

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 551 + 553

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-517-532>

Обзорная статья

Достижения в решении приоритетных научных проблем в области наук о Земле в Республике Саха (Якутия)

В. Ю. Фридовский^{✉,1}, Е. Э. Соловьев², Ю. С. Глязнецова³

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

³Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

[✉]fridovsky@diamond.ysn.ru

Аннотация

Приводится характеристика важнейших научных результатов в области наук о Земле, полученных в организациях, расположенных на территории Республики Саха (Якутия). Дальнейшее развитие научных исследований связано с изучением геологического строения и эволюции земной коры территории Якутии, рудообразующих систем стратегических видов полезных ископаемых, потенциально нефтематеринских пород и скоплений природных нефтей как фундаментальных основ повышения уровня геологической изученности недр и разработки современных технологий прогнозирования и поисков месторождений для конкретных геологических обстановок. Подчеркивается необходимость мониторинга состояния природной среды региона и климата, создание системы наблюдений, анализа, прогноза реакции экосистемных компонентов на естественные и техногенные изменения и технологий восстановления нарушенных территорий. Обращено внимание на состояние обеспеченности высококвалифицированными специалистами.

Ключевые слова: науки о Земле, геологическое строение, месторождения полезных ископаемых, экология
Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН (№ FUEM-2019-0004), НОЦ «Север: территория устойчивого развития».

Для цитирования: Фридовский В.Ю., Соловьев Е.Э., Глязнецова Ю.С. Достижения в решении приоритетных научных проблем в области наук о Земле в Республике Саха (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(4):517–532. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-517-532>

Review article

Advancements and research priorities in the field of Earth Science in the Republic of Sakha (Yakutia)

V. Y. Fridovsky^{✉,1}, E. E. Soloviev², Y. S. Glyaznetsova³

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

³Institute of Oil and Gas Problems,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

[✉]fridovsky@diamond.ysn.ru

Abstract

This article presents the significant findings of research in the field of Earth Science in the Republic of Sakha (Yakutia). The main focus of future research includes the investigation of the geological structure and evolution of the Earth's crust in Yakutia, exploration of ore-forming systems for strategic mineral types, identification of oil source rocks, and the discovery of natural naphthide accumulations. These findings serve as