses of duration 100 μ s and 1 ms, the relative error in the PNS mode on average over the profile turns out to be significantly lower (up to 1.5 times) than a similar one error in the accumulation mode, and remains within an acceptable value (up to several percent) until later times.

Keywords: underwater permafrost, marine electromagnetic prospecting, transient sounding, impulse transient response, Arctic shelf, pseudo-random code sequences, pseudo-noise signals

For citation: Koshurnikov A.V., Alekseev D.A., Pushkarev P.Yu., Gunar A.Yu., Balikhin E.I. Theoretical analysis of the application of pseudo-noise signals in marine pulse electromagnetic prospecting. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 108–118. (In Russ.).

Введение. Важной составляющей успешного решения геологических задач на шельфе является выбор оптимальных методик наблюдений и интерпретации геофизических данных. Одной из особенностей методов импульсного электромагнитного (ЭМ) зондирования [Светов, 2008; Кауфман и др., 2016; Nabighian, Masnae, 1991] в морском варианте [Петров, 2000; Кошурников, 2020; Krylov et al., 2023] является их относительно низкая помехозащищенность, что связано с характером возбуждения и приема сигнала в морских измерительных установках. В то же время, на протяжении ряда лет авторы активно применяют технологию зондирования становлением поля на основе буксируемой диполь-дипольной измерительной установки с целью изучения осадочного разреза и многолетнемерзлых пород на мелководных акваториях в зоне Арктического шельфа [Shakhova et al., 2017], поскольку она часто является единственным экономически и информационно-эффективным методом зондирования. Основные ограничения этой технологии связаны с тем, что изучение достаточно больших глубин требует измерения переходной характеристики (кривой становления) в области времен, где ее значения в силу быстрого убывания со временем оказываются крайне малы и искажены влиянием шума, то есть не позволяют обеспечить достаточной точности. При этом, стандартный подход к регистрации и обработке ЗС-сигналов состоит в накоплении (многократном измерении кривой становления для серии импульсов) и последующем ее осреднении по всем измеренным реализациям [Giannino and Leucci, 2021].

Идея использования шумоподобных последовательностей импульсов тока [Zepernick, Finger, 2005] в системах электромагнитного зондирования уже рассматривалась рядом ученых [Duncan et al., 1980; Helwing, 1999; Светов и др., 2012; Svetov et al., 2012; Ильичев, Бобровский, 2014; Великин, Великин,

2016]. В нашей предшествующей работе [Гончаров и др., 2022] мы получили удовлетворительный прирост точности кривой становления поля при переходе к режиму ШПС, но при условии достаточно длительной регистрации (порядка минуты) на одной точке зондирования, что в реальных условиях далеко не всегда является возможным.

Указанная проблема требует дальнейшей разработки специализированных методов регистрации, обработки и интерпретации данных, что обуславливает актуальность дополнительных теоретических исследований. В настоящей работе на основе имеющегося опыта построена характерная геоэлектрическая модель, включающая неоднородную толщу многолетнемерзлых пород; проведена имитация шумоподобных сигналов (ШПС) импульсного электромагнитного зондирования, направленная на оценку помехоподавления в режиме ШПС по сравнению с традиционным режимом накопления в условиях, приближенных к реальному темпу движения судна с измерительной системой (длительность регистрации на одном пункте 8–13 с).

Материалы и методы. На первом этапе работы мы построили характерную синтетическую квазидвухмерную геоэлектрическую модель, отражающую структурные особенности слоя подводной вечной мерзлоты (многолетнемерзлых пород, ММП), соответствующие различным условиям, включая наличие/отсутствие слоя вечной мерзлоты, различную геометрию верхней и нижней границ ММП, различную ширину и мощность областей протаивания (таликов), переменную глубину морской воды и вариации ее удельного сопротивления. При этом был учтен опыт анализа полевых данных электромагнитного зондирования (ЗСБ, TDEM), полученных на Восточно-Сибирском шельфе Арктики в рамках работ, организуемых и проводимых в последние годы авторами настоящей статьи [Кошурников, 2020; Krylov et al., 2023]. Анализируемая 2-D модель

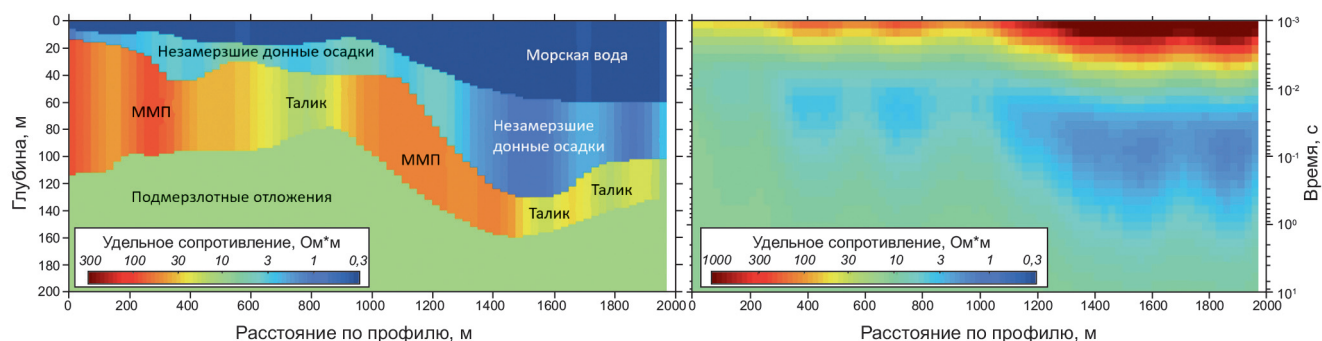


Рис. 1. Анализируемая синтетическая модель и отвечающий ей псевдоразрез кажущегося сопротивления в приближении ближней зоны

представляет собой набор 1-D моделей, скомпонованных с привязкой каждого 1-D столбца шириной 25 м к расстоянию вдоль профиля (диапазон 0–2 км) в интервале глубин 0–200 м (рис. 1).

Модель имеет четырехслойную структуру (сверху вниз: проводящая морская вода, менее проводящие незамерзшие морские донные отложения, высокоомные многолетне-мерзлые породы и проводящие подмерзлотные отложения) со следующими параметрами: сопротивление морской воды 0,3 Ом·м, глубина воды от 5 до примерно 60 м; мощность незамерзших донных отложений от 10 до примерно 70 м; слой многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью от 30 до 100 м; однородный подмерзлотный полубесконечный слой с удельным сопротивлением 10 Ом·м. Удельное сопротивление во всех слоях (кроме подмерзлотного) плавно изменяется в горизонтальном направлении с целью имитации переменной солености в слое воды, неоднородности незамерзших донных отложений и наличия областей протаивания (таликов) в пределах слоя ММП.

Для данной модели была выполнена имитация синтетических откликов ЗСБ для случая буксирной диполь-дипольной установки с использованием модифицированного нами программного кода DIPOLE1D [Key, 2009]. Полученные отклики представляют собой кривые становления поля для соосной составляющей напряженности электрического поля, отражающие процесс установления поля в среде после выключения тока (отклик на ступень выключения, далее — переходная характеристика, ПХ). Полученный двумерный псевдоразрез кажущегося удельного сопротивления в приближении ближней зоны [Кауфман и др., 2016] показан на правой панели рис. 1.

Затем с использованием синтетических ПХ, рассчитанных для каждой точки профиля, были рассчитаны ИПХ для импульсов длительностью 100 мкс (в диапазоне времен 100 мкс — 100 мс) и 1 мс (в диапазоне времен 1 мс — 1 с), имеющие дискретизацию по времени, равную длительности импульса. На рис. 2 даны псевдоразрезы кажущегося сопротивления, рассчитанные по ИПХ для импульса длительностью 100 мкс и 1 мс.

Второй этап моделирования предполагал расчет ШПС токового сигнала $m(t)$ в виде двоичных М-последовательностей, состоящих из элементарных импульсов прямоугольной формы, с равномерным распределением. Для этого использовался алгоритм генерации М-последовательностей, основанный на теории конечных полей Галуа и принципах линейных цифровых автоматов [Светов и др., 2012]. Рассматривалось пять вариантов последовательности разной длины: 2^{17} (длительность одного импульса — 100 мкс, общая длительность около 13 с); 2^{13} (длительность одного импульса — 1 мс, общая длительность около 8 с); 2^{12} (длительность одного импульса — 2 мс, общая длительность около 8 с);

2^{11} (длительность одного импульса — 4 мс, общая длительность около 8 с); 2^{10} (длительность одного импульса — 8 мс, общая длительность около 8 с). Фрагменты токового сигнала приведены в левой части рис. 3.

Задача расчета принятого сигнала $s(t)$, регистрируемого рассматриваемой измерительной системой в ответ на токовый сигнал $m(t)$, описывается сверточным соотношением

$$s(t) = m(t) * h(t), \quad (1)$$

где $h(t)$ — импульсная характеристика (ИПХ) системы, представляющая собой ее отклик на входное воздействие в форме дельта-функции, а знак $*$ означает операцию свертки.

Переходя к дискретной постановке и полагая, что входное воздействие $m(t)$ задано в виде последовательности прямоугольных импульсов, а ИПХ соответствует не дельта-функции, а одиночному импульсу длительности Δt , т.е. функции m , h и s представляют собой наборы отсчетов с шагом дискретизации Δt :

$$m = \{m_i\}, \quad i = 1, N; h = \{h_i\}, \quad i = 1, M; s = \{s_j\}, \quad j = 1, N + M - 1, \quad (2)$$

соотношение (1) можно записать в виде системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\sum_i m_i \cdot h_{j-i} = s_j \quad (3)$$

В матричной форме операцию моделирования ШПС-рядов можно представить как

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ m_2 & m_1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & m_2 & \ddots & \ddots & \vdots \\ m_N & \vdots & \ddots & m_1 & 0 \\ 0 & m_N & \ddots & m_2 & m_1 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & m_2 \\ \vdots & \ddots & \ddots & m_N & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & m_N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \\ s_{N+1} \\ \vdots \\ s_{N+M-1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Таким образом, с целью имитации зарегистрированного сигнала по построенным М-последовательностям (токовым сигналам) была вычислена их свертка с импульсной переходной характеристикой среды для соответствующей длительности импульса. Примеры имитированных ШПС-рядов, иллюстрирующие поведение напряжения в приемной линии измерительной установки, приводятся в правой части рис. 3.

С целью оценки возможностей применения псевдослучайных последовательностей импульсов

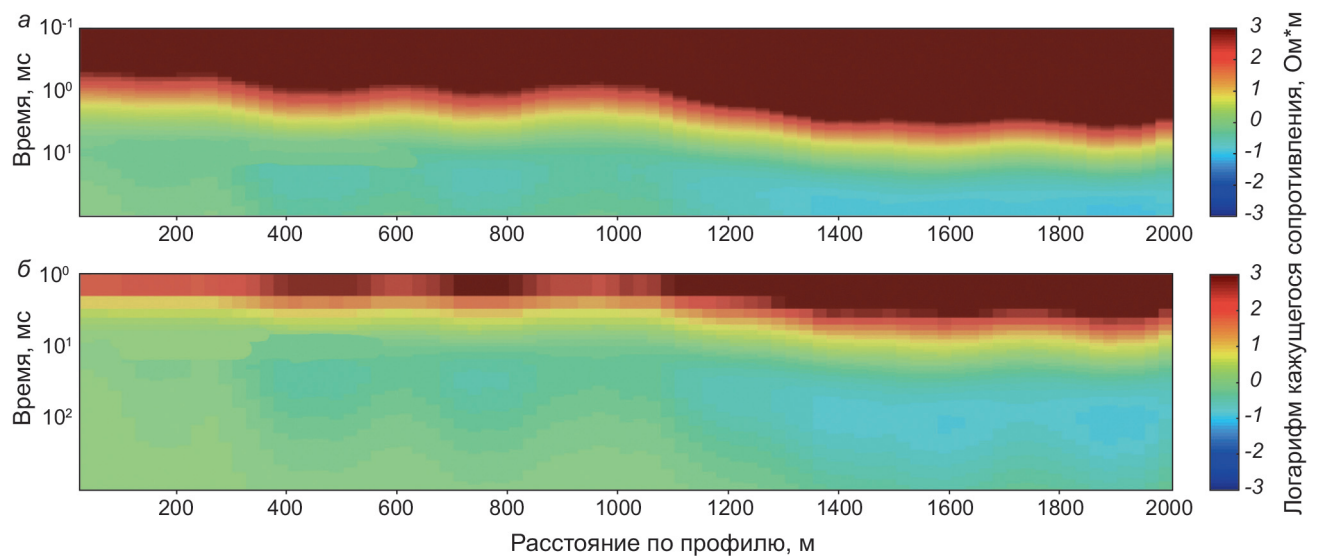


Рис. 2. Псевдоразрезы кажущегося сопротивления, рассчитанные по ИПХ для импульса длительностью 100 мкс (вверху, диапазон времен 100 мкс — 100 мс) и 1 мс (внизу, диапазон времен 1 мс — 1 с)

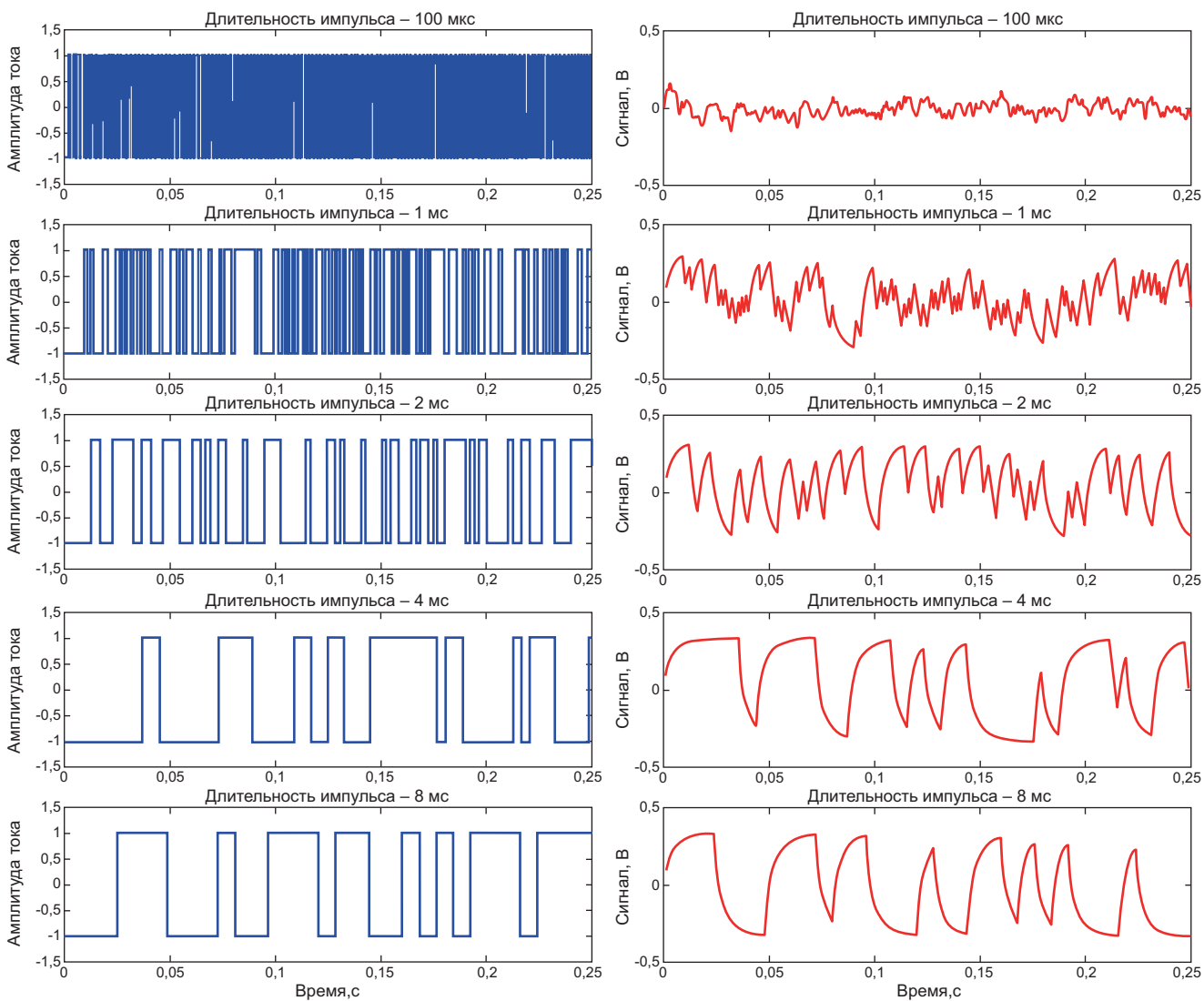


Рис. 3. Фрагменты имитированных токовых (слева) и зарегистрированных (справа) ШПС-сигналов, смоделированных при различной длительности импульса (сверху вниз: 100 мкс, 1 мс, 2 мс, 4 мс и 8 мс)

тока в терминах результирующего уровня шума и его сравнения с таковым для традиционного режима накопления, к смоделированным рядам напряжения был добавлен аддитивный шум: $n(t): s_n(t) = s(t) + n(t)$. Фрагменты шума, равные по длительности ШПС-

сигналам зондирования, были выделены из записи, зарегистрированной при выключенном генераторе в рамках одной из экспедиций в Море Лаптевых. Примеры фрагментов накладываемого шума, а также его спектрограмма, приводятся на рис. 4.

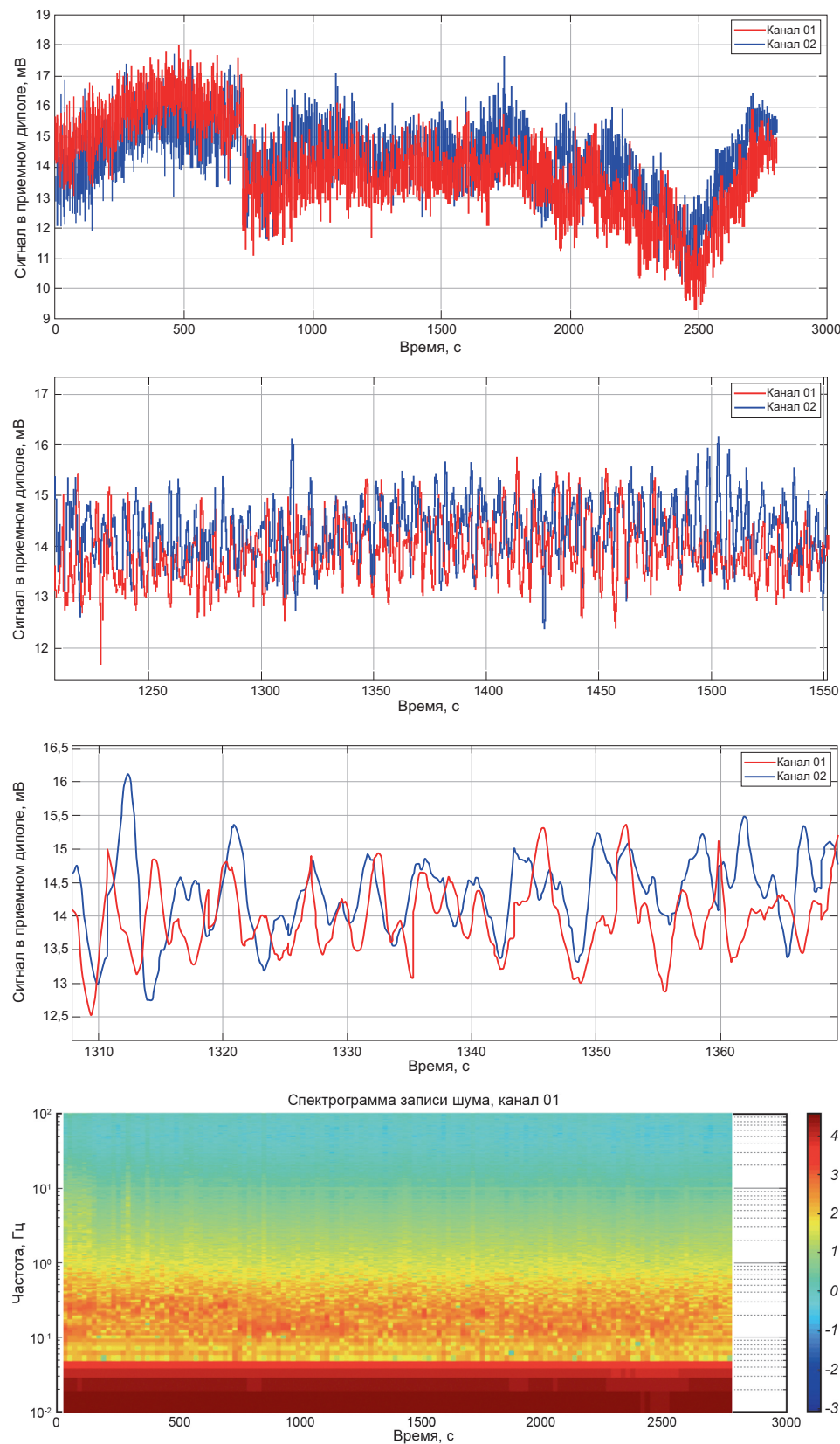


Рис. 4. Примеры сигнала-помехи, накладываемого на имитированные данные в режимах ШПС и накопления. Три верхних панели иллюстрируют поведение шума на различных временных масштабах, на нижней панели показана спектрограмма всей записи шума

Рассматривалось несколько вариантов амплитуды накладываемого шума, основным из которых был вариант со среднеквадратическим значением 1 мВ, что соответствует величинам, наблюдаемым на практике.

В качестве базового результата, с которым проводилось сравнение помехоподавления в режиме ШПС, выступал режим накопления с четырьмя разнополярными импульсами (импульс-пауза 1 с/1с).

На *следующем этапе* выполнялась реконструкция ИПХ по зашумленным ШПС-рядам, а также оценка ПХ в режиме накопления в условиях одинаковой длительности зондирования и строго одинакового ряда наложенного шума. Определение ИПХ $\tilde{h}(t)$ из уравнения свертки (5) с зашумленной правой частью

$$m(t) \cdot h(t) = s_n(t) \tag{5}$$

дает возможность получить оценку ИПХ $\tilde{h}(t)$, содержащую некоторую погрешность относительно истинной ИПХ $h(t)$. Задача состоит в максимальном снижении этой погрешности, т.е. максимальном приближении $\tilde{h}(t)$ к $h(t)$.

Для решения уравнения свертки представляемого переопределенной СЛАУ (4) с зашумленной правой частью, использовался метод наименьших квадратов (МНК) [Жданов, 2007]. Применение МНК дает возможность получить оценку переходной характеристики в следующем виде:

$$\tilde{h} = (A^T \cdot A)^{-1} A^T s_n, \tag{6}$$

где A^T — результат транспонирования матрицы A .

Для регуляризации искомого решения был рассмотрен ряд стабилизирующих функционалов, обеспечивающих повышение гладкости восстанавливаемой кривой ИПХ. Наиболее оптимальным представляется использование модификации метода Марквардта, при которой добавляемое на главную диагональ матрицы $A^T \cdot A$ слагаемое монотонно увеличивается с возрастанием номера столбца/строки данной матрицы, что соответствует увеличению времени становления поля.

Хотя на практике величина $h(t)$ не известна, на этапе модельных исследований расхождение между $\tilde{h}(t)$ и $h(t)$ легко вычислить, например, как

$$\delta(t) = 100\% \cdot \frac{|\tilde{h}(t) - h(t)|}{h(t)}. \tag{7}$$

Полученная таким образом величина может быть использована для оценки коэффициента подавления шума и сравнения качества реконструируемой ИПХ при различных параметрах режима ШПС и режима накопления.

Результаты визуализировались и анализировались в форме индивидуальных кривых зондирования на отдельных станциях, а также профильных

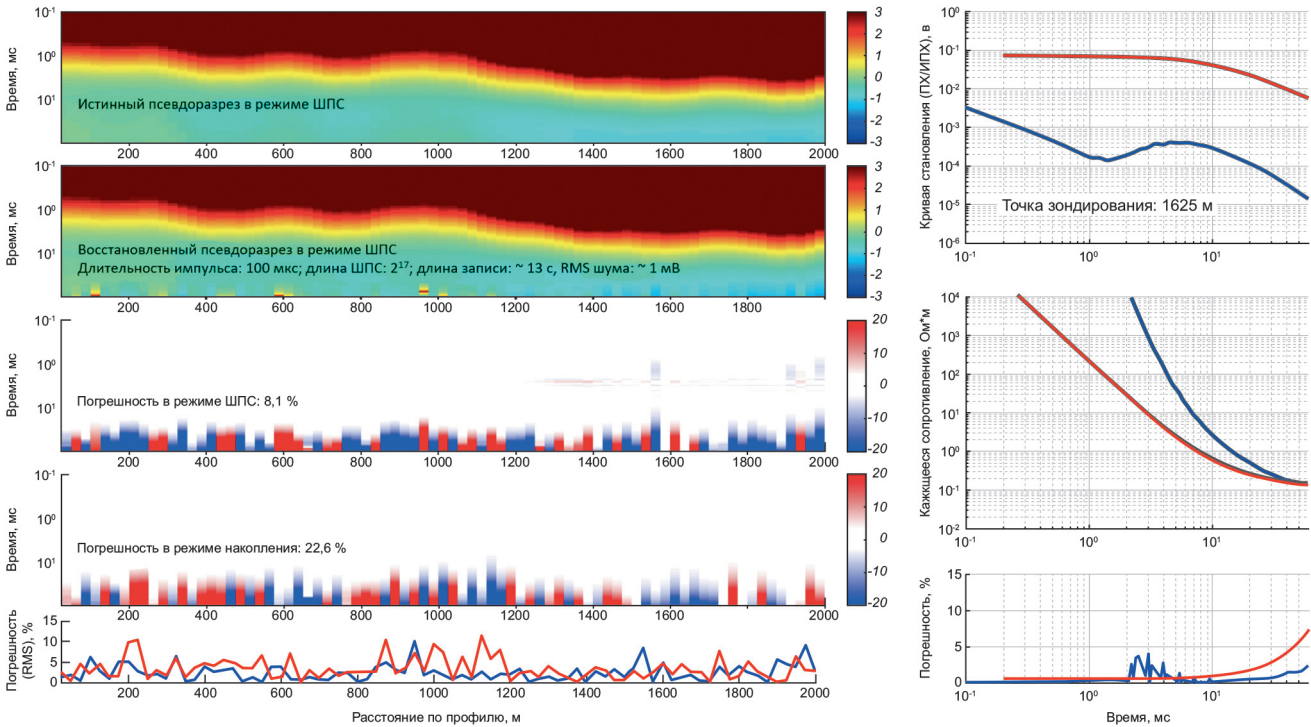


Рис. 5. Пример интерфейса ПО визуализации и анализа результатов в режимах ШПС и накопления. Слева показаны псевдоразрезы кажущегося сопротивления в режиме ШПС (истинного и восстановленного по зашумленным данным), псевдоразрезы отклонений (погрешностей) между истинным и восстановленным кажущимся сопротивлением в режимах ШПС и накопления, а также графики среднеквадратических значений погрешности в заданном временном интервале вдоль профиля (накопление — красным, ШПС — синим). Справа (сверху вниз) представлены кривые становления поля — ПХ (красным) и ИПХ (синим), а также соответствующие им кривые кажущегося сопротивления и погрешности (отклонения от истинных кривых). Истинные кривые показаны серым цветом. Результаты приводятся при длительности импульса 100 мкс

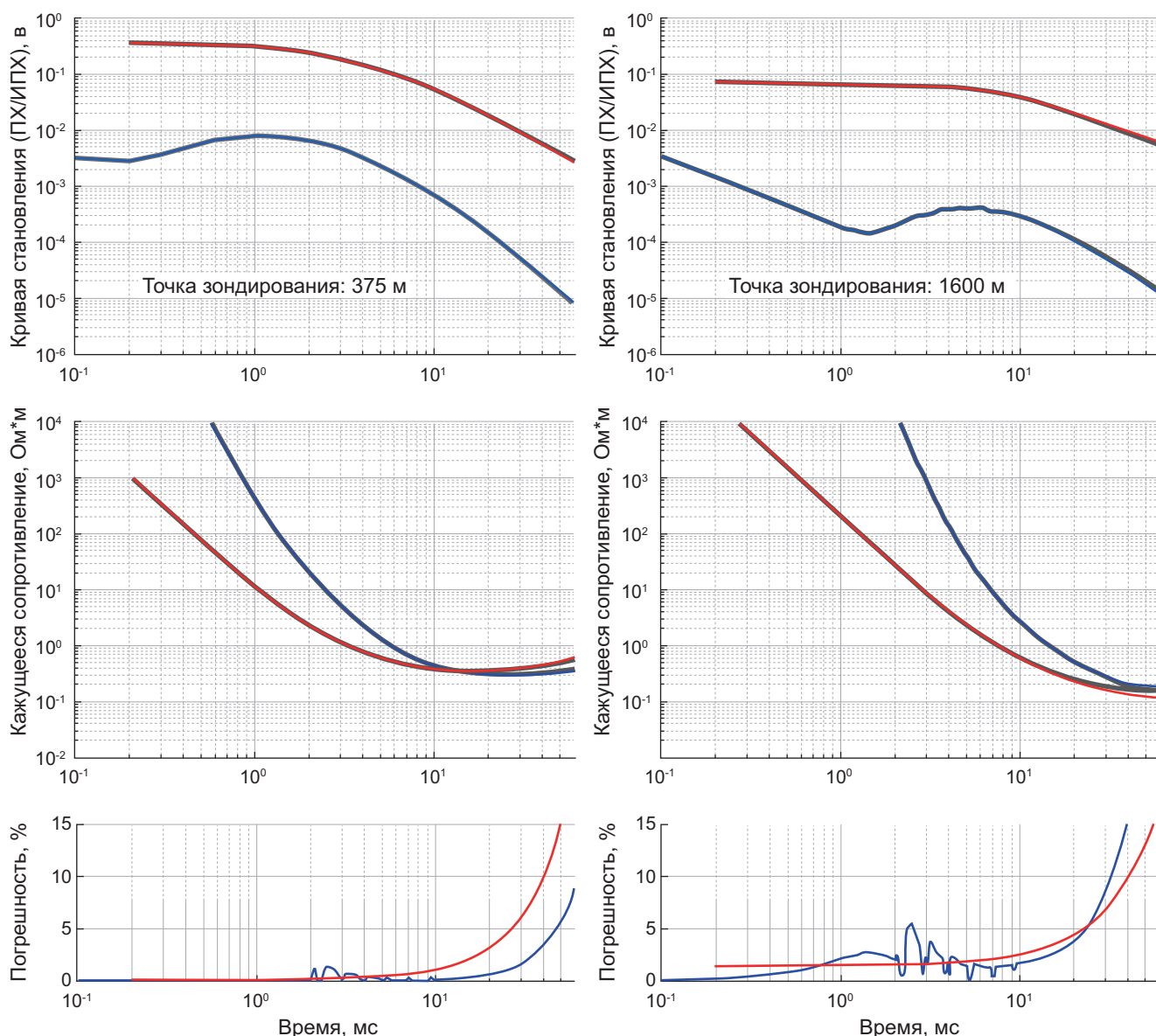


Рис. 6. Примеры сопоставления результатов обработки зашумленных данных в режимах ШПС с длительностью импульса 100 мкс (синий) и накопления (красный). Слева показан результат с преимуществом ШПС, справа — накопления в области времен свыше 20 мс

распределений различных параметров, включая среднеквадратичные погрешности реконструкции ИПХ (в режиме ШПС) и ПХ (в режиме накопления) по зашумленным данным с использованием ПО, специально разработанного в рамках выполнения данного проекта. Результирующие погрешности сравнивались.

Результаты. Результаты представлены в виде оцененных по зашумленным данным ПХ (режим накопления), ИПХ (режим ШПС), кажущегося сопротивления (оба режима), а также в виде погрешностей $\delta(t)$ во всех точках зондирования вдоль профиля и среднеквадратичных значений δ по профилю. Основные результаты представлены на серии рисунков ниже.

Рисунок 5 демонстрирует результаты анализа зашумленных данных ШПС (среднеквадратическое

значение амплитуды шума 1 мВ) для последовательности со 100-мкс импульсами общей длительностью около 13 с. Искомая импульсная переходная характеристика реконструировалась во временном интервале 100 мкс — 100 мс. Распределение относительной погрешности для данного варианта ШПС в рассмотренном временном интервале, в целом, характеризуется более низкими значениями по сравнению с режимом накопления, что также иллюстрируется графиками в нижней левой части рисунка. Кроме того, можно отметить несколько большие значения предельных времен регистрации в режиме ШПС.

На рис. 6 показаны результаты реконструкции кривых становления поля в режимах ШПС (импульсы 100 мкс) и накопления для двух точек профиля, где эффективность указанных подходов существенно отличается. На панелях в левой ча-

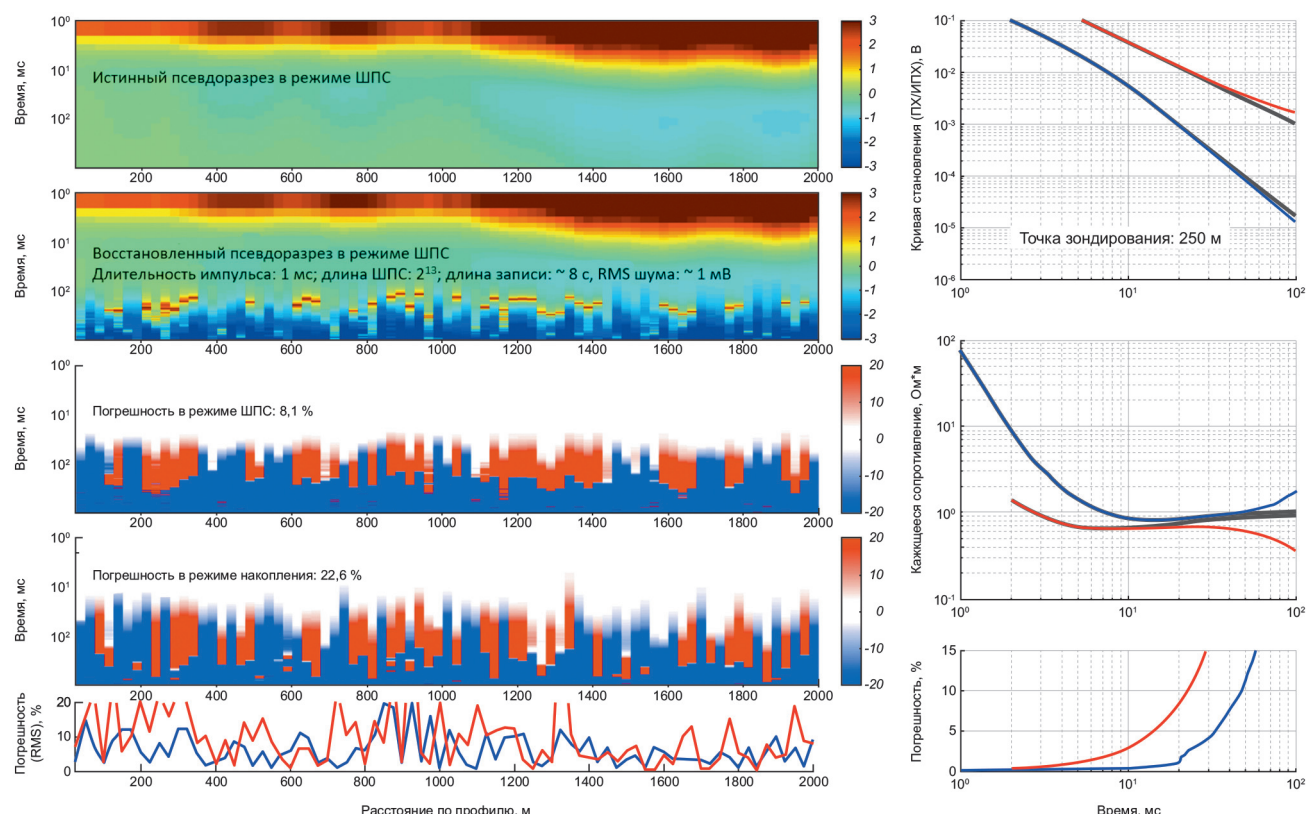


Рис. 7. Результаты сопоставления в режимах ШПС и накопления при длительности импульса 1 мс. Слева показаны псевдоразрезы кажущегося сопротивления в режиме ШПС (истинного и восстановленного по зашумленным данным), псевдоразрезы отклонений (погрешностей) между истинным и восстановленным кажущимся сопротивлением в режимах ШПС и накопления, а также графики среднеквадратической погрешности (накопление — красным, ШПС — синим) в заданном временном интервале вдоль профиля. Справа (сверху вниз) представлены кривые становления поля — ПХ (красным) и ИПХ (синим), а также соответствующие им кривые кажущегося сопротивления и погрешности (отклонения от истинных кривых). Истинные кривые показаны серым цветом

сти рисунка отмечается очевидное преимущество режима ШПС: нарастание погрешности в режиме накопления (красная кривая, нижний график) оказывается гораздо более быстрым. В то же время, кривые в правой части рисунка иллюстрируют некоторое, хотя и не столь радикальное, преимущество режима накопления.

Рисунок 7 аналогичен рис. 5, но иллюстрирует результаты (1–100 мс) для ШПС с длительностью импульса 1 мс и общей длительностью зондирования около 8 с при том же уровне зашумления (1 мВ). Данный вариант ШПС также для большинства пунктов профиля оказывается более эффективным в терминах помехоподавления по сравнению с накоплением.

Примеры сопоставления результатов обработки зашумленных данных в режимах ШПС с длительностью импульса 1 мс приводятся на рис. 8; рис. 9 иллюстрирует снижение эффективности ШПС при увеличении длительности импульса в условиях постоянства общей длины записи. Так, рис. 9, а, построенный для ШПС с импульсами длительностью 2 мс, показывает некоторое снижение качества деконволюции уже при низком уровне шумов (100 мкВ) в диапазоне времен 10–20 мс, а рис. 9, б отражает появление критических искажений при заведомо недостаточной длине последовательности ШПС (импульсы 8 мс).

Ниже приводятся результаты анализа в случае всех рассмотренных последовательностей ШПС.

Для варианта с 100-мкс импульсами средние оценки относительной погрешности в диапазоне времен 10–30 мс составили:

- средняя ошибка в режиме ШПС: 2,0%;
- средняя ошибка в режиме накопления: 3,4%.

Для варианта с 1-мс импульсами (10–60 мс) при RMS шума ~1 мВ:

- средняя ошибка в режиме ШПС: 6,3%;
- средняя ошибка в режиме накопления: 9,9%.

Для варианта с 2-мс импульсами (10–60 мс) при RMS шума ~1 мВ:

- средняя ошибка в режиме ШПС: 9,1%;
- средняя ошибка в режиме накопления: 9,9%.

Для вариантов с 4-мс и 8-мс импульсами (10–60 мс) при RMS шума ~1 мВ средняя погрешность в режиме ШПС превосходит таковую для режима накопления, делая использование ШПС неоправданным.

Таким образом, в рамках рассмотренных условий, в среднем отмечается достаточно значительное преимущество режима ШПС перед накоплением при длительности импульса 100 мкс и 1 мс. При большей длительности импульса это преимущество утрачивается вследствие относительно короткой длины токовой последовательности ШПС и нарушения устойчивости деконволюции.

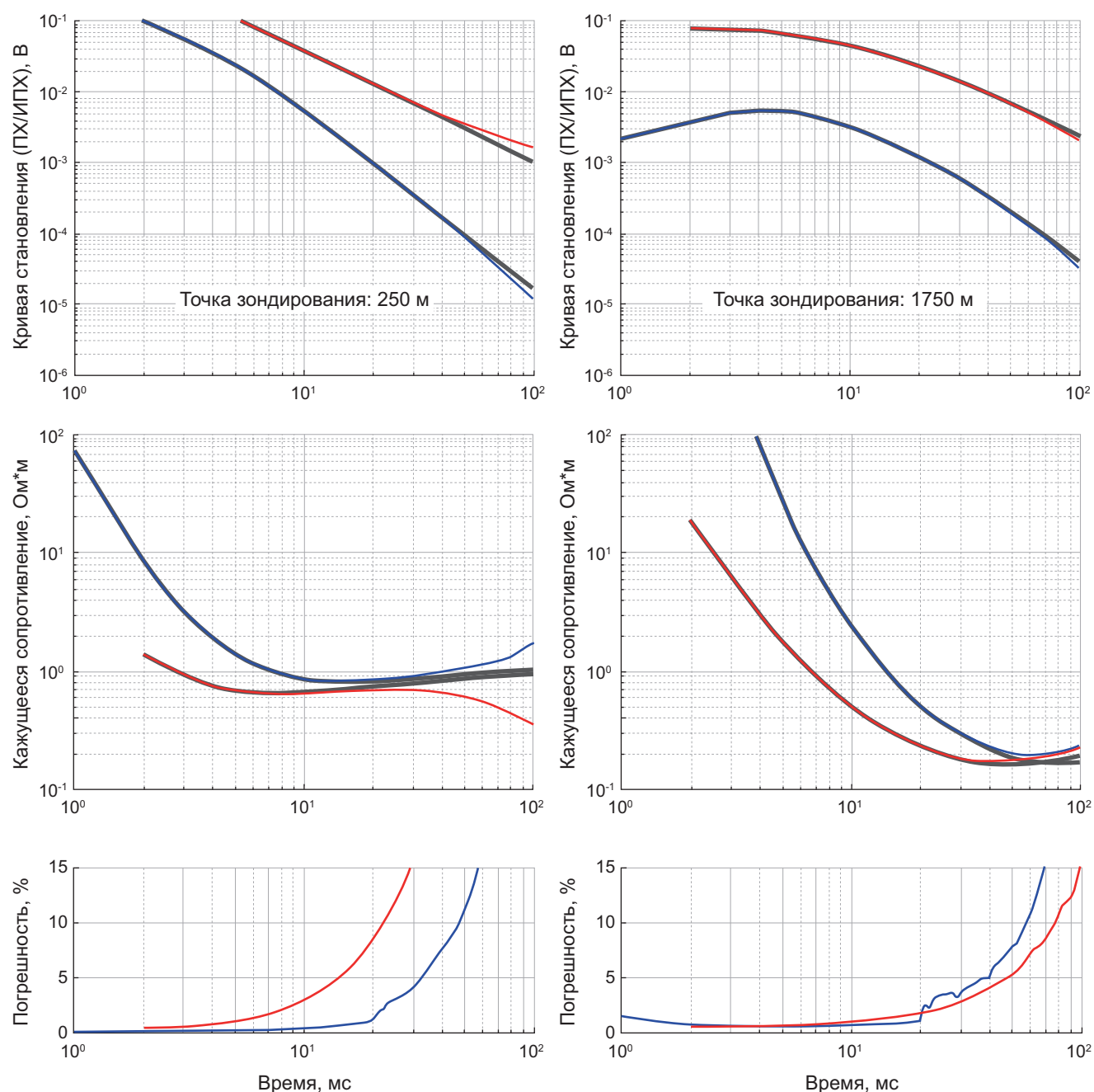


Рис. 8. Примеры сопоставления результатов обработки зашумленных данных в режимах ШПС с длительностью импульса 1 мс (синим) и накопления (красным). Слева показан результат с преимуществом ШПС, справа — накопления в области времен свыше 20 мс

Заключение. Используя численное моделирование полезного сигнала на основе характерной геоэлектрической модели подводной мерзлоты и реальные записи сигнала-помехи, мы провели сравнительный анализ помехоподавления при зондировании становлением поля с применением морской буксируемой диполь-дипольной измерительной установки в режимах накопления с разнополярными импульсами тока и ШПС. Для серии токовых последовательностей в форме ШПС с различной длительностью импульса (100 мкс, 1 мс, 2 мс, 4 мс и 8 мс) и соответствующим количеством импульсов (131072, 8192, 4096, 2048 и 1024 импульса), а также

для сигнала в режиме накопления (импульс/пауза 1 с/1 с) с идентичным аддитивным шумом были получены оценки ИПХ и ПХ для 80 зондирований, имитирующих профиль рассмотренной геоэлектрической модели.

В работе показано, что применение ШПС с достаточным количеством импульсов (не менее 8192) в условиях рассмотренных низкочастотных шумов в среднем обеспечивает приблизительно 1,5-кратное преимущество перед режимом накопления с разнополярными импульсами в терминах средней погрешности кривой зондирования в целевом временном диапазоне (10–60 мс) по всему профилю.

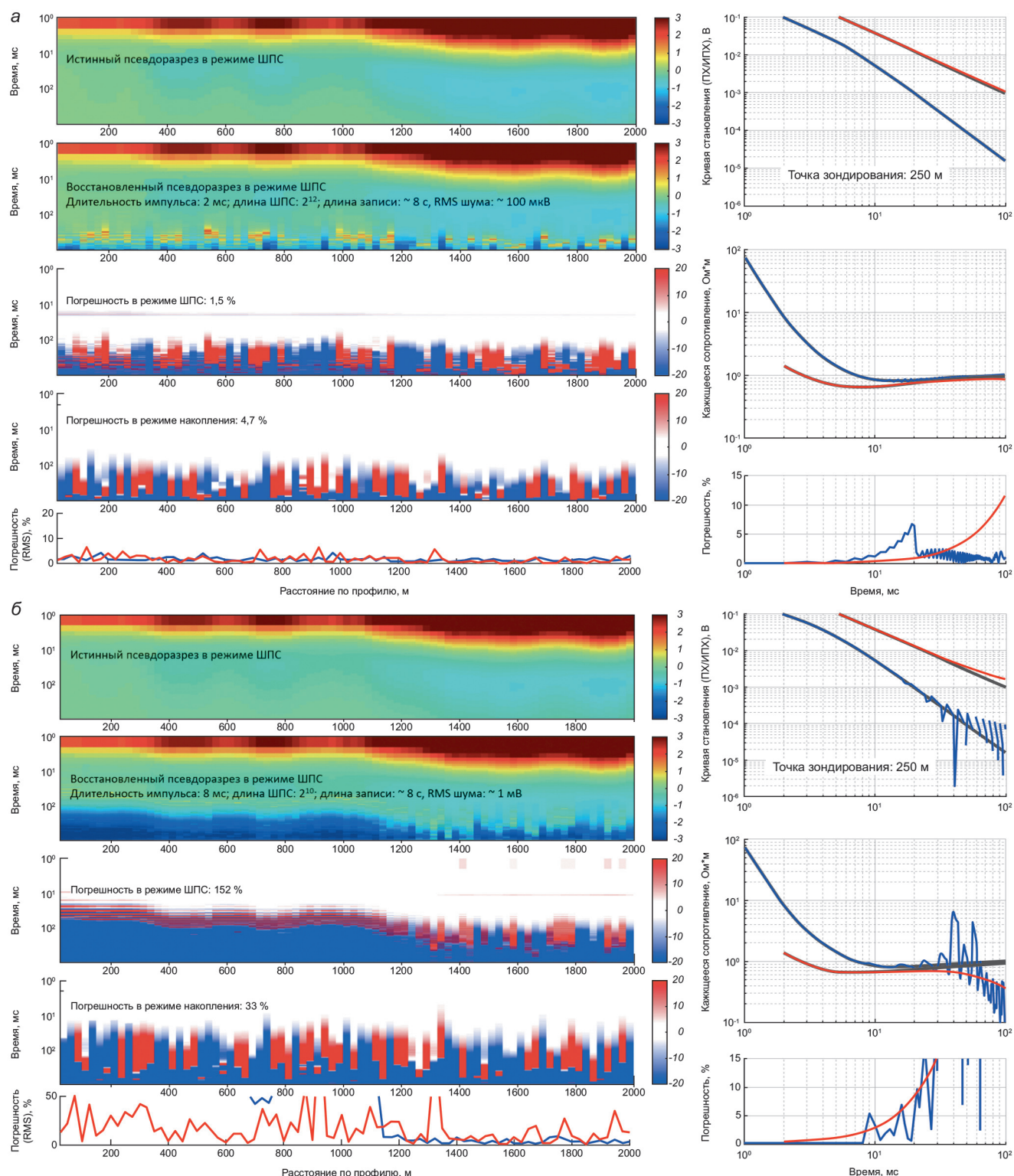


Рис. 9. Результаты сопоставления в режимах ШПС и накопления при длительности импульса 2 мс (а) и 8 мс (б). Слева показаны псевдоразрезы кажущегося сопротивления в режиме ШПС (истинного и восстановленного по зашумленным данным), псевдоразрезы отклонений (погрешностей) между истинным и восстановленным кажущимся сопротивлением в режимах ШПС и накопления, а также графики среднеквадратической погрешности (накопление — красным, ШПС — синим) в заданном временном интервале вдоль профиля. Справа (сверху вниз) представлены кривые становления поля — ПХ (красным) и ИПХ (синим), а также соответствующие им кривые кажущегося сопротивления и погрешности (отклонения от истинных кривых). Истинные кривые показаны серым цветом

На взгляд авторов, несмотря на потенциальные технические трудности с реализацией режима ШПС в системах электромагнитного зондирования, рас-

сматриваемое направление имеет определенные перспективы в связи с рядом ожидаемых преимуществ, которые могут определить дальнейшее развитие

и усовершенствование технологий импульсной электроразведки. Представляется, что при оптимальном выборе параметров ШПС и конфигурации системы наблюдения можно рассчитывать на значительное преимущество перед системами, использующими стандартный режим накопления. Таким образом, как теоретический анализ возможностей применения

ШПС, так и создание алгоритмической, программной и аппаратурной базы для внедрения подобной технологии, являются весьма актуальными направлениями развития разведочной геофизики.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-27-00228).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Великин А.Б., Великин А.А. Новый корреляционный метод импульсной электроразведки с шумоподобными сигналами СТЕМ // Разведка и охрана недр. 2016. № 2. С. 47–54.

Гончаров А.А., Алексеев Д.А., Кошурников А.В. и др. Применение псевдослучайных кодовых последовательностей для повышения эффективности зондирования становлением поля в ближней зоне на Арктическом шельфе // Физика Земли. 2022. № 5. С. 158–170.

Ильичев П.В., Бобровский В.В. Применение шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента) // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 2. С. 5–19.

Кауфман А.А., Алексеев Д.А., Ористальо М. Принципы электромагнитных методов наземной геофизики. Тверь: Международная Ассоциация “АИС”, 2016. 558 с.

Кошурников А.В. Основы комплексного геоэлектроразведочного-геофизического анализа для исследования многолетнемерзлых пород и газогидратов на Арктическом шельфе России // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2020. № 3. С. 116–125.

Жданов М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный Мир, 2007. 712 с.

Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. 2000. № 5. С. 21–26.

Светов Б.С. Основы геоэлектрики М.: ЛКИ, 2008. 656 с.

Светов Б.С., Алексеев Д.А., Агеев В.В. и др. Применение шумоподобных сигналов в зондированиях становлением поля // Геофизика. 2012. № 1. С. 52–60.

Duncan P.M., Ywang A., Edwards R.N., et al. The development and applications of a wide band electromagnetic

sounding system using pseudo-noise source // Geophysics. 1980. V. 45. No. 8. P. 1276–1296.

Giannino F., Leucci G. Electromagnetic Methods in Geophysics: Applications in GeoRadar, FDEM, TDEM, and AEM. Wiley, 2021. 304 p.

Helwig S.L. VIBROTEM ein vergleich zu long-offset transient electromagnetic (LOTEM) in theorie und praxis. Inaugural dissertation zur erlangung des doktorgrades der mathematisch-naturwissenschaftlichen fakultat der universitat zu Koln. 1999.

Key K. 1D inversion of multicomponent, multi-frequency marine CSEM data: Methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers // Geophysics. 2009. 74. P. F9–F20.

Krylov A.A., Ananiev R.A., Chernykh, D.V., et al. A Complex of Marine Geophysical Methods for Studying Gas Emission Process on the Arctic Shelf // Sensors. 2023. No. 23. P. 3872.

Nabighian M.N., Macnae J.C. Time domain electromagnetic prospecting methods / in M.N. Nabighian, ed., Electromagnetic methods in applied geophysics: SEG, Investigations in Geophysics. 1991. V. 2. No. 3. P. 427–520.

Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nature Communications. 2017. No. 8. P. 15872.

Svetov B.S., Alekseev D.A., Yakovlev A.G. On implementation of noise-like signals in time-domain EM imaging // Geobaiikal 2012 — 2nd International Research and Application Conference on Electromagnetic Research Methods and Integrated Geophysical Data Interpretation. 2012. P. S4.

Zepernick H.-J., Finger A. Pseudo Random Signal Processing. Theory and Application. Wiley. 2005. 432 p.

Статья поступила в редакцию 05.12.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 502/504:624

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-119-128

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСОБЕННОСТЕЙ АБИОТИЧЕСКИХ СРЕД ЭКОСИСТЕМ — ЛИТОСФЕРЫ, ПЕДОСФЕРЫ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Виктор Титович Трофимов¹, Владимир Александрович Королев^{2✉},
Марина Анатольевна Харьковина³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; trofimov@rector.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; va-korolev@bk.ru ✉

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kharkina@mail.ru

Аннотация. На основе статистических данных по составу работ для изучения абиотических сфер Земли (литосферы, педосферы, атмосферы и поверхностной гидросферы) в составе инженерно-экологических изысканий показаны разработки современной нормативно-технической базы для оценки количественных показателей состояния экосистем. Описаны достижения современной нормативно-технической базы в плане регламентации показателей состояния абиотических сфер экосистем. Намечены пути дальнейшего ее совершенствования на основе использования учения об экологических функциях как фундаментальной интегральной характеристики особенностей абиотических сред экосистем и систематике частных показателей путем введения четырех категорий интегральных показателей (ресурсных, геохимических, геофизических и геодинамических). Обращено внимание на необходимость разработки интегральных показателей всех абиотических сред экосистем на основе разработок, предложенных в экологической геологии. Рассмотрены различные подходы для оценки таких интегральных показателей и предложен вариант их определения на основе метода сводных показателей.

Ключевые слова: экологические функции абиотических сред, ресурсные параметры, геохимические параметры, геофизические параметры, геодинамические параметры, классификация, интегральные показатели, методы определения показателей

Для цитирования: Трофимов В.Т., Королев В.А., Харьковина М.А. Экологические функции как фундаментальные интегральные характеристики особенностей абиотических сред экосистем — литосферы, педосферы, атмосферы и гидросферы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 119–128.

ECOLOGICAL FUNCTIONS AS A FUNDAMENTAL INTEGRAL CHARACTERISTICS OF PECULIARITIES OF ABIOTIC ENVIRONMENTS OF ECOSYSTEM — LITHOSPHERE, PEDOSPHERE, ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE

Viktor T. Trofimov¹, Vladimir A. Korolev^{2✉}, Marina A. Kharkina³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; trofimov@rector.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; va-korolev@bk.ru ✉

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kharkina@mail.ru

Abstract. The achievements of present regulatory and technical base for assessing quantitative indicators of ecosystems state are shown relying on the statistics of types of jobs for studying the abiotic spheres of the Earth (lithosphere, pedosphere, atmosphere and surface hydrosphere) as a part of engineering-ecological survey. Those achievements regarding to the regulation of indicators of state of abiotic spheres of ecosystem are described. Ways for further improvement of regulatory and technical base have been outlined using the doctrine of ecological functions of the lithosphere as a fundamental integral characteristic of abiotic spheres of ecosystems and the systematization of individual indicators by introducing of four categories of integral indicators (resource, geochemical, geophysical and geodynamic). Attention is drawn to the need to elaborate the integral indicators of all abiotic spheres of ecosystems basing on development of ecological geology. Various approaches for assessing of such integral indicators are considered. Variant of their determination on the base of summary indicators method is proposed.

Keywords: ecological functions of abiotic spheres, resource parameters, geochemical parameters, geophysical parameters, geodynamic parameters, classification, integral indicators, methods for determining indicators

For citation: Trofimov V.T., Korolev V.A., Kharkina M.A. Ecological functions as a fundamental integral characteristics of peculiarities of abiotic environments of ecosystem — lithosphere, pedosphere, atmosphere and hydrosphere. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 119–128. (In Russ.).

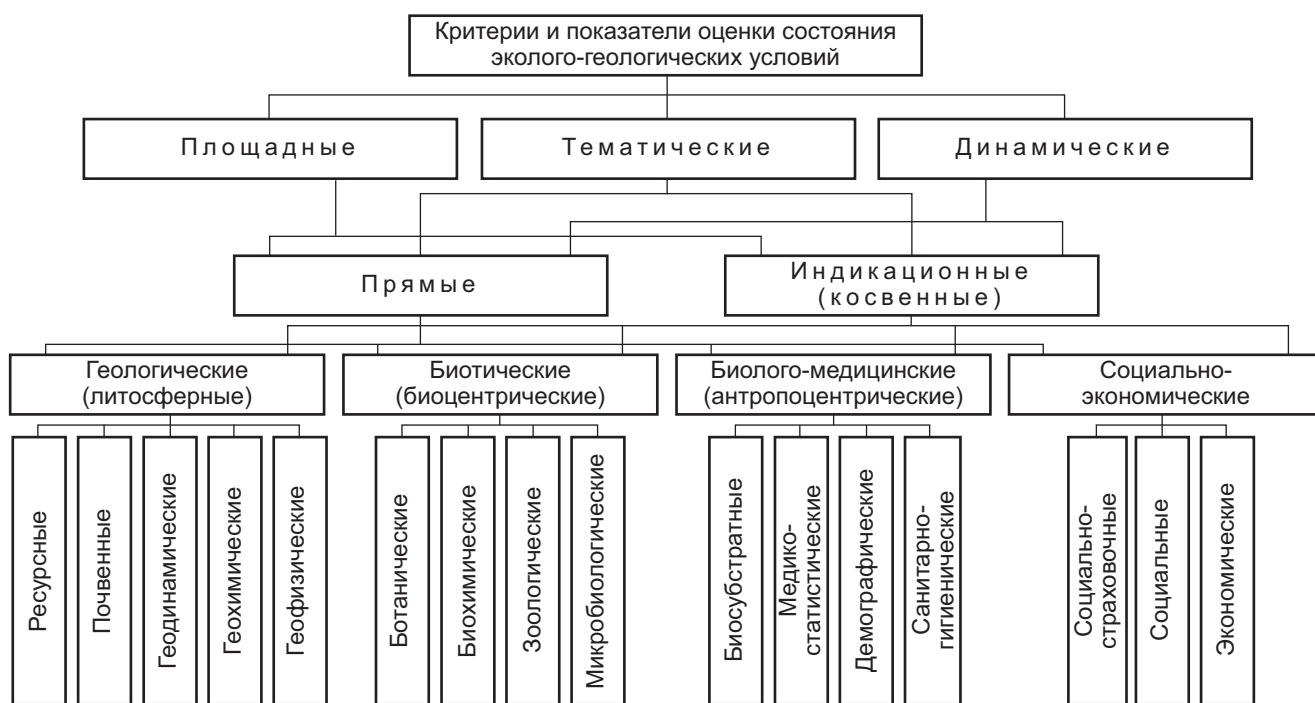


Рис. 1. Систематика показателей, используемых при оценке состояния эколого-геологических условий [Трофимов, 2012]

Введение. Важнейшим практическим и теоретическим вопросом современной экологической геологии и геоэкологии является поиск надежных параметров для оценки состояния экосистем. Под *экологической оценкой* [Дмитриев, 2004] понимается параметрическое определение состояний природной среды, обеспечивающих существование сообществ живых организмов, характерных для этих состояний в условиях естественного или антропогенного режимов их развития. Такая оценка сводится к оценке химического, биологического состава и физических свойств природного объекта, обуславливающих устойчивое функционирование в нем конкретных сообществ живых организмов, сохранение определенного типа экологической сукцессии, или к оценке его пригодности для различных видов использования человеком (совмещение био- и антропоцентризма). При этом исследуются как свойства абиотических сред, так и параметры структуры и функционирования биоты — природного объекта в естественных и измененных условиях с целью их рационального использования, обеспечения устойчивости, оптимальной эксплуатации для удовлетворения потребностей людей и жизни организмов [Алимов и др., 1999; Дмитриев, 2004, 2009, 2010; Дмитриев и др., 2014, Королев, 2020].

Для оценки состояния эколого-геологических условий используются различные критерии и показатели. Одна из первых систематик критериев и показателей была дана В.Т. Трофимовым и Д.Г. Зилингом еще в 2002 году (рис. 1) [Трофимов, Зилинг, 2002].

И для прямых, и для индикационных (косвенных) показателей актуальным остается вопрос об их

свертке для нахождения интегральных показателей. Необходимость получения интегральных показателей обусловлена чрезвычайно большим количеством и разнообразием частных показателей состояния экосистем, отражающих какие-либо их отдельные особенности, в то время как интегральные показатели отражают общие особенности экосистем.

Поэтому цель настоящей работы — проанализировать подходы к получению интегральных показателей для оценки состояния экосистем и предложить их оценку на основе экологических функций как фундаментальной интегральной характеристики особенностей абиотических сред экосистем.

Определение интегральных показателей состояния экосистем. Разработка различных методик оценки состояния экосистем в настоящее время базируется в основном на индикаторном подходе и индексах состояния систем, их устойчивости, а также — на моделях-классификациях, подавляющее большинство которых построено на балльном или балльно-индексном подходе [Дмитриев и др., 2014]. Положительные стороны и недостатки балльно-индексного подхода не раз обсуждались в литературе [Александрова и др., 2000; Алимов и др., 1999; Дмитриев, 2010; Дмитриев и др., 2014; Дмитриев, Фрумин, 2004; Трофимов, 2012].

Нормативно-техническая база на проведение инженерно-экологических изысканий, которую мы обсуждаем с 1997 г., постоянно улучшается. В ней регламентировано (табл. 1) большое количество пунктов по изучению абиотических сред Земли (литосферы, педосферы, атмосферы и поверхностной гидросферы). К достижениям СП 502.1325800.2021 относятся предложения по использованию цело-

Таблица 1

Статистика по составу работ на изучение абиотических сред экосистем в нормативно-технических документах

Абиотические среды экосистем	Количество пунктов, регламентирующих состав работ инженерно-экологических изысканий в нормативах			
	СП 11-102-97 (регламентируют только инженерно-экологические изыскания)	СП 47.13330.2012	СП 47.13330.2016	СП 502.1325800.2021 (регламентируют только инженерно-экологические изыскания)
		(регламентируют инженерно-геодезические, инженерно-геологические, инженерно-гидрометеорологические и инженерно-экологические изыскания)		
Литосфера и ее компоненты (грунты, донные отложения, подземные воды, подземные газы, ландшафты, геологические процессы, радиационная обстановка, радоноопасность, вибрация, электромагнитные излучения)	82	21	10	163
Педосфера и ее компоненты (почвы, плодородный слой, гумус)	35	7	8	83
Атмосфера и ее компоненты (воздух, электромагнитные излучения, шумы, инфра- и ультразвук, гидрометеорологические процессы)	19	9	9	46
Поверхностная гидросфера и ее компоненты (поверхностные воды суши, морские воды, гидрометеорологические процессы)	17	14	10	52
Все абиотические среды экосистем	153	23	37	344

Примечание. Пункты СП, в которых одновременно регламентировано изучение нескольких абиотических сред экосистем, учитывались несколько раз.

го ряда количественных параметров и критериев оценки абиотических сред экосистем.

Для классификации показателей мы предлагаем в этом нормативно-технический документе разработать и внести общий их перечень с подразделением в соответствии с учением об экологических функциях абиотических сфер Земли [Снакин и др., 1992; Трофимов, 2012; Трофимов, Харькина, 2017а, 2017б; Трофимов и др., 2018] на категории ресурсных, геохимических, геофизических и геодинамических показателей. Напомним, что под экологическими функциями абиотических сред (сфер Земли) понимается все многообразие функций, определяющих и отражающих роль и значение этих геосфер, включая их состав, объем, динамику функционирования, геохимические и геофизические поля, в жизнеобеспечении биоты, в первую очередь человеческого сообщества [Снакин, 1992]. Всего выделено четыре экологических функции — ресурсная, геохимическая, геофизическая и геодинамическая, каждая из которых определяется своими абиотическими параметрами.

В действующем нормативно-техническом документе (СП 502.1325800.2021) среди *параметров литосферы и педосферы, характеризующих ресурсную экологическую функцию абиотических сред* указаны только количественные показатели мощности плодородного и потенциально плодород-

ного слоев почв, нормы снятия плодородного слоя (п. 5.20.8, табл. 5.8 свода правил), а также показатель, оценивающий качество подземных вод, как биогенного ресурса — показатель общей минерализации воды (п. 5.13.1 СП 502.1325800.2021). Отметим, что в современном нормативном документе нет ни одного параметра, оценивающего ресурс геологического пространства как экологическую категорию.

Среди *параметров литосферы и педосферы, характеризующих геохимическую экологическую функцию абиотических сред*, определяющих степень загрязнения почв и иных грунтов, донных отложений, снежного покрова, а также подземных вод внесен только суммарный показатель загрязнения тяжелыми металлами и металлоидами различных классов опасности (п. 5.11.14, табл. 5.2 СП 502.1325800.2021). В современных нормативах также предлагается оценка и газогеохимической опасности грунтов с использованием четырехразрядной шкалы (СП 502.1325800.2021 п. 5.18.9). Однако загрязнения иными компонентами — токсичной органикой, патогенной биотой и другими, в этих документах не регламентированы.

К нормативным *параметрам литосферы и педосферы, характеризующим геофизическую экологическую функцию абиотических сред*, согласно СП 502.1325800.2021, относятся в основном параметры техногенных источников различных

Таблица 2

Корреляционная матрица оценки состояния экосистем

Классы состоя- ния геоэкологи- ческих* условий	Параметры абиотических и биотических компонентов								Уровни состояния экосистем
	Абиотические				Биотические				
	Ресурсные	Геодина- мические	Геохими- ческие	Геофи- зические	Антропоцен- трические	Биоцентрические			
						Ботани- ческие	Зоологи- ческие	Микробио- логические	
Удовлетвори- тельный	P ₁	ГД ₁	ГХ ₁	ГФ ₁	АЦ ₁	Б ₁	З ₁	МБ ₁	Норма (Н)
Условно удовлет- ворительный	P ₂	ГД ₂	ГХ ₂	ГФ ₂	АЦ ₂	Б ₂	З ₂	МБ ₂	Риск (Р)
Неудовлетвори- тельный	P ₃	ГД ₃	ГХ ₃	ГФ ₃	АЦ ₃	Б ₃	З ₃	МБ ₃	Кризис (К)
Катастрофиче- ский	P ₄	ГД ₄	ГХ ₄	ГФ ₄	АЦ ₄	Б ₄	З ₄	МБ ₄	Бедствие (Б)

Примечание. Буквами обозначены значения параметров: Р — ресурсных, ГД — геодинамических, ГХ — геохимических и ГФ — геофизических абиотических сред, АЦ — антропоцентрических, Б — ботанических, З — зоологических, МБ — микробиологических. Цифры в нижнем регистре соответствуют критериям оценки экосистем. * Под геоэкологическими условиями авторами понимается условия, созданные влиянием всех абиотических сред на условия функционирования биоты.

физических полей: мощность эквивалентной дозы (МЭД) внешнего гамма-излучения, плотность потока радона, эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА радона); удельная эффективная активность естественных радионуклидов (радий (²²⁶Ra), торий (²³²Th), калий (⁴⁰K) и цезий (¹³⁷Cs)), уровень звукового давления, уровень общей вибрации, напряженность электрического поля, уровень электромагнитного поля, предельно допустимые уровни магнитных полей, допустимые уровни звукового давления, допустимые уровни ультразвука.

Параметры литосферы, характеризующие геодинамическую экологическую функцию абиотических сред, и которые используются для оценки интенсивности проявления геологических (оползни, сели, землетрясения, карст, термокарст, термоэрозия и др.), гидрометеорологических (лавины, русловые деформации, наводнения, цунами) и атмосферных (ураганы, смерчи), достаточно подробно описаны для двадцати природных процессов, включая антропогенно обусловленные (переработка берегов водохранилищ, подтопление и др.) в другом действующем нормативно-техническом документе СП 115.13330.2016 «Геофизика опасных природных воздействий». Однако, их оценка дана только в антропоцентрическом аспекте.

Все вышеупомянутые показатели являются *частными*, т.е. описывающими особенность какой-либо одной компоненты экологической функции: либо загрязнение одной из компонент литосферы (например, донных отложений), либо один атмосферный процесс (например, смерчи) и т.п. В существующей нормативно-технической базе инженерно-экологических изысканий не хватает **интегральных показателей**. Напомним, что *интегральная оценка* предполагает наличие этапа, связанного с объединением ранее разнородных

(многокритериальных, частных) оценок в одно целое с учетом их вклада в общую оценку объекта, а *интегральный показатель* отражает комплекс характеристик или параметров, которые описывают данный объект с учетом вклада каждого из факторов формирования данного объекта.

Интегральные параметры оценки экосистем в настоящее время практически не разработаны, частично разработана только структура интегральных критериев. Она, в частности, может быть выражена в виде корреляционной матрицы (табл. 2), в которой каждому классу геоэкологических условий соответствуют свои уровни нарушенности экосистем [Трофимов, Зилинг, 2002], при этом используются и абиотические и биотические параметры состояния экосистем, как это предлагал сделать в своих работах Б.В. Виноградов [1998].

Однако, наряду с этим, есть и иные подходы. В настоящее время предложен ряд методов оценки состояния экосистем на основе разных интегральных показателей.

А. Метод балльных и балльно-индексных оценок. Он исторически применялся одним из первых и был основан на экспертной балльной оценке каждого параметра предлагаемой оценочной шкалы состояния экосистемы с учетом весовых коэффициентов для каждого критерия. Наилучшее состояние экосистемы соответствует максимальному (или минимальному в зависимости от параметров) набору суммы всех баллов.

При этом в перечень признаков благополучия экосистемы, по которым подсчитываются баллы, включались, например, такие параметры как: 1 — количество оптимальной первичной продукции, создаваемой в экосистеме; 2 — количество и качество воды; 3 — видовое биоразнообразие; 4 — устойчивость к изменению параметров естест-

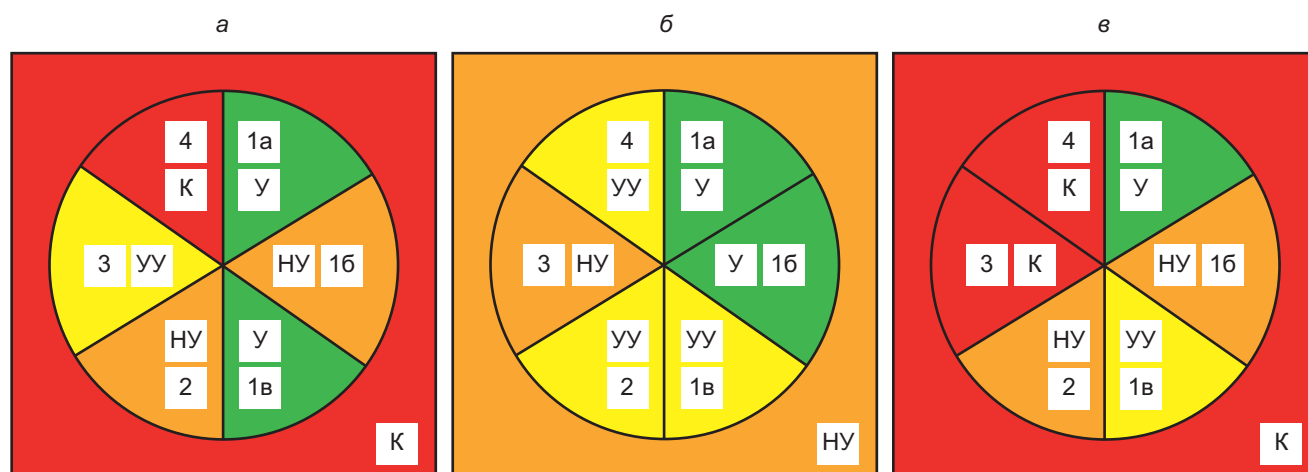


Рис. 2. Типовой вариант интегральной оценки состояния эколого-геологических условий литосферы [Трофимов, Зилинг, 2002]: *a* — интегральная оценка соответствует катастрофическому классу эколого-геологических условий и принимается по состоянию геофизических полей (4), состояние остальных компонентов литосферы более благоприятное и варьирует от класса удовлетворительного состояния (1а, 1в) до класса неудовлетворительного состояния (1б, 2); *б* — интегральная оценка соответствует классу неудовлетворительного состояния эколого-геологических условий и принимается по состоянию геохимической обстановки (3), состояние остальных компонентов литосферы варьирует от класса удовлетворительного (1а, 1б) до класса условно удовлетворительного (1а, 2, 4); *в* — интегральная оценка соответствует классу катастрофического состояния эколого-геологических условий и принимается по состоянию геохимических (3) и геофизических (4) полей, состояние остальных компонентов литосферы более благоприятное и варьирует от класса удовлетворительного (1а) до класса неудовлетворительного состояния эколого-геологических условий (1б, 2)

венного и антропогенного режимов; 5 — количество биоты (биомасса); 6 — скорость самоочищения и др. [Дмитриев, 2004]. Интегральная оценка получалась по сумме баллов, в том числе с учетом вклада (значимости, «веса») того или иного параметра. При этом вклад оценивался экспертным путем, а потому был часто субъективным.

Б. Метод оценки проективного покрытия. Рядом авторов [Караваева, Тихонов, 2022], предлагалось для инженерно-экологических изысканий в качестве интегрального показателя оценки состояния экосистем использовать *степень проективного покрытия фитоценозов*. Этот показатель отражает продуктивность экосистемы, предельно просто определяется в полевых условиях и не требует специализированных компетенций. Считается, что проективное покрытие более 50% характеризует устойчивую экосистему и наоборот.

Однако этот показатель отражает лишь биотическую составляющую экосистемы и то не в полном объеме, так как не учитывает зооценоз.

В. Метод оценки энергетических параметров экосистемы представляется весьма перспективным среди интегральных показателей. Он основан, в частности, на количественной оценке энергии, потребляемой данной экосистемой. Однако и здесь этот показатель отражает в большей степени биотическую составляющую экосистемы, ее функционирование, а не роль абиотической составляющей.

Кроме того, экосистема не только потребляет энергию, но и производит ее, а также обменивается энергией с соседними экосистемами и с окружающей средой. Дать всем этим процессам энергообмена интегральную оценку весьма сложно.

Г. Метод оценки на основе доминанты наихудшего показателя основан на использовании корреляционной матрицы оценки состояния экосистем (табл. 2).

Для учета всей гаммы экологических свойств абиотических сред экосистем составляется циклограмма с выделением сегментов по числу анализируемых экологических функций и ранжированием на классы состояния по аналогии с оценкой эколого-геологических условий, что было сделано ранее в экологической геологии. Примеры такой оценки приведены на рис. 2 применительно к состоянию литосферы, где показаны классы состояния территорий в соответствии с табл. 2. Подобную оценку можно сделать и для других абиотических сред экосистем, тогда уже необходимо будет использовать термин «классы состояния геоэкологических условий».

По нашему мнению, дальнейшая работа по поиску интегрального показателя состояния экосистем должна быть направлена на использование в качестве теоретической базы учения об экологических функциях абиотических сред, на оценке значимости введенных показателей состояния абиотических сред и на разработку подходов к их интегральной оценке. В рамках этого направления можно использовать метод сводных показателей.

Д. Метод сводных показателей (МСП). Этот метод поиска интегрального показателя реализуется в несколько этапов [Дмитриев, 2004, Трофимов и др., 2018]: 1) обоснование системы критериев диагностирования экосистемы; 2) переход к безразмерным показателям (нормирование); 3) выбор вида интегрального показателя Q ; 4) ввод оценки

Таблица 3

Критерии оценки особенностей абиотических сред экосистем на основе экологических функций массива грунтов

Критерий	Параметры (x_i)	Преобразованные (без-размерные) параметры, q_i
А. Биоцентрические критерии и параметры экологических функций		
<i>Эколого-ресурсная</i>		
Ресурс геологического пространства	Относительный объем для расселения биоты, x_1 , %	q_1
Ресурс, качество и доступность воды	Влажность грунта, x_2 , %	q_2
	Влажность завядания, x_3 , %	q_3
	Общая минерализация, x_4 , г/л	q_4
Ресурс питательных веществ для биоты	Запас (отн. масса) питательных веществ, x_5 , %	q_5
Ресурс почв, как среды обитания почвенной биоты	Мощность почв, x_6 , м	q_6
	и содержание гумуса, x_7 , %	q_7
Ресурс грунтов — «строительных» материалов для гнезд биоты	Наличие (отсутствие) используемых грунтов, их мощность, x_8 , м	q_8
<i>Эколого-геохимическая</i>		
Наличие биофильных элементов	Содержание С, N, P, K, Са в грунтах, x_{9-13} , %	q_9-q_{13}
Тип и скорость геохимической миграции веществ	Коэффициенты: фильтрации, x_{14} , м/сут,	q_{14}
	диффузии, x_{15} , см ² /с),	q_{15}
	осмоса, x_{16} , см ⁵ /моль·с и др.	q_{16}
Формирование геохимических барьеров разного типа	Тип барьера и его параметры: мощность, x_{17} , м;	q_{17}
	сорбционная способность, x_{18} , % и др.	q_{18}
Геохимические аномалии	Тип и величина аномалии, x_{19} , %	q_{19}
<i>Эколого-геодинамическая</i>		
Влияние процесса на грунтовый массив	Коэффициент относительной пораженности процессом, x_{20} , %; параметры ЭГП по СП 47.13330.2016	q_{20}
Парагенез ЭГП как фактор биоразнообразия (как положительное, так и отрицательное влияние)	Влияние процесса на биоразнообразие: число видов/ед. площади, x_{21} ;	q_{21}
	индекс разнообразия Шеннона, x_{22}	q_{22}
<i>Эколого-геофизическая</i>		
Наличие природных аномалий геофизических полей: тепловой вибрационного акустического электромагнитного радиационного	Влияние аномалий полей на биоту:	
	Тепловая аномалия, x_{23} , °С	q_{23}
	Вибрационная аномалия, x_{24} , МГц	q_{24}
	Акустическая аномалия, x_{25} , дБ	q_{25}
	Аномалия электромагнитного поля, x_{26} , Н	q_{26}
	Аномалия радиационного поля, x_{27} , мкЗв	q_{27}
Наличие геопатогенных зон	Отклонения функций у организмов, x_{28} , %	q_{28}
Б. Антропоцентрические критерии и параметры экологических функций		
<i>Эколого-ресурсная</i>		
Ресурс горючих полезных ископаемых	Запасы ископаемых, x_{29} , т;	q_{29}
	x_{30} , м ³	q_{30}
Ресурс неметаллических полезных ископаемых	Запасы ископаемых, x_{31} , т;	q_{31}
	x_{32} , м ³	q_{32}
Ресурс металлических полезных ископаемых	Запасы ископаемых, x_{33} , т	q_{33}
Ресурс геологического пространства	Относительный объем для инженерно-хозяйственной деятельности, x_{34} , %	q_{34}
Ресурс, качество и доступность воды	Запасы воды, x_{35} , м ³	q_{35}
	Общая минерализация, x_{36} , г/л	q_{36}
Почвенный ресурс и его плодородие	Запасы гумуса x_{37} , % от природного; плодородие почв x_{38} , % от потенциального	q_{37}
		q_{38}
<i>Эколого-геохимическая</i>		
Загрязненность грунтов тяжелыми металлами	Превышение ПДК/ОДК, x_{39} ;	q_{39}
	x_{40} , ПДУ	q_{40}
	Суммарный показатель загрязнения, x_{41} , Z_c	q_{41}

Критерий	Параметры (x_i)	Преобразованные (без-размерные) параметры, q_i
Загрязненность грунтов органическими токсикантами	Превышение ПДК/ОДК, x_{42} ;	q_{42}
	x_{43} , ПДУ	q_{43}
Загрязненность грунтов радионуклидами	Превышение ПДК/ОДК, x_{44} ;	q_{44}
	x_{45} , ПДУ	q_{45}
Загрязненность грунтов патогенными орга-низмами	Индекс БГКП, x_{46} ;	q_{46}
	индекс энтерококков x_{47} и др.	q_{47}
Загрязненность грунтов пестицидами	Превышение ПДК/ОДУ, x_{48}	q_{48}
Газогеохимическая загрязненность	Превышение ПДК, ПДУ, x_{49}	q_{49}
Геохимическая миграция веществ	Скорость миграции (подвижность элементов);	
	коэффициенты: фильтрации, x_{50} , м/сут;	q_{50}
	диффузии, x_{51} , см ² /с,	q_{51}
	осмоса, x_{52} , см ⁵ /моль·с и др.	q_{52}
Наличие защитного геохимического барьера	Тип барьера и его параметры: мощность, x_{53} , м;	q_{53}
	сорбционная способность, x_{54} , % и др.	q_{54}
Эколого-геодинамическая		
Парагенез природных и инженерно-геологи-ческих процессов: эндогенных экзогенных	Интенсивность проявления процесса по СП 115.13330.2016:	
	x_{55-56} ,	q_{55-56}
	x_{57-67} ,	q_{57-67}
Эколого-геофизическая		
Наличие техногенных аномалий геофизиче-ских полей: теплого вибрационного электромагнитного ультразвукового акустического радиационного	Влияние поля на человека:	
	Тепловая аномалия, x_{68} , °С	q_{68}
	Вибрационная аномалия, x_{69} , МГц	q_{69}
	Аномалия электромагнитного поля, x_{70} , Н	q_{70}
	Аномалия ультразвукового поля, x_{71} , Гц, дБ	q_{71}
	Акустическая аномалия, x_{72} , дБ	q_{72}
	Аномалия радиационного поля, x_{73} , мкЗв	q_{73}
	Плотность потока радона, x_{74} ;	q_{74}
	ЭРОА радона, x_{75}	q_{75}
Наличие геопатогенных зон	Отклонения заболеваемости у людей, x_{76} , %	q_{76}

Примечание: ПДК — предельно-допустимый уровень; ОДУ — ориентировочно-допустимый уровень, ПДУ — предельно допустимый уровень; ЭРОА — эквивалентная равновесная объемная активность; ЭГП — экзогенный геологический процесс.

весовых коэффициентов w_i ; 5) расчет значений Q_i и составление шкалы интегрального показателя; 6) применение метода и шкалы для оценки анализируемой экосистемы.

В соответствии с этим данный метод поэтапно применим для получения интегральной оценки особенностей абиотических сред экосистем на основе анализа экологических функций литосферы.

Этап 1. Обоснование системы критериев диагностирования экосистем строится на основе параметров экологических функций литосферы — массива грунтов (литотопа), влияющих на существование биоты. Для этого используется набор критериев оценки состояния эколого-геологических условий и их компонент [Трофимов, 2012].

При этом набор критериев для природных (биоцентрических) экосистем и для техногенно-трансформированных или антропогенных (антропоцентрических) экосистем, в которых велика роль социума (человека) и учитываются потребности для развития цивилизации, будет существенно различным (табл. 3). Для каждого критерия указываются

параметры (или набор параметров) (x_i), характеризующие экологические функции рассматриваемого массива грунтов (литотопа) в пределах данной эколого-геологической системы.

Этап 2. Переход от указанных в табл. 3 параметров (x_i) к безразмерным показателям (q_i) осуществляется путем их нормирования. Для этого на основе данных работы [Хованов, 1996] с помощью несложных преобразований избавляются от размерности исходных характеристик так, чтобы наилучшим условиям по каждому критерию соответствовало значение, равное 0, а наихудшим — равное 1 (можно наоборот). Такое преобразование, можно выполнить следующим образом [Хованов, 1996]. Для критериев первого типа введем правило перевода в виде:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right)^\lambda, & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 1, & \text{при } x_i > \max_i. \end{cases}$$

Таблица 4

Принципиальная схема взаимоувязанной оценки состояния эколого-геологических условий, биоты и экосистемы [Трофимов, 2005 с изменениями]

Оцениваемый параметр		Категории (уровни)			
		I	II	III	IV
Эколого-геологические условия		экологическая норма	экологический риск	экологический кризис	экологическое бедствие
Условия гомеостаза экосистемы		Не вызывает реакции (возмущения экосистемы)	«Предел толерантности» экосистемы, ее способность противостоять внешнему воздействию		Разрушение, гибель экосистемы
Экосистема (по Б.В. Виноградову)		Экологическая норма	Экологический риск	Экологический кризис	Экологическое бедствие
Гигиеническое состояние среды (по В.М. Прусакову и К.А. Буштуеву)		Малоопасное	Умеренно опасное	Опасное	Чрезвычайно опасное
Состояние здоровья человека		Здоровое	Напряжение	Утомление	Болезнь
Условия жизнедеятельности человека		Комфортные	Дискомфортные	Сильно дискомфортные	Опасные
Литосфера и ее компоненты		Удовлетворительное (благоприятное) состояние	Условно удовлетворительное (относительно неблагоприятное) состояние	Неудовлетворительное (весьма неблагоприятное) состояние	Катастрофическое состояние
Компоненты эколого-геологических условий	Ресурсное воздействие	Слабое	Умеренное	Сильное	Опасное
	Геодинамическое воздействие	Слабое	Умеренное	Сильное	Опасное
	Геохимическое воздействие	Слабое	Умеренное	Сильное	Опасное
	Геофизическое воздействие	Слабое	Умеренное	Сильное	Опасное
	Качество геологического пространства	Высокое	Среднее (повышенное)	Пониженное	Низкое

В этих уравнениях: q_i — преобразованное значение из табл.2; x_i — текущее значение из табл. 3; \min_i — минимальное (фоновое, допустимое, безопасное, предельно-допустимое и т.п.) значение критерия; \max_i — максимальное значение критерия (лучше ориентироваться на региональные, но не абсолютные максимумы критериев). Исследователь должен дополнительно выбрать показатель степени λ , определяющий характер и степень выпуклости нормирующей функции $q_i(x_i)$: при $\lambda > 1$ соответствующая нормирующая функция выпукла вниз, а при $\lambda < 1$ — вверх [Хованов, 1996].

Для критериев второго типа аналогично вводится правило перевода в виде:

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{\max_i - \min_i}{x_i - \min_i} \right)^\lambda, & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 0, & \text{при } x_i > \max_i. \end{cases}$$

Диапазон изменения q_i всегда находится в пределах от 0 до 1. Таким образом, исходные критерии в различных шкалах измерения (абсолютные и средние величины в конкретных единицах измерения, относительные или балльные оценки и т.п.) приводятся к безразмерным шкалам, после чего над их значениями можно производить математические

действия с целью получения интегрального показателя.

Для того, чтобы задать минимальные и максимальные значения критериев, как правило, используются минимальное (\min_i) и максимальное (\max_i) значения из каждой шкалы исходных характеристик, указанных в табл. 3.

Этап 3. Выбор вида интегрального показателя $Q(q, w)$, который строится таким образом, что зависит не только от показателей q_i , но и от их значимости, определяемой весовыми коэффициентами w_i , сумма которых должна равняться 1,0 ($0 \leq w_i \leq 1$). В качестве выражения для интегрального показателя чаще всего задается линейная свертка показателей вида:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n q_i w_i,$$

где $i = 1, \dots, n$; n — число критериев оценивания.

Этап 4. Ввод оценки весовых коэффициентов (w_i). В простейшем случае — при равенстве вклада факторов, $w_i = 1/n$, где n — число критериев (равноважные критерии).

В других, более сложных, случаях (разнозначные критерии — неравновесный учет параметров) приоритет веса критериев обосновывается исследователем, исходя из особенностей рассматриваемой

Таблица 5

Оценочная классификация интегрального показателя

Интегральный показатель абиотического компонента	Классы экологического состояния			
	Удовлетворительное	Условно удовлетворительное	Неудовлетворительное	Катастрофическое
Ресурсный, Q_p	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1
Геохимический, $Q_{гх}$	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1
Геодинамический, $Q_{гд}$	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1
Геофизический, $Q_{гф}$	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1
Общий, Q_o	0–0,25	0,25–0,5	0,5–0,75	0,75–1

экосистемы. Это один из важнейших вопросов при практическом определении интегрального показателя абиотических сред экосистем. В этих случаях для многокритериальных задач применяются различные методы сравнительного системного анализа — например, задание уровней притязаний или нулевой точки, отбор недоминируемых критериев и др. [Королев, 2020; Хованов, 1996].

Этап 5. Для левой и правой границ каждого класса исходной классификации рассчитывается значение Q_i . В результате выполнения пятого этапа получаем шкалу интегрального показателя по классам состояния при условии равновесного (неравновесного) учета всех параметров оценивания.

Этап 6. На завершающем этапе по собранным данным определяют значение интегрального по-

казателя состояния экосистемы в определенный момент времени.

Для получения шкалы (оценочной классификации) интегрального показателя состояния экосистем согласно В.Т. Трофимову [2005], можно использовать градации табл. 2 или принципиальную схему взаимоувязанной оценки состояния эколого-геологических условий, биоты и экосистемы (табл. 4).

В табл. 5 градации классов интегральных показателей для каждой из экологических функций (ресурсной Q_p , геохимической $Q_{гх}$, геодинамической $Q_{гд}$ и геофизической $Q_{гф}$) даны через 0,25 ед.

Общий интегральный показатель (Q_o) рассчитывается по сумме всех интегральных показателей (Q_i) перечисленных экологических функций. Градации общего интегрального показателя экологического состояния системы также даются через 0,25 ед.

Заключение. Экологические функции выступают как фундаментальные интегральные характеристики особенностей абиотических сред экосистем. Из рассмотренных подходов для их оценки наиболее целесообразным является метод сводных показателей (МСП), позволяющий в полной мере получить обоснованные интегральные показатели состояния экосистем.

На основе предложенных интегральных показателей абиотических сред могут осуществляться оценки современного состояния экосистем или эколого-геологических систем в данный момент времени, их динамики, строиться оценочные карты состояния экосистем, проводится сравнительный анализ экосистем или эколого-геологических систем, как их составной части.

Необходимо введение интегральных показателей состояния экосистем в нормативные документы по инженерно-экологическим изысканиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александрова Л.В., Васильев В.Ю., Дмитриев В.В. и др. Многокритериальные географо-экологические оценки состояния и устойчивости природных и урбанизированных систем / Под ред. В.В. Дмитриева и Н.В. Хованова. Деп. ВИНТИ № 2342В00, 2000. 275 с.

Алимов А.Ф., Дмитриев В.В., Флоринская Т.М. и др. Интегральная оценка экологического состояния и качества среды городских территорий / Под ред. А.К. Фролова. СПб., 1999. 253 с.

Виноградов Б.В. Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 с.

Дмитриев В.В. Интегральные оценки состояния сложных систем в природе и обществе // Биосфера. 2010. Т. 2, № 3. С. 507–520.

Дмитриев В.В. Определение интегрального показателя состояния природного объекта как сложной системы // Общество, среда, развитие. 2009. № 4. С. 146–165.

Дмитриев В.В. Экологическая оценка, оценка качества среды, экологическое нормирование. Основные определения // Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: Наука, 2004. С. 10–29.

Дмитриев В.В., Дмитриев Н.В., Воскресенская В.А. и др. Развитие методологии интегральной оценки экологической целостности геосистем // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 8 (часть 1). С. 78–85.

Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем: Учебное пособие. СПб.: Наука, 2004. 294 с.

Караваева Т.И., Тихонов В.П. Интегральная оценка состояния экосистем: обзор показателей для целей инженерно-экологических изысканий // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2022. № 5. С. 265–271.

Королёв В.А. Методология научных исследований в инженерной геологии: Уч. пособие М.: ООО СамПолиграфист, 2020. 353 с.

Снакин В.В., Мельченко В.Е., Буковский Р.О. и др. Оценка состояния и устойчивости экосистем. М., 1992. 127 с.

Трофимов В.Т. Об экологических функциях абиотических сфер Земли // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2005. № 2. С. 59–65.

Трофимов В.Т. Состояние эколого-геологических условий // Базовые понятия инженерной геологии и эко-

логической геологии: 280 основных терминов / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: ОАО Геомаркетинг, 2012. С. 214–215.

Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г. Экологическая геология: Учебник. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2002. 415 с.

Трофимов В.Т., Харькина М.А. О содержании и назначении геоэкологических карт // Инженерные изыскания. 2017а. № 1. С. 32–38.

Трофимов В.Т., Харькина М.А. Предложения по улучшению содержания нормативно-технических документов

по инженерно-экологическим изысканиям // инженерные изыскания. 2017б. № 4. С. 14–19.

Трофимов В.Т., Харькина М.А., Барабошкина Т.А., Жигалин А.Д. Экологические функции абиотических сфер Земли. М.: КДУ, Университетская книга, 2018. 608 с.

Хованов Н.В. Анализ и синтез показателей при информационном дефиците. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 1996. 196 с.

Статья поступила в редакцию 29.10.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 504.06; 544.723; 544.58

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-129-135

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРОКСИДА КАЛЬЦИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОД ПОЛИГОНОВ ТКО

Маргарита Львовна Кулешова¹✉, Татьяна Георгиевна Шимко²,
Наталья Николаевна Данченко³, Ольга Юрьевна Дроздова⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; rita5715@mail.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tshimko@yandex.ru

³ Почвенный институт имени В.В. Докучаева, Москва, Россия; nataly_danch@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; drozdova_olga@yahoo.fr

Аннотация. В лабораторных условиях исследована эффективность использования пероксида кальция (ПК) для очистки фильтрата полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) от органического и неорганического загрязнения на примере образцов с одного из полигонов. Оценивалась степень очистки в зависимости от размера добавки реагента при соотношениях ПК/фильтрат — 1/100, 1/50, 1/20, 1/10 и продолжительности его контакта с фильтратом от 1 до 3 суток. Полученные данные указывают на улучшение качества сточных вод в результате обработки пероксидом кальция: снижение концентрации тяжелых металлов, неорганических анионов, ХПК и др. Результаты исследования свидетельствуют о перспективности использования ПК на начальном этапе очистки фильтрата полигонов ТКО.

Ключевые слова: фильтрат полигона ТКО, методы очистки, тяжелые металлы, пероксид кальция

Для цитирования: Кулешова М.Л., Шимко Т.Г., Данченко Н.Н., Дроздова О.Ю. Оценка эффективности применения пероксида кальция для очистки фильтрационных вод полигонов ТКО // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 129–135.

EFFECTIVENESS ASSESSMENT OF USING CALCIUM PEROXIDE TO PURIFY LANDFILL LEACHATE FROM CONTAMINANTS

Margarita L. Kuleshova¹✉, Tatyana G. Shimko², Natalya N. Danchenko³,
Olga Yu. Drozdova⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; rita5715@mail.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tshimko@yandex.ru

³ Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia; nataly_danch@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; drozdova_olga@yahoo.fr

Abstract. The effectiveness of using calcium peroxide (CP) to clean the filtrate of solid waste landfills from organic and inorganic contamination was studied under laboratory conditions using samples from one of the landfills as an example. The degree of purification was assessed depending on the size of the reagent addition at CP/filtrate ratios of 1/100, 1/50, 1/20, 1/10 and the duration of its contact with the filtrate from 1 to 3 days. The data obtained indicate an improvement in the quality of wastewater as a result of treatment with calcium peroxide: a decrease in the concentration of heavy metals, inorganic anions, COD, etc. The results of the study indicate the prospects of using PC at the initial stage of purification of the MSW filtrate.

Keywords: landfill filtrate, leachate, purification methods, heavy metals, calcium peroxide

For citation: Kuleshova M.L., Shimko T.G., Danchenko N.N., Drozdova O.Yu. Effectiveness assessment of using calcium peroxide to purify landfill leachate from contaminants. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 129–135. (In Russ.).

Введение. Проблема безопасной эксплуатации полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) остается в настоящее время весьма актуальной и требует разработки новых эффективных технологий, позволяющих минимизировать их отрицательное воздействие на окружающую среду. Фильтрат полигонов характеризуется сложным многокомпонентным составом с высокими содержаниями как органических соединений, так и токсичных металлов, что делает его опасным источником загрязнения подземных и поверхностных вод. На различных стадиях жиз-

ненного цикла полигонов состав фильтрата заметно отличается.

Обычно выделяют два вида фильтрационных вод: «молодой фильтрат», формирующийся на первых этапах эксплуатации полигона в ацетогенной фазе деструкции ТБО после 2–7 лет складирования, и «старый фильтрат», который образуется на полигонах со сроком эксплуатации более 30 лет, в метаногенной фазе. Характеристика различных видов фильтрата и описание процессов их формирования приведено в ряде работ [Рекомендации...,

2003; Глушанкова, 2004; Подлипский, 2010; Laner, 2011; Коныгин, 2011; Завизион, 2016; Скурлатов и др., 2018; Милютин и др., 2020 (1); Галицкая и др., 2022]. Так, для «молодого» фильтрата типичны кислый pH (4,5–6,5), высокие значения ХПК (6000–60 000) и содержания металлов и соотношение БПК/ХПК 0,8–0,6. «Старый» фильтрат имеет более щелочной pH (7,5–9), более низкие значения ХПК (500–4500 мгО₂/л) и концентрации неорганических загрязнителей, БПК/ХПК порядка 0,6–0,06.

Фильтрат насыщен органическим веществом, поступающим на свалку с отходами и образующимся в теле свалки в результате процессов их деградации [Бекетов и др., 1998]. Это создает условия для связывания присутствующих в отходах металлов в растворимые комплексы, мигрирующие с водными потоками в окружающую среду [Путилина и др., 2005]. В работе [Семин и др., 1999] на основе расчетов с использованием констант устойчивости комплексных соединений с органическими кислотами авторы показали вероятность полной закомплексованности ионов металлов в фильтрате свалочного полигона на ацетогенной стадии.

Сложность и вариабельность химического состава фильтрационных вод определяют трудности их очистки и требуют разработки и оптимизации эффективных технологий. Для очистки используют механические, биологические, физико-химические и комбинированные методы [Рекомендации..., 2003; Милютин и др., 2020(2)]. Глубокая очистка достигается только с применением многоступенчатых технологий. Однако общепринятых технологий, внедренных в практику на объектах, практически нет, а информация об их эффективности достаточно скудна.

Отличающиеся высокой эффективностью адсорбционные, ионообменные, мембранные и электрофизические методы капиталозатратны и требуют высококвалифицированного обслуживания, что доступно только на санитарно обустроенных полигонах ТБО. В литературе описан ряд схем очистки, испытанных в лабораторных условиях и рекомендованных к внедрению. Так, в работе [Бронникова и др., 2006] предложено использовать электрохимическую очистку с последующей доочисткой на сорбенте ОДМ-2Ф и смолах. На ряде объектов России эксплуатируется запатентованная установка, схема которой включает предварительную электрохимическую обработку и фильтрацию стоков с последующей очисткой на обратно-осмотическом модуле и доочистку на высокоэффективных активированных углях [Поваров и др., 2014; Селиванова и др., 2014]. Автором работы [Коныгин, 2011] предложена экономически выгодная многостадийная экспресс-технология обезвреживания фильтрата, включающая обработку известковым молоком (Ca(OH)₂), с отделением осадка, отгонку аммиака в градирне, электрокоагуляцию и окончательную очистку в биологическом пруду. Показана перспективность при-

менения известкования для удаления органических веществ и металлов из фильтрата за счет осаждения и соосаждения.

По нашему мнению, в схему обработки фильтрата в качестве первичной стадии логично включить окисление, которое позволит добиться значительного снижения органического загрязнения и разрушения органо-металлических комплексов, обеспечив возможность осаждения и иммобилизации металлов на сорбционных барьерах. Для окисления используют разные технологии: аэрацию, озонирование, биоразложение и другие. Особый интерес вызывает возможность применения для этой цели пероксида кальция (CaO₂), конечные продукты превращений которого (CaCO₃, O₂, H₂O) экологически безопасны. Кроме того, CaO₂ стабилен, прост в использовании и имеет низкую себестоимость. Благодаря своей низкой растворимости в воде (1,65 г/л при 20 °C) он позволяет создать невысокую концентрацию реагента — перекиси водорода (H₂O₂), высвобождающейся при его постепенном гидролизе [Артемов и др., 2008]. Пероксид кальция широко используется для очистки сточных вод, восстановления качества поверхностных и подземных вод, а также для ремедиации почв [Lu et al., 2017]. В России он пока не нашел такого широкого применения, но недавно предложен способ очистки сточных вод от хрома с помощью пероксида кальция на предприятиях малого и среднего производства [Курбангалиева, 2023].

Цель настоящей работы — оценить эффективность применения CaO₂ на первичной стадии очистки сточного фильтрата на полигонах ТБО.

Материалы и методы исследования. В качестве модельного раствора был взят образец воды из пруда-отстойника сбора фильтрата полигона «Саларьево». Полигон прошел рекультивацию и находится в метаногенной стадии.

Эффективность очистки фильтрата при внесении CaO₂ оценивалась в опытах, проведенных в статическом режиме. Соотношение добавки CaO₂ к фильтрату составляло 1:100 (0,5 г CaO₂+50 мл фильтрата), 1:50 (1 г CaO₂+50 мл фильтрата), 1:20 (2,5 г CaO₂+50 мл фильтрата), 1:10 (5 г CaO₂+50 мл фильтрата). В колбы с навесками CaO₂ вносили отмеренный объем фильтрата, плотно закрывали и оставляли перемешиваться в течение 24 часов на обратно-поступательном ротаторе. После чего в исходном фильтрате и надосадочном растворе после контакта с CaO₂ определяли содержания металлов и другие показатели загрязнения.

Содержание макро- и микроэлементов в пробах определяли на оптическом эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 5110 (Agilent Technologies), основных анионов — на ионном хроматографе Dionex ICS-2000 (Thermo), растворенного органического углерода (C_{орг}) и общего азота (N_{общ}) — на жидкостном анализаторе LiquiTOC-trace (Elementar).

Таблица 1
Химический состав фильтрата на полигоне «Саларьево»

Показатель загрязнения (элемент)	Исходный фильтрат, мг/л	Сравнение с нормативами качества воды			
		ПДК р/х ¹		СанПиН ²	
		ПДК, мг/л	превышение над ПДК	ПДК, мг/л	превышение, над ПДК
Li	0,36	0,08	4	0,03	12
B	5,08	0,5	10	0,5	10
V	0,04	0,001	40	0,1	–
Cr	0,27	0,07/0,02	4/13	0,5/0,05	–/5
Mn	2,49	0,01	249	0,1	25
Fe	6,41	0,1	64	0,3	21
Co	0,02	0,01	2	0,1	–
Ni	0,04	0,01	4	0,02	2
Cu	0,03	0,001	28	1	–
Zn	0,04	0,01	4	5	–
Sr	3,06	0,4	8	7	–
Mo	0,02	0,001	20	0,25	–
Cd	0,0004	0,005	–	0,001	–
Pb	<ПО	0,006	–	0,03	–
Al	0,05	0,04	1,3	0,5	–
Na	892	120	7	200	4
K	280	50	6	–	–
Ca	224	180	1,2	–	–
Mg	91	40	2	50	1,8
SO ₄ ^{2–}	314	100	3	500	–
Cl [–]	1350	300	4,5	350	4
PO ₄ ^{3–}	<ПО	0,05–0,2	–	0,0001 (по Р)	–
NO ₃ [–]	1,94	40	–	45	–
NO ₂ [–]	<ПО	0,08	–	3	–
N _{общ}	229	<1	>229	2	115
C _{орг}	314	5,0	63	5,0	63
ХПК, мгО ₂ /л	914	< 30	30	15–30	30
БПК ₅ , мгО ₂ /л	548	3	183	2	274
БПК ₅ /ХПК	0,6				
pH	7,4	6–9	–	6–9	–

Примечания: ¹ ПДК_{р/х} — ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения (Приказ Госкомрыболовства России от 28. 04. 1999 № 96). ² СанПиН 2.1.5.980-00; 1.2.3685-21: 3.

Для расчета форм нахождения элементов использовали программу Visual MINTEQ версии 3.1 для Windows [Gustafsson, 2013]. В программу вводили полученные данные по всем основным гидрохимическим характеристикам (pH, содержание растворенных катионов, анионов, органического углерода) и содержанию микроэлементов в изучаемой пробе.

Результаты и их обсуждение. Состав исходного фильтрата. Фильтрат полигона «Саларьево» был охарактеризован по химическому составу и ряду показателей загрязнения сточных вод. В удаленных от канализационных сетей условиях функционирования полигона, на станциях очистки сточных вод (СОС) при сбросе в речную сеть, как правило, ставится задача очистки фильтрата до уровня ПДК, установленного для водоемов рыбохозяйственного назначения (ПДК_{р/х}) [Станция очистки..., 2019; Галицкая и др., 2022]. В связи с этим оценку загрязнения рассматриваемого фильтрата мы давали на основе сравнения с этими показателями (табл. 1).

Состав фильтрата полигона «Саларьево» укладывается в диапазон содержаний загрязнителей, приводимый в литературе для «старых» фильтратов [Глушанкова, 2004; Подлипский, 2010; Laner, 2011; Милютин и др., 2020(1); Галицкая и др., 2022]. В «молодом» фильтрате следует ожидать более низкие значения pH и ХПК и более высокие концентрации тяжелых металлов.

Все основные показатели, характеризующие стоки полигона «Саларьево», значительно превышают значения ПДК_{р/х} (см. табл. 1). Наибольшее загрязнение (на 1–2 порядка) отмечается по таким элементам, как B, V, Mn, Fe, Cu, Mo. Для Li, Cr, Zn и Ni — 4-х кратное превышение над ПДК_{р/х}. Показатели ХПК и БПК₅ также превышают нормативные в 30 и 180 раз, соответственно. Превышение по сульфатам и хлоридам — 3 и 4,5 раза, соответственно. Сравнение с нормативами СанПиН также показывает значительное превышение (1–2 порядка) по таким показателям, как Li, B, Fe, Mn, N_{общ}, C_{орг}, ХПК, БПК₅. Следовательно, для обеспечения экологической безопасности в районе полигона для сброса данного фильтрата в окружающую среду необходимо проводить его очистку.

Расчеты с использованием программы Visual MINTEQ показали, что в фильтрате большая часть металлов представлена их неорганическими соединениями (см. табл. 2). В органоминеральной форме содержится большая часть меди (78%) и значительные количества цинка и никеля (47 и 37%, соответственно).

Влияние добавок пероксида кальция на содержание органических и азотных соединений. После выдерживания фильтрата с CaO₂ отмечалось осветление растворов при всех дозах реагента. Влияние различных добавок CaO₂ на величины показателей, связанных с присутствием органических и азотных соединений (ХПК, C_{орг}, N_{общ}) отражено на рис. 1.

Содержание C_{орг} в обработанном фильтрате снижается за 1 сутки в соответствии с увеличением дозы реагента на 17, 21, 37 и 48% по сравнению с исходным фильтратом. Показатель ХПК уменьшается на 30–66%. Концентрация N_{общ} снижается на 62 и 53% при добавках CaO₂ в 10 и 20 г/л, соответственно. Максимальная доза реагента в 100 г/л приводит к падению содержания N_{общ} на 74%.

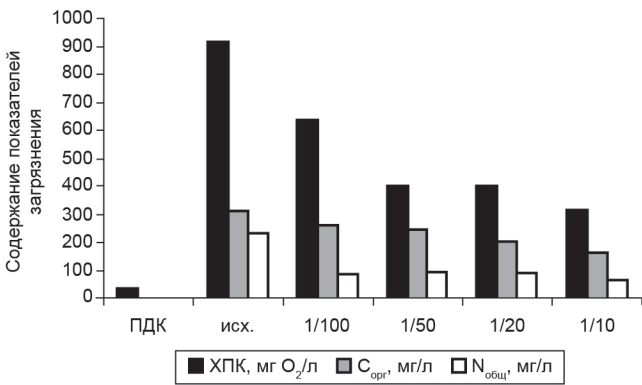


Рис. 1. Влияние добавок CaO_2 на показатели органического и азотного загрязнения

Для оценки влияния времени контакта фильтрата с осадком CaO_2 на перечисленные показатели смесь с соотношением 1/50 выдерживали также в течение 48 и 72 часов. Результаты показали, что содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ на этом временном отрезке линейно снижается с ростом времени экспозиции (рис. 2), что доказывает тот факт, что влияние CaO_2 на органическое загрязнение фильтрата носит пролонгированный характер. Следовательно, и эффективность реагента по этому показателю значительно выше, чем полученная за 1 сутки эксперимента.

Влияние добавок пероксида кальция на макрокомпонентный состав фильтрата и его pH. Изменение макросостава фильтрата в зависимости от различных добавок CaO_2 показано на рис. 3. При добавке в фильтрат 10 г/л (1/100) и 20 г/л (1/50) CaO_2

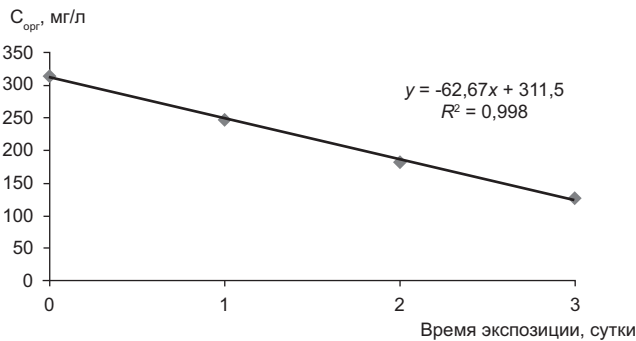


Рис. 2. Зависимость содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в фильтрате полигона от времени контакта с CaO_2 при соотношении 1/50

концентрация Ca в растворе падает, по сравнению с исходной величиной в 2,5 раза и становится ниже уровня ПДК. Это связано, главным образом, с ошелачиванием фильтрата при добавке CaO_2 . Дальнейшее увеличение дозы реагента приводит к закономерному росту содержания Ca за счет поступления с реагентом. Содержание Mg опускается ниже ПДК при всех дозах реагента, что, очевидно, связано с его выведением из фазы раствора за счет образования осадка гидроксида и/или карбоната.

Концентрация SO_4^{2-} снижается после контакта фильтрата с CaO_2 , что можно объяснить образованием малорастворимого сульфата Ca . При добавке пероксида в соотношении 1/100 все рассмотренные показатели ниже ПДК_{р/х}. Более высокие добавки реагента (от 20 до 100 г/л) не приводят к снижению

Таблица 2
Формы нахождения элементов в исследуемом фильтрате полигона «Саларьево»

Элемент	Органическая форма, %	Неорганическая форма, %	Преобладающая форма, % от общего содержания
Li	0	100	Li^+ (98)
B	0	100	H_3BO_3 (96)
V	0	100	$\text{V}(\text{OH})_2^+$ (99)
Mn	0	100	Mn^{3+} (100)
Fe	0	100	$\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ (94)
Co	0	100	Co^{2+} (87)
Ni	37	63	Ni^{2+} (53)
Cu	78	22	Cu-POB^+ (78)
Zn	47	53	Zn-POB^+ (47)
Sr	0	100	Sr^{2+} (89)
Mo	0	100	MoO_4^{2-} (80)
Cr	0	100	CrO_4^{2-} (66)
Na	0	100	Na^+ (98)
K	0	100	K^+ (98)
Ca	20	80	Ca^{2+} (70)
Mg	2	98	Mg^{2+} (85)

Примечание: * — POB — растворенное органическое вещество

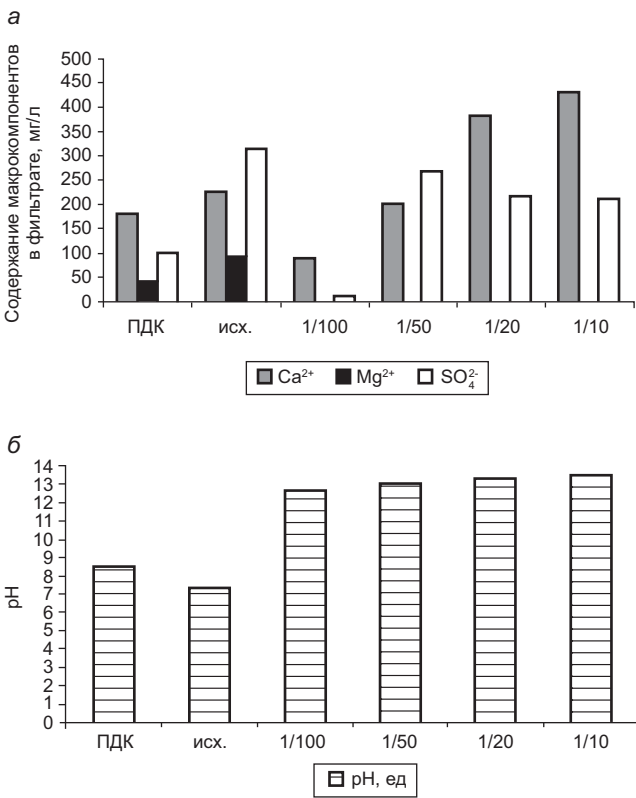


Рис. 3. Влияние добавок CaO_2 на изменение показателей макрокомпонентного состава и pH фильтрата полигона: а — содержание Ca^{2+} , Mg^{2+} , сульфат-ионов; б — pH фильтрата

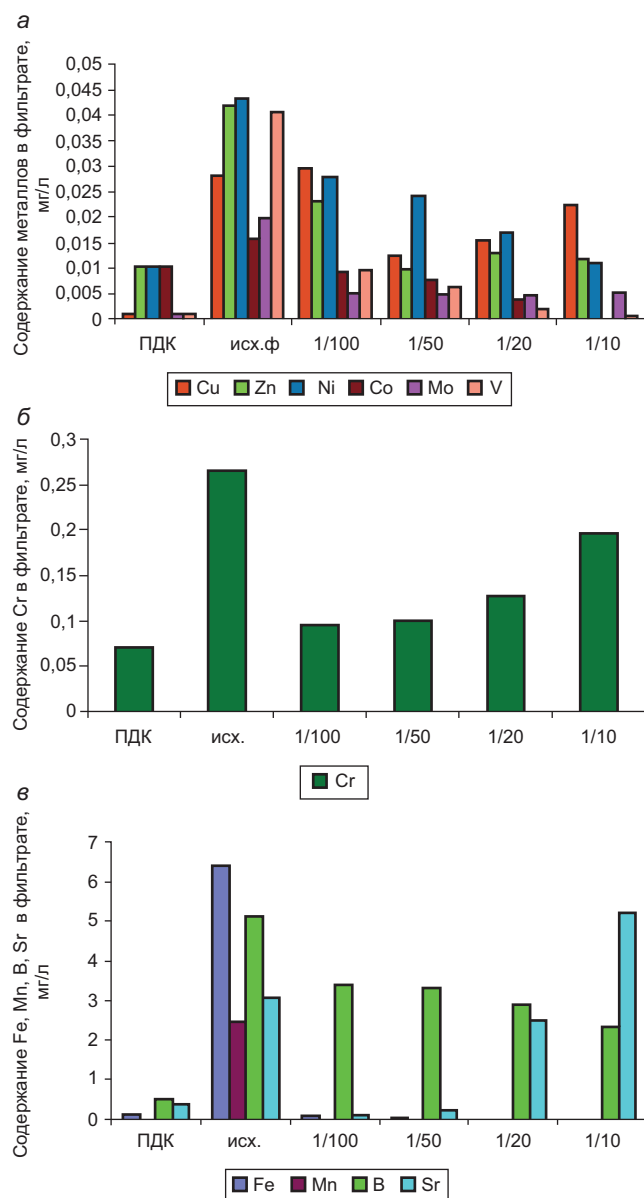


Рис. 4. Влияние добавок CaO_2 в исходный фильтрат на содержания неорганических загрязнителей: а — Cu, Zn, Ni, Co, Mo, V; б — Cr; в — Fe, Mn, B, Sr

содержаний анионов. На содержание хлорид-иона в фильтрате внесение реагента существенного влияния не оказывает.

При добавлении CaO_2 фильтрат ощелачивается до pH 12,6 уже при соотношении 1:100. Скорость осаждения карбоната кальция и других металлов существенно зависит от pH среды — наиболее эффективное осаждение происходит при pH выше 11,0 [Коньгин, 2011]; т.е. CaO_2 обеспечивает условия для быстрого осаждения многих загрязнителей.

Влияние добавок пероксида кальция на содержание неорганических загрязнителей фильтрата. Изменение микрокомпонентного состава сточных вод полигона при внесении в фильтрат CaO_2 под влиянием разных доз реагента отражено на рис. 4. Обработка исходного свалочного фильтрата разными

ми дозами CaO_2 привела к снижению содержаний Fe и Mn до уровня ниже ПДК для рыбохозяйственных водоемов ($\text{ПДК}_{\text{р/х}}$) уже при добавке 10 г CaO_2 на 1 л фильтрата (1/100). Выведение Co, Ni, V из исходного раствора имеет прямую зависимость от величины навески CaO_2 — чем она больше, тем больше снижается содержание металлов в обработанном растворе. Следует отметить, что концентрация Co падает до уровня $\text{ПДК}_{\text{р/х}}$ уже при минимальной навеске реагента, а для Ni и V — только при максимальной навеске, что объясняется более высоким содержанием (в 2,5–3 раза) этих элементов в исходном растворе. Снижение содержания бора от размера добавки CaO_2 также характеризует прямая зависимость, но менее выраженная. После взаимодействия исходного фильтрата с CaO_2 при всех примененных соотношениях (от 1/100 до 1/10) превышение концентрации бора над уровнем $\text{ПДК}_{\text{р/х}}$ снизилось с 10 до 7–5 раз, соответственно.

Хром демонстрирует обратную зависимость степени выведения металла от количества добавленного к фильтрату CaO_2 . Тем не менее, после взаимодействия фильтрата с 10 г/л и 20 г/л реагента (соотношения 1/100 и 1/50) содержание Cr снизилось на 63%, до уровня близкого к $\text{ПДК}_{\text{р/х}}$. Эффективность удаления Mo из жидкой фазы составила около 75% и не зависела от дозы реагента.

Для Cu и Zn зависимость их содержаний в обработанном фильтрате от массы добавки CaO_2 имеет сложный характер. Наибольшая эффективность их вывода из фильтрата отмечается при соотношении реагент/раствор — 1/50, при дальнейшем увеличении дозы она падает. Такое поведение этих ионов, вероятно, связано с их нахождением в исходном фильтрате в виде комплексов с РОВ (Cu 78%>Zn 47%>Ni 37%). Малой дозы реагента 10 г/л (1/100), по-видимому, еще недостаточно для высвобождения (за счет диссоциации комплексов и окисления РОВ) этих элементов из комплексов в течение суток, а доза 20 г/л уже справляется с этим, и металлы осаждаются в виде гидроксидов. Рост концентрации Zn и Cu в растворе при внесении больших доз реагента, очевидно, объясняется амфотерностью их гидроксидов, растворяющихся в избытке щелочи. В отличие от них гидроксид Ni не обладает амфотерностью, чем и объясняется монотонное снижение его концентрации в растворе с ростом дозы реагента [Лурье, 1971; Полинг, 1964].

На содержание лития в фильтрате добавка CaO_2 влияния не оказывает, что согласуется с низкой гидролизуемостью его ионов и их малой склонностью к комплексообразованию. Содержание Sr в обработанном фильтрате снижается до нормативного $\text{ПДК}_{\text{р/х}}$ при внесении 10 г и 20 г CaO_2 , что, вероятно, связано с его соосаждением с гидроксидом и карбонатом Ca. Однако при добавлении 50, и особенно 100 г реагента, концентрация Sr в растворе растет (рис. 3, в), по-видимому, из-за вытеснения избытком Ca.

Обобщенные данные по исследованию влияния добавок СаО₂ на сточный фильтрат полигона ТПБО «Саларьево», полученные в статическом режиме, представлены в табл. 3.

Анализ результатов исследований, представленных в табл. 2, показывает, что обработка фильтрата ПК значительно улучшает качество сточных вод полигона по всем показателям загрязнения. Даже при минимальной добавке реагента в 10–20 г/л наблюдается снижение загрязнения до уровня ПДК_{р/х} или близкого к нему по таким элементам, как Fe, Mn, Co, Ni, Cr, Zn, Sr. В обработанном фильтрате также существенно уменьшаются содержания Cu, V, Mo, V, но превышения над ПДК_{р/х} по этим металлам остаются на уровне 5–12 раз. Внесение пероксида кальция также снижает азотное и органическое загрязнение (N_{общ} уменьшается на 62–74%, C_{орг} — на 17–48%, ХПК — на 30–66%), причем снижение этих показателей напрямую зависит от доз реагента. По ряду показателей (содержание Fe, Mn, Cr и N_{общ}) использование СаО₂ на стадии первичной обработки фильтрата даже после короткой экспозиции в течение 1 суток оказалось более эффективным, чем известкового молока [Коньгин, 2011].

Важно отметить, что на полигонах ТБО, находящихся в ацетогенной фазе, при утилизации сточных вод путем возврата их в тело накопителя отходов, высокая щелочность может играть положительную роль, снижая миграционную способность токсичных металлов. Однако, при сбросе обработанного фильтрата в окружающую среду, как и в случае с известковым молоком, его необходимо нейтрализовать до pH 7–8, например, с помощью серной кислоты [Коньгин, 2011].

Заключение. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о перспективности применения пероксида кальция для очистки сточных вод полигонов ТБО. Помимо того, что внесение данного реагента обеспечивает значительную очистку фильтрата от токсичных загрязнителей, продукты его превращений (СаСО₃, О₂, Н₂О) экологически безопасны. Применяя многостадийную очистку стоков на полигонах ТБО, требуемую для сброса фильтрата в окружающую среду, на начальной стадии (этап предочистки) можно рекомендовать внесение СаО₂ в фильтрат, накапливаемый в пруде-отстойнике

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Артёмов А.В., Трипольская Т.А., Похабова И.В., Приходченко П.В. Пероксид кальция — перспективный промышленный продукт // Рос. хим. ж. (Журнал Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. LII. № 2. С. 136–139.

Бекетов А.Ю., Бекренев А.В., Викторовский И.В. и др. О проблеме очистки фильтрата полигонов для захоронения твердых бытовых отходов // Экологическая химия. 1998. Т. 7, № 4. С. 217–228.

Бронникова О.И., Новиков О.Н., Метляева М.Ю. Очистка фильтрата полигона твердых бытовых отходов // Сибирь-Восток. 2006. № 2. С. 42–47.

Таблица 3

Влияние обработки СаО₂ на показатели загрязнения
фильтрата полигона «Саларьево»

Показатель загрязнения/ элемент, мг/л	Снижение показателей загрязнения по сравнению с исходным фильтратом при разных дозах реагента, отн.%			
	1 : 100 (10 г/л)	1 : 50 (20 г/л)	1 : 20 (50 г/л)	1 : 10 (100 г/л)
Cu	0	56 ²	46	21
Zn	45	76 ¹	69	71
Ni	36	43	60	77
Co	42	50	74	99
Mo	75	75	75	75
V	76	85	95	99
Cr	64	63	52	26
Fe	99	99,9	100	100
Mn	99,9	100	99,9	100
B	33	35	43	55
Sr	96	92	18	+70 ³
Ca ²⁺	61	11	+70	+92
Mg ²⁺	99	100	100	100
SO ₄ ²⁻	97	15	31	33
Cl ⁻	0	+1	+1	+3
C _{орг}	17	21	37	48
N _{общ}	62	53	62	74
ХПК, мгО ₂ /л	30	56	56	66
pH	12,6	13,0	13,3	13,5

Примечания: n¹ — показатель загрязнения в обработанном СаО₂ фильтрате снизился до ПДК_{р/х} и ниже; n² — показатель загрязнения в обработанном СаО₂ фильтрате снизился, но превышает ПДК_{р/х}; +³ — показатель загрязнения в обработанном СаО₂ фильтрате повысился на + n%.

в соотношении 1/100 и 1/50. Предлагаемый метод первичной очистки сточных вод полигонов является эффективным, простым в использовании и мало затратным (оптовая стоимость реагента 200–300 тыс. руб. за тонну).

Галицкая И.В., Путилина В.С., Костикова И.А. Оценка состояния полигона ТКО для обоснования мониторинговых исследований в пострекультивационный период // Геоэкология. 2022. № 5. С. 49–60.

Глушанкова И.С. Моделирование состава фильтратных вод санитарных полигонов захоронения твердых бытовых отходов // Геоэкология. 2004. № 4. С. 334–341.

Завизион Ю.В. Оценка состояния полигонов захоронения твердых коммунальных отходов на этапах жизненного цикла — термоаналитический и спектроскопический подход // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2016. № 3. С. 90–102.

Коньгин А.А. Комплексная технология очистки фильтрата полигонов твердых бытовых отходов // Academia. Архитектура и строительство. 2011. № 4. С. 105–109.

Курбангалиева М.Х. Очистка сточных вод от ионов хрома (VI) пероксидом кальция // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27, № 3. С. 24–27.

Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1971. 456 с.

Милютин Н.О., Политаева Н.А., Зеленковский П.С. и др. Анализ методов очистки фильтрата полигонов твердых коммунальных отходов // Вестник Евразийской науки. 2020. Т. 12, № 3 (2). <https://esj.today/PDF/03NZVN320.pdf> (доступ свободный).

Милютин Н.О., Смятская Ю.А., Политаева Н.А., Зеленковский П.С. Фильтрат полигонов ТКО: образование, характеристика и обезвреживание // Бутлеровские сообщения. 2020. Т. 61, № 3. С. 79–85.

Поваров А.А., Селиванова Н.В., Трифонова Т.А., Павлова В.Ф. Очистка фильтрационных вод полигонов твердых бытовых отходов // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16, № 1(3). С. 661–664.

Подлипский И.И. Характеристика полигонов бытовых отходов как объектов геологического исследования // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2010. Вып. 1. С. 15–31.

Полинг Л. Общая химия / Пер. с англ. М.: Мир, 1964. 584 с.

Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Влияние органического вещества на миграцию тяжелых металлов на участках складирования твердых бытовых отходов.

Аналит. обзор. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН; ИГЭ РАН, 2005. 100 с. (Сер. Экология. Вып. 76).

Рекомендации по сбору, очистке и отведению сточных вод полигонов захоронения твердых бытовых отходов. М.: Госстрой РФ. 2003. 45 с.

Селиванова Н.В., Трифонова Т.А., Селиванов О.Г., Чухланов В.Ю. Оценка и очистка фильтрационных вод полигонов ТБО // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 8. С. 99–102.

Семин Е.Г., Бекренев А.В., Бекетов А.Ю. и др. Специфические особенности вод фильтратов полигонов по захоронению твердых бытовых отходов на примере Воронежского полигона // Городское хозяйство и экология. 1999. № 2. С. 34–59.

Скурлатов Ю.И., Штамм Е.В., Швыдкий В.О. и др. Возможные пути решения проблем безопасной эксплуатации полигонов ТБО. Химическая безопасность. 2018. Т. 2. С. 238–250.

Станция очистки сточных вод полигонов твердых бытовых отходов (СОС). Раздел «Оценка воздействия на окружающую среду». Т. 1. Владимир, 2019. 91 с.

Gustafsson J.P. Visual MINTEQ Ver. 3.1 (2013). Retrieved from <https://vminteq.lwr.kth.se> (дата обращения: 01.05.2023).

Laner D. Understanding and evaluating long-term environmental risks from landfills. PhD Thesis. 2011. 243 p.

Lu Sh., Zhang X., Xue Yu. Application of calcium peroxide in water and soil treatment: A review // Journal of Hazardous Materials. Elsevier. 2017. Vol. 337. P. 163–177.

Статья поступила в редакцию 14.11.2023,
одобрена после рецензирования 19.12.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УДК 550.837.211

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-136-144

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЛУБИННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОФИЛЮ ПУШКИНСКИЕ ГОРЫ — АНДРЕАПОЛЬ

Виктор Александрович Куликов¹, Иван Михайлович Варенцов²,
Павел Владимирович Иванов³, Анна Павловна Ионичева⁴✉,
Сергей Юрьевич Колодяжный⁵, Илья Николаевич Лозовский⁶,
Татьяна Андреевна Родина⁷, Григорий Евгеньевич Слинчук⁸,
Андрей Георгиевич Яковлев⁹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vic@nw-geophysics.ru

² Центр геоэлектromагнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; varentsov@mail.ru

³ Центр геоэлектromагнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; pavel.vl.ivanov@gmail.com

⁴ Центр геоэлектromагнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; yaroslavtseva.anna@gmail.com ✉

⁵ Геологический институт РАН, Москва, Россия; kolod63@mail.ru

⁶ Центр геоэлектromагнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; i.n.lozovsky@yandex.ru

⁷ Центр геоэлектromагнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; whittakeresq@gmail.com

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; slin4ukgr@yandex.ru

⁹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; mail@nw-geo.ru

Аннотация. В январе-феврале 2022 гг. были выполнены глубинные магнитотеллурические зондирования по региональному профилю Пушкинские Горы — Андреаполь, протяженностью 300 км. В состав полевой экспедиции входили преподаватели, аспиранты и студенты кафедры геофизики Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, а также научные сотрудники лаборатории Магнитотеллурических зондирований Центра геоэлектromагнитных исследований (ЦГЭМИ ИФЗ РАН). В статье представлен анализ полученных результатов, а также геоэлектрические двумерные модели, полученные в ходе инверсии магнитотеллурических данных в программе ZONDMT2D.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, коровые аномалии электропроводности, двумерная инверсия

Для цитирования: Куликов В.А., Варенцов И.М., Иванов П.В., Ионичева А.П., Колодяжный С.Ю., Лозовский И.Н., Родина Т.А., Слинчук Г.Е., Яковлев А.Г. Результаты глубинных магнитотеллурических исследований по профилю Пушкинские Горы — Андреаполь // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 136–144.

RESULTS OF DEEP MAGNETOTELLURIC SURVEYS ALONG THE PUSHKINSKIYE GORY — ANDREAPOL PROFILE

Victor A. Kulikov¹, Ivan M. Varentsov², Pavel V. Ivanov³, Anna P. Ionicheva⁴✉,
Sergey Yu. Kolodyazhny⁵, Ilya N. Lozovsky⁶, Tatyana A. Rodina⁷,
Grigoriy E. Slinchuk⁸, Andrey G. Yakovlev⁹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, vic@nw-geophysics.ru

² Center of Geoelectromagnetic research IPE RAS, Troitsk, Russia, varentsov@mail.ru

³ Center of Geoelectromagnetic research IPE RAS, Troitsk, Russia, pavel.vl.ivanov@gmail.com

⁴ Center of Geoelectromagnetic research IPE RAS, Troitsk, Russia, yaroslavtseva.anna@gmail.com ✉

⁵ Geological Institute of RAS, Moscow, Russia; kolod63@mail.ru

⁶ Center of Geoelectromagnetic research IPE RAS, Troitsk, Russia; i.n.lozovsky@yandex.ru

⁷ Center of Geoelectromagnetic research IPE RAS, Troitsk, Russia; whittakeresq@gmail.com

⁸ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; slin4ukgr@yandex.ru

⁹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; mail@nw-geo.ru

Abstract. In January-February of 2022 deep magnetotelluric soundings (DMTS) were carried out along the regional (300 km) profile Pushkinskie Gory — Andreapol. The field expedition included professors, graduates and students of the Geophysical department of the Geological Faculty of Lomonosov Moscow State University, as well as scientists from the Laboratory of Magnetotelluric Soundings of the Center of Geoelectromagnetic Research IPE RAS. The article presents an analysis of the results, as well as geoelectric two-dimensional models obtained during the inversion of magnetotelluric data in the ZONDMT2D program.

Keywords: magnetotelluric soundings, crustal high-conductive anomalies, two-dimensional inversion

For citation: Kulikov V.A., Varentsov I.M., Ivanov P.V., Ionicheva A.P., Kolodyazhny S.Yu., Lozovsky I.N., Rodina T.A., Slinchuk G.E., Yakovlev A.G. Results of deep magnetotelluric surveys along the Pushkinskiye Gory — Andreapol profile. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 136–144. (In Russ.).

Введение. Согласно современным представлениям, фундамент Восточно-Европейской платформы (ВЕП) состоит из трех главных сегментов — Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии, которые разделены крупными сутурными зонами и орогенными поясами, сформировавшимися в конце палеопротерозоя в результате коллизии одноименных микроконтинентов [Минц и др., 2010; Bogdanova et al., 2015; Gorbatshev, Bogdanova, 1993]. Коллизионные швы и контуры палеорогенов отражаются на картах потенциальных полей цепочками линейных магнитных и гравитационных аномалий, которые ориентированы радиально и сходятся в центральной части ВЕП. Эта же закономерность повторяется в особенностях распределения систем рифей — ранневендских палеорифтов (авлакогенов).

В качестве единого центра сближения Фенноскандинавского, Волго-Уральского и Сарматского сегментов докембрийской коры выделяют Слободской геодинамический узел [Гарецкий, Леонов, 2018; Гарецкий, Каратаев, 2019].

В январе-феврале 2022 года силами группы ученых, представляющих кафедру геофизики Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и Центр геоэлектромагнитных исследований (ЦГЭМИ ИФЗ РАН), были проведены глубинные магнитотеллурические/магнитовариационные (МТ/МВ) зондирования по субширотному профилю Пушкинские горы — Андреаполь (рис. 1), который пересекает северную часть Слободского узла, а также Центрально-Белорусскую шовную зону [Гарецкий и др., 2006; Гарецкий, Каратаев, 2009, 2011].

Основная цель исследований — изучение корово-мантийных аномалий электропроводности, приуроченных к докембрийским шовным зонам центральной части ВЕП, обнаруживающих признаки современной активизации, а также региональных трендов в распределении суммарной продольной проводимости осадочных бассейнов.

Изучение коровой электропроводности в центральной части ВЕП группой ученых из МГУ и ЦГЭМИ проводилось в течение последних 15 лет, начиная с 2007 г. На первом этапе работы в рамках проекта KIROVOGRAD были сконцентрированы в северной и западной частях Воронежского массива, где по итогам глубинного магнитотеллурического зондирования (ГМТЗ), выполненного на территории Калужской, Брянской, Орловской и Курской областей, были изучены Барятинская и Курская аномалии электропроводности [Варенцов и др., 2012; Алексанова и др., 2013; Куликов и др., 2018]. В 2018 г. была образована рабочая группа SMOLENSK, и имеющиеся массивы синхронных МТ/МВ зондирований были расширены на запад и север, вдоль линий Волыно-Оршанского и Крестцовского (Среднерусского) мезо-неопротерозойских авлакогенов [Варенцов и др., 2021; Иванов и др., 2022]. Северные профили проекта SMOLENSK пересекали Слободской узел, но редкая сеть точек зондирования на данном участке

работ, а также отсутствие высокочастотной ветви кривых МТЗ, не позволили в полной мере учесть влияние проводящих осадков и получить детальную геоэлектрическую модель важного тектонического узла ВЕП.

Организация и проведение работ. Глубинные магнитотеллурические исследования в районе Слободского узла проводятся с 2020 г. За прошедший период измерения были выполнены по трем профилям: «Себеж-Ржев», «Пушгоры-Андреаполь», «Остров-Осташков» (рис. 1) и совмещались с проведением зимних факультативных и производственных практик кафедры геофизики Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [Куликов и др., 2020]. За это время в полевых работах приняли участие не менее десяти студентов и аспирантов Геологического факультета МГУ, которые получили базовые навыки работы с современной магнитотеллурической (МТ) аппаратурой, освоили принципы методики и обработки МТ-данных, принимали участие в интерпретации и геологическом истолковании результатов.

Измерения по профилю «Пушгоры-Андреаполь» были проведены зимой 2022 года объединенным отрядом Геологического факультета МГУ и Лаборатории МТ-исследований ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Средний шаг между точками МТЗ на профиле «Пушгоры-Андреаполь» составил 10 км и был увеличен до 15 км на участках с низкой транспортной доступностью.

Аппаратура и методика работ. Измерения проводились МТ-станциями «МЭРИ-ПРО», разработанными в компании ООО «Северо-Запад» (г. Москва). Пятикомпонентная съемка ЭМ поля велась с использованием приемных линий MN=80 м и индукционных датчиков IMS-010 производства ООО «Вега» (г. Санкт-Петербург). При измерении горизонтальных компонент ЭМ поля датчики ориентировались на магнитные север и восток. Средняя длительность записи составила 20 часов. Измерения выполнялись одновременно несколькими станциями, разнесенными по профилю, в синхронном режиме, что позволило использовать обработку по технологии Remote Reference [Gamble et al., 1979] для борьбы с локальными ЭМ помехами. Обработка данных осуществлялась в программе EPI-KIT, разработанной в ООО «Северо-Запад».

В районе работ отсутствуют региональные электрифицированные железные дороги, которые являются наиболее интенсивным источником помех для метода МТЗ. Это позволило нам получить данные высокого качества почти на всех пикетах профиля. Кроме того, начиная с 2020 года происходит постепенное увеличение солнечной активности (рис. 2, а), которая сказывается на повышении качества МТ данных (рис. 2, б).

В процессе обработки были получены компоненты тензора импеданса, матрицы векторов Визе, горизонтальный магнитный тензор (ГМТ). Для рас-

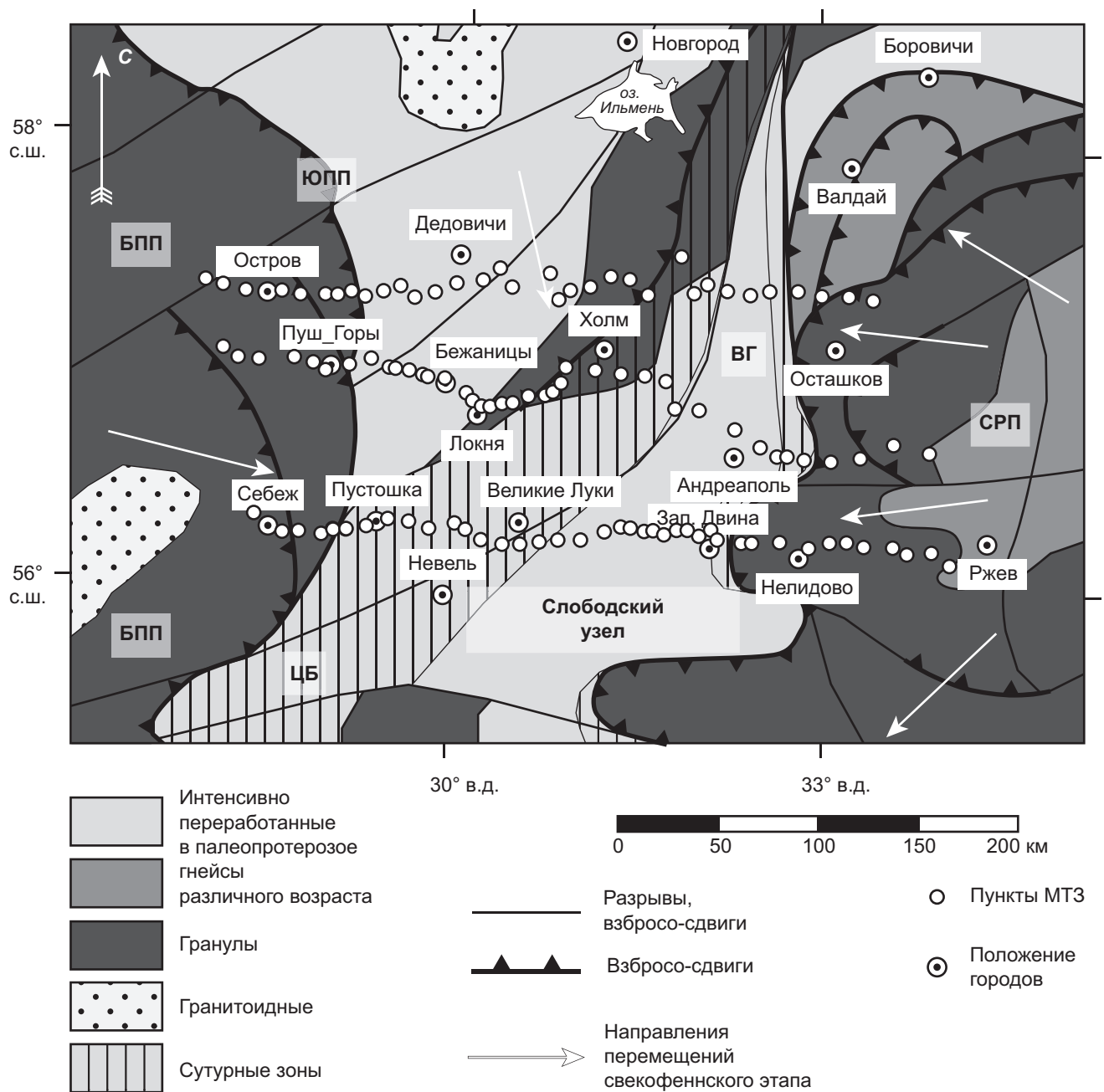


Рис. 1. Структурная схема фундамента района Слободского узла (с изменениями по [Колодяжный, 2018a]) и положение точек МТЗ; ЮПП — Южно-Прибалтийский пояс (БПП — Белорусско-Прибалтийский пояс), СРП — Среднерусский пояс, ЦБ — Центрально-Белорусская шовная зона, ВГ — Валдайский грабен; стрелками показаны направления перемещений свекофеннского коллизионного этапа 1,9–1,8 млрд лет [Минц и др., 2010]

чета ГМТ использовались магнитные наблюдения геофизической обсерватории «Борок» (ГО «Борок» ИФЗ РАН), расположенной в Ярославской области, взятые из открытых источников (www.intermagnet.org).

Анализ магнитотеллурических данных. Задачей первого этапа интерпретации МТ-данных является оценка степени геоэлектрической неоднородности среды, на основе которой формируются подходы к решению обратной задачи. Этот этап включает в себя качественный анализ и определение следующих параметров: главных значений и главных направлений амплитудных и фазовых компонент

тензора импеданса, представленных в виде кривых от периода, псевдоразрезов, карт или полярных диаграмм; расчет параметров неоднородности и асимметрии среды [Бердичевский, Дмитриев, 2009]; анализ компонент фазового тензора и компонент матрицы Визе-Паркинсона.

На рис. 3 приведены типичные кривые кажущегося сопротивления для профиля «Пушгоры — Андреаполь». Светлыми оттенками показаны кривые, полученные на западном фланге профиля, пересекающего Белорусско-Прибалтийский пояс. Суммарная продольная проводимость осадков на данном участке не превышает 250 См. В центральной части про-

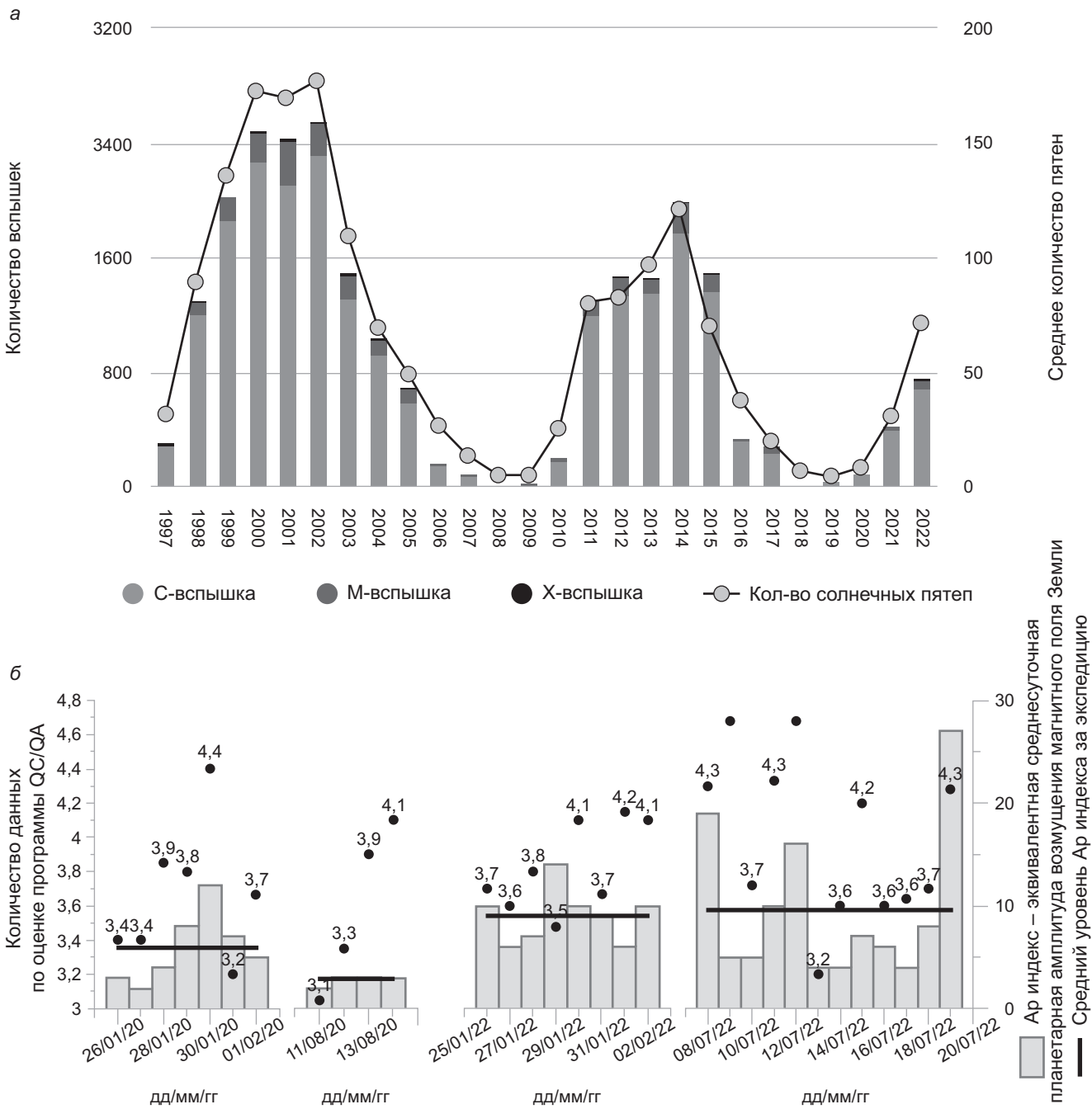


Рис. 2. Количество солнечных вспышек С, М и Х-класса, которые произошли в течение года (а) (с сайта <https://www.spaceweatherlive.com>) и оценка среднего качества МТ-данных за день в зависимости от солнечной активности в разные периоды проведения измерений (б)

филя, на широтных кривых (ρ_{yx}) МТЗ № 8-12 (рис. 3, б) в виде перегиба на восходящей ветви проявляется коровая проводящая зона. Максимальные значения суммарной продольной проводимости осадочного чехла (S_{oc}) фиксируются на кривых МТЗ № 19-21 и составляют 2000–2300 См (рис. 3).

На рис. 4 приведены карты широтной компоненты кажущегося сопротивления ρ_{yx} на периоде 100 с и 1000 с с вынесенными на них типперами Визе-Паркинсона для периодов 1000 с и 70 с соответственно. Белыми пунктирными линиями указаны возможные оси проводящих структур.

На периоде 100 с (рис. 4, а) в поле кажущихся сопротивлений выделяется одна обширная отрица-

тельная аномалия, направление которой меняется с северо-западного в южной части на северо-восточное в северной части площади.

На периоде 1000 с вся центральная область изучаемой площади характеризуется субмеридиональной зоной пониженных значений ρ_k (рис. 4, б). В границах этой области выделяются два локальных минимума. Центр восточного минимума проходит через следующие точки МТЗ: № 2-7 на профиле «Себеж-Ржев», № 21-25 на профиле «Пушгоры-Андреаполь», № 22-30 на профиле «Остров-Осташков».

Наличие регионального проводника в восточной части площади подтверждается поведением действительных частей векторов Визе на низких

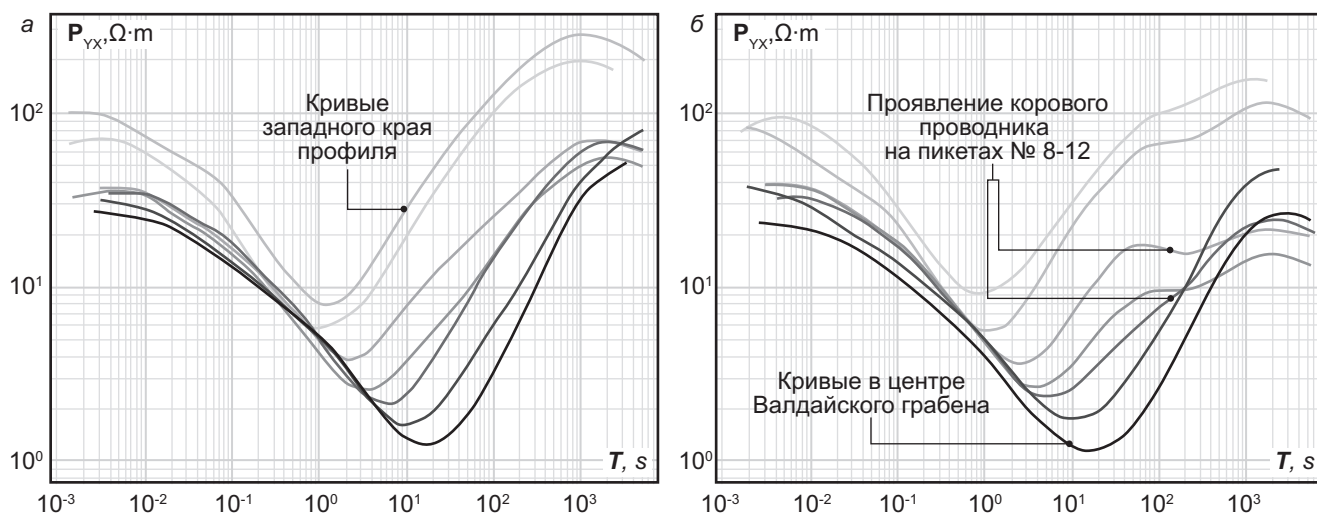


Рис. 3. Типичные кривые кажущегося сопротивления на профиле РА: ρ_{xy} — меридиональные (а); ρ_{yx} — широтные (б)

частотах (рис. 4, а). На профиле «Остров-Осташков» изменение направления векторов с юго-западного на восточное происходит между точками МТЗ № 23 и 25. На профиле «Пушгоры-Андреаполь» изменение направления векторов Визе с северо-западного на юго-восточное происходит между точками МТЗ № 23 и 24. На профиле «Себеж-Ржев» изменения в поведении индукционных векторов выражены менее ярко, потому что происходят на фоне преобладающего направления север-юг, показывающего, что региональный максимум проводимости расположен севернее линии профиля, и заключаются в развороте векторов с юго-западного на юго-восточное направление между точками № 6а и 7.

Второй минимум кажущегося сопротивления на периоде 1000 с (рис. 4, б) проходит через точки и МТЗ: № 24–26 профиля «Себеж-Ржев», № 9–15 профиля «Пушгоры-Андреаполь», № 14–16 профиля «Остров-Осташков». Существование неоднородности на данном участке незначительно отражается в поведении действительных частей векторов Визе на частотах до 100 с (рис. 4, б). На более низких частотах поведение индукционных векторов полностью обусловлено влиянием восточного проводника.

Анализ фазового тензора по профилю «Пушгоры — Андреаполь» показывает, что до периодов 10–50 с геоэлектрические разрезы характеризуются размерностью 1D, за исключением отдельных точек, вероятно, подверженных влиянию трехмерных локальных неоднородностей (рис. 5). На периодах больше 50 с можно выделить участки, где устойчиво определяются направления главных значений фазового тензора. В частности, на профиле «Пушгоры-Андреаполь», можно выделить два участка с ярко выраженной двумерностью на больших периодах: № 10–15 и № 22–27. Направление минимального значения импеданса для обоих участков составляет 50–60° СВ (рис. 5).

Качественный анализ МТ-данных показал следующее. Верхняя часть разреза, отвечающая осадочному чехлу, укладывается в модель гори-

зонтально-слоистой среды. На периодах более 100 с в первичных данных проявляются две аномалии, характеризующиеся направлением близким к меридиональному. Контрастная восточная аномалия, по предварительной гипотезе, связана с увеличением мощности проводящих осадков в центре Валдайского грабена. Западная аномалия, вероятно, имеет коровую природу. Оценки тензора импеданса показывают, что направление максимальной проводимости данных аномалий составляет 50–70° СВ.

Преобладающее направление индукционных векторов на профиле «Себеж-Ржев» южное, что обусловлено влиянием более проводящей части осадочного чехла Валдайского грабена. На профилях «Пушгоры-Андреаполь» и «Остров-Осташков» региональный фон в поведении типперов отсутствует и более ярко проявляются субмеридиональные проводящие структуры.

Для полученных данных наиболее подходящим вариантом интерпретации является сочетание одномерного подбора для верхних горизонтов осадочного чехла и трехмерной инверсии для глубинной части модели. Однако, полученных по трем профилям данных недостаточно для проведения 3D инверсии.

Геоэлектрическая модель по профилю «Пушгоры-Андреаполь». Для поиска оптимального подхода к проведению 2D инверсии в условиях больших значений суммарной проводимости осадков было выполнено имитационное моделирование магнитотеллурических данных с использованием программы ZONDMT2D (<http://zond-geo.com>) для геоэлектрических структур, включающих неоднородности как осадочного чехла, так и консолидированной коры. Моделирование показало, что наиболее близкий результат к истинной модели дает двухэтапная инверсия с последовательным увеличением числа инвертируемых компонент, а также при задании в стартовых моделях реальных мощностей и удельных сопротивлений осадочного чехла. Эта методика была использована при инверсии экспериментальных МТ-данных на профиле «Пушгоры-Андреаполь».

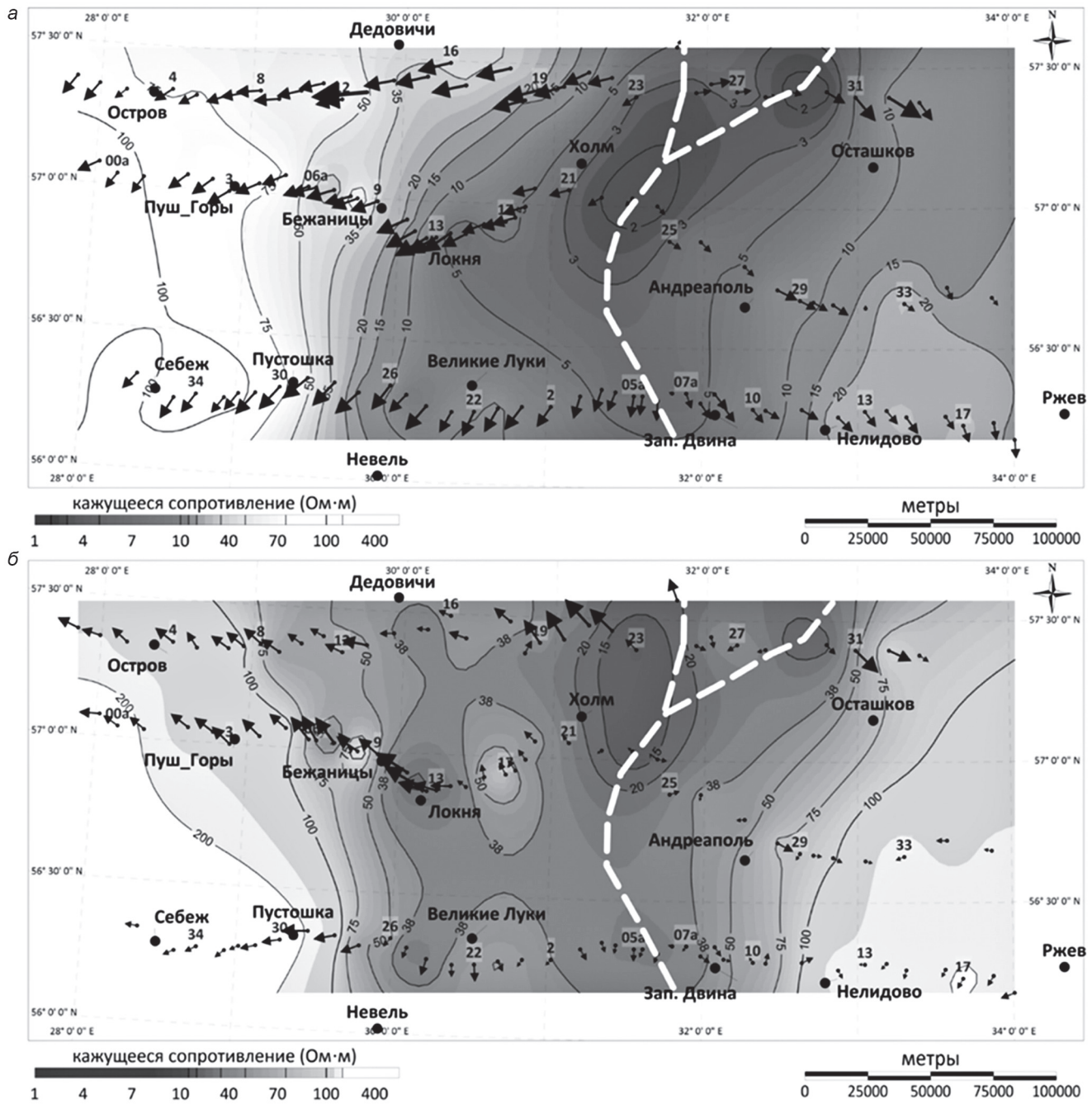


Рис. 4. Карты широтной компоненты кажущегося сопротивления на периоде 100 с (а) и 1000 с (б) с дополнительно вынесенными векторами индукции (Re , конвенция Визе) на периоде 1000 с (а) и 70 с (б) и возможными осями проводящих структур (белый пунктир)

Нормализация амплитудных кривых МТЗ, направленная на подавление приповерхностного S-эффекта, была выполнена в программе Inversio (ООО «Северо-Запад») со следующими параметрами: период нормализации — 1 с, радиус нормализации — 20 км.

При проведении бимодальной инверсии мы использовали оригинальные данные, где в качестве продольных выступали меридиональные, а в качестве поперечных — широтные кривые, с учетом магнитного склонения соответствующие азимутам 10° СВ и 100° ЮВ.

При проведении инверсии использовалась следующая сетка: размер первой вертикальной ячейки — 50 м, общая глубина модели — 100 км; размер горизонтальной ячейки — 3 км.

Мощность осадочного чехла задавалась на основании карты кровли фундамента [Нагорный, 2009; Колодяжный, 20186; Иванов и др., 2022]. Среднее значение удельного сопротивления осадков рассчитывалось с учетом карты S (рис. 6).

Результат двухэтапной 2D инверсии по профилю «Пушгоры-Андреаполь» в виде глубинных моделей УЭС приведен на рис. 7. Модели представ-

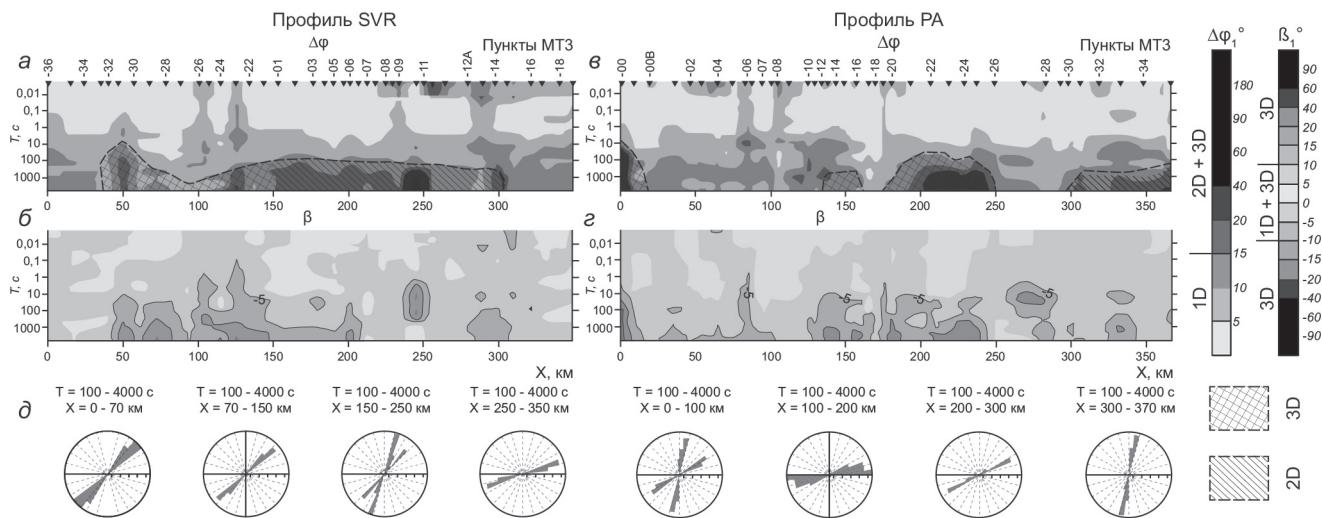


Рис. 5. Псевдоразрезы инвариантных параметров неоднородности $\Delta\varphi$ (а, в) и асимметрии β (б, г) фазового тензора импеданса для профилей SVR и РА с диаграммами направлений его экстремальных фаз, отвечающих минимальным сопротивлениям (д)

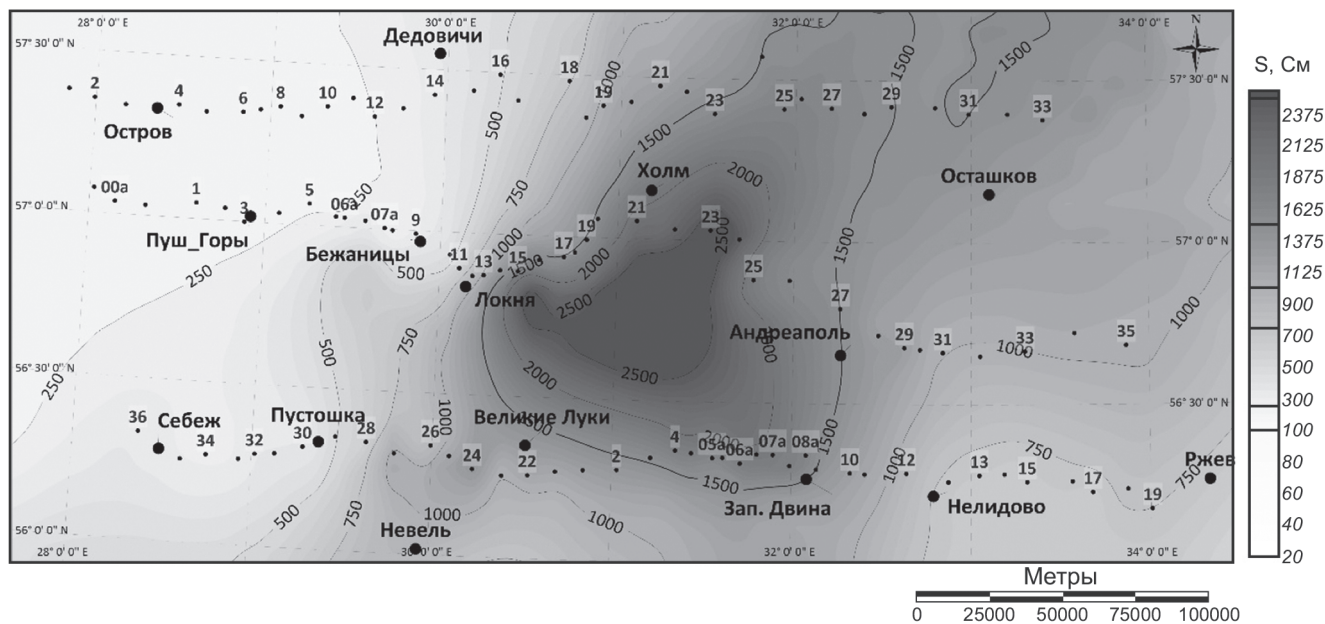


Рис. 6. Карта изолиний приповерхностной суммарной продольной проводимости S (см. lg-масштаб), основанная на асимптотических оценках S по эффективному кажущемуся сопротивлению в пунктах МТ зондирования на профилях РА и SVR, зондирования проекта SMOLENSK и прочих локальных зондирований прошлых лет

лены в двух вертикальных масштабах: до глубины 6 км соотношение горизонтального/вертикального масштаба составляет 1/10, до глубины 80 км — 1/1.

По итогам интерпретации мы получили двухъярусную геоэлектрическую модель с проводящим осадочным чехлом ($УЭС = 1\text{--}3\text{ Ом}\cdot\text{м}$), мощность которого принимает максимальные значения в центре Валдайского грабена (точки МТЗ № 21–25), и высокоомным основанием — породами кристаллического фундамента.

По результатам инверсии, в районе точек МТЗ № 1–16 выявлена широкая транскоровая проводящая структура в земной коре. До глубины 15 км ось

проводника имеет угол наклона близкий к вертикальному. Ниже глубины 20 км, на уровне верхней — средней коры, проводящая зона характеризуется пологим залеганием с незначительным погружением в восточном направлении.

Выявленная аномалия электропроводности, вероятно, является продолжением зоны Ильменского корового проводника, описанного ранее по результатам одиночных магнитовариационных зондирований в районе одноименного озера И.И. Рокитянским [Рокитянский и др., 1982].

Заключение. По результатам качественного анализа и количественной интерпретации МТ-данных

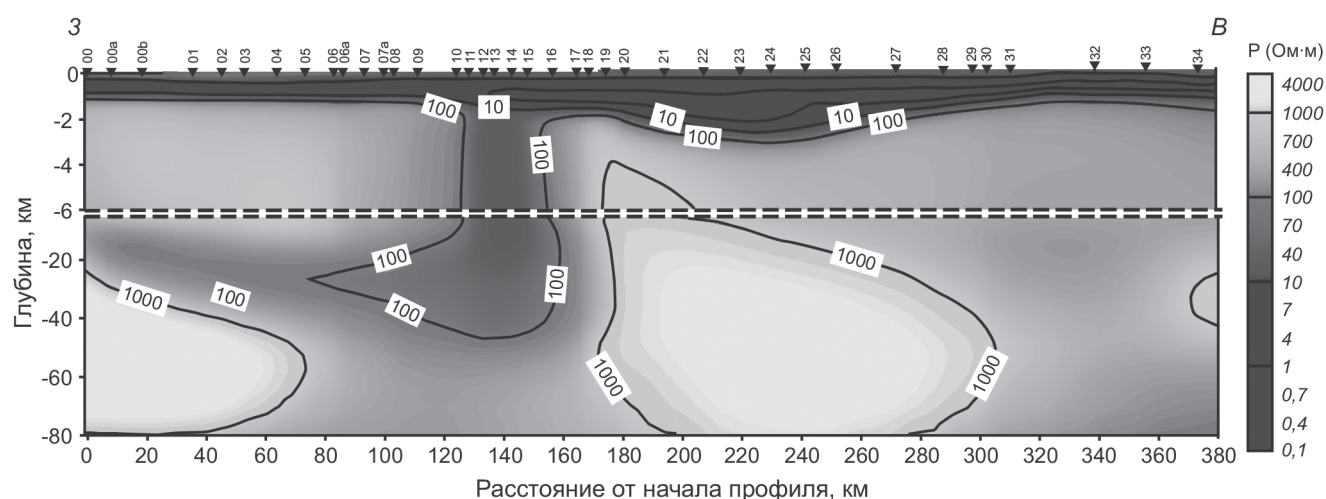


Рис. 7. Разрезы сопротивления (Ом·м, lg-масштаб) вдоль профиля РА, полученные с использованием алгоритма ZondMT2D в результате последовательной двухэтапной 2D инверсии данных импеданса и типпера

можно констатировать, что профиль «Пушгоры-Андреаполь» пересекает две аномалиеобразующие структуры, относящиеся к разным гипсометрическим уровням.

Глубинный проводник, ось которого проходит в районе г. Локня, слабо проявляется в первичных данных, и представляет собой на результатах 2D инверсии сочетание двух зон пониженного сопротивления — верхнекоровой субвертикальной зоны шириной 30–40 км и полого залегающего проводника, локализованного в средней коре на глубинах 15–30 км.

Есть основания полагать, что выделенная зона является южным продолжением Ильменской аномалии электропроводности [Рокитянский и др., 1982] и отвечает региональной Центрально-Белорусской сутурной зоне, разделяющей крупные сегменты коры ВЕП.

Высокая проводимость зоны может быть связана с сульфид- и углеродсодержащими метасадками, которые накопились в пределах желоба и континентального склона Сарматии. Их появление на больших глубинах объясняется процессами субдукции, когда кора Белорусско-Прибалтийского палеоокеана в процессе погружения увлекала за собой на большие глубины (до 80 км) осадочные толщи, насыщенные

органикой и карбонатными отложениями. В результате этого осадки испытали глубокий термодинамический метаморфизм и в больших объемах трансформировались в сульфид- и графитсодержащие бластомилониты.

В процессе коллизии литосферных плит первичная позиция зоны субдукции была сильно нарушена. В анализируемом сечении профиля «Пушгоры-Андреаполь» сохранился крутопадающий сегмент сутурной зоны, апикулярная часть которой раздавлена и пережата между системами конвергентных надвигов и взбросов, ограничивающих смежные геоблоки (рис. 7).

Ось второго аномалиеобразующего объекта, ярко проявленного в первичных МТ-полях, проходит в районе п. Бологово на профиле «Пушгоры-Андреаполь». Аномалия является малоглубинной и связана с увеличением мощности проводящих осадков в Валдайском грабене.

Наличие большого объема терригенных отложений с высокой пористостью и степенью дезинтеграции в строении Валдайского авлакогена позволяет предполагать их высокую флюидонасыщенность, в частности, высокоминерализованной водой, что способствует повышенной электропроводности осадочной призм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексанова Е.Д., Варенцов И.М., Куликов В.А. и др. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы // Геофизика. 2013. № 2. С. 32–38.

Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.

Варенцов И.М., Иванов П.В., Ионичева А.П. и др. Массив магнитотеллурических зондирований SMOLENSK: изучение глубинной структуры области тройного сочленения крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы // Геофизика. 2021. № 1. С. 46–56.

Варенцов И.М., Ковачикова С., Куликов В.А. и др. Синхронные МТ и МВ зондирования на западном склоне Воронежского массива // Геофизический журнал. 2012. Т. 34(4). С. 90–107.

Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Слободский тектоно-геодинамический омутообразный узел в центре Восточно-Европейской платформы // Литосфера. 2019. № 2 (51). С. 165–178.

Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Слободский тектоно-геодинамический узел Восточно-Европейской платформы // Литосфера. 2009. № 2(31). С. 50–66.

Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Тектоно-геодинамическая модель сочленения Фенноскандинавского и Сарматского сегментов Восточно-Европейской платформы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 10. С. 1557–1566.

Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И., Голобоков С.В., Данкевич И.В. Глубинное строение Центрально-Белорусской шовной зоны по геофизическим данным // Литасфера. 2006. № 1, вып. 24. С. 101–112.

Гарецкий Р.Г., Леонов М.Г. «Структуры омута» — новая категория зон взаимодействия литосферных плитопотоков // Доклады Академии наук. 2018. Т. 478(5). С. 546–550.

Иванов П.В., Варенцов И.М., Колодяжный С.Ю. и др. Исследование глубинной электропроводности в окрестности Оршанской впадины: двухмерная инверсия синтетических и наблюдаемых магнитотеллурических данных методом REBOSS // Физика Земли. 2022. № 5. С. 26–44.

Колодяжный С.Ю. Долгоживущие структурные ансамбли Восточно-Европейской платформы. Статья 1. Тектоника фундамента // Изв. ВУЗОВ. Сер. Геология и разведка. 2018а. № 2. С. 5–13.

Колодяжный С.Ю. Долгоживущие структурные ансамбли Восточно-Европейской платформы. Статья 2. Строение кровли фундамента // Изв. ВУЗОВ. Сер. Геология и разведка. 2018б. № 3. С. 5–14.

Куликов В.А., Алексанова Е.Д., Варенцов И.М. и др. Брятинская коровая аномалия электропроводности по результатам площадных МТ-исследований // Геофизика. 2018. № 1. С. 31–43.

Куликов В.А., Соколова Е.Ю., Ионичева А.П. и др. Электропроводность фундамента Восточно-Европейской платформы в юго-восточном Приладожье по данным магнитотеллурических зондирований // Физика Земли. 2020. № 6. С. 66–85.

Минц М.В., Сулейманов А.К., Бабаянц П.С. и др. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс. М.: Геокарт; ГЕОС, 2010. Т. 1. 408 с.; Т. 2. 400 с.

Нагорный М.А. Тектоника Оршанской впадины // Литасфера. 2009. № 2(31). С. 67–74.

Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Логвинов И.М., Рокитянская Д.А. Аномалии геомагнитных вариаций на СЗ европейской части СССР // Физика Земли. 1982. № 11. С. 101–106.

Bogdanova S., Gorbatshev R., Skridlaite G., et al. Trans-Baltic Palaeoproterozoic correlations towards the reconstruction of supercontinent Columbia/Nuna // Precambrian Res. 2015. Vol. 259. P. 5–33.

Gamble T.D., Goubau W.M., Clarke J. Magnetotellurics with a remote magnetic reference // Geophysics. 1979. Vol. 44(1). P. 53–68.

Gorbatshev R., Bogdanova S. Frontiers in the Baltic Shield // Precambrian Res. 1993. Vol. 64. P. 3–21.

Статья поступила в редакцию 29.12.2022,
одобрена после рецензирования 22.03.2023,
принята к публикации 13.05.2024

УЧРЕДИТЕЛИ:

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
геологический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н.Н. ЕРЕМИН — **главный редактор**, доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН
Р.Р. ГАБДУЛЛИН — **ответственный секретарь**, доктор геолого-минералогических наук, доцент
И.М. АРТЕМЬЕВА — профессор Университета Копенгагена, Дания
А.Б. БЕЛОНОЖКО — профессор Университета Стокгольма, Швеция
А.В. БОБРОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
М.В. БОРИСОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.В. БРУШКОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.А. БУЛЫЧЕВ — доктор физико-математических наук, профессор
Р.В. ВЕСЕЛОВСКИЙ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
М.Л. ВЛАДОВ — доктор физико-математических наук, профессор
Е.А. ВОЗНЕСЕНСКИЙ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
Т.В. ГЕРЯ — профессор Швейцарской высшей технической школы Цюриха
Д.Г. КОЩУТ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.В. КУВШИНОВ — доктор физико-математических наук, профессор Швейцарской высшей технической школы Цюриха
А.В. ЛОПАТИН — доктор биологических наук, профессор
А.М. НИКИШИН — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.Р. ОГАНОВ — профессор Университета Стони-Брук, США
ПЕНДА ЧЖАО — академик Китайской академии наук, почетный академик Московского университета, профессор Китайского университета наук о Земле
А.Л. ПЕРЧУК — доктор геолого-минералогических наук
С.П. ПОЗДНЯКОВ — доктор геолого-минералогических наук
Д.Ю. ПУЩАРОВСКИЙ — доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик РАН
Ю.В. РОСТОВЦЕВА — доктор геолого-минералогических наук, профессор
В.И. СТАРОСТИН — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.В. СТУПАКОВА — доктор геолого-минералогических наук, доцент
СЭНЖЕНГ ЛИ — профессор Университета океанологии Китая
В.Т. ТРОФИМОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
Д.Р. ФОГЛЕР — профессор Даремского университета
И.В. ШПУРОВ — доктор технических наук

Адрес редакции:

e-mail: vmu_red@mail.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.

Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 28.04.2024. Формат 60×90¹/₈.

Бумага офсетная. Гарнитура Minion Pro.

Усл. печ. л. 18,0. Уч.-изд. л. 13,0. Тираж экз.

Изд. № 12621. Заказ

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15

(ул. Академика Хохлова, 11)

Тел.: (495) 939-32-91; *e-mail:* secretary@msupublishing.ru

ISSN 0201-7385
ISSN 0579-9406

ИНДЕКС 70995 (каталог «Роспечать»)
ИНДЕКС 34114 (каталог «Пресса России»)

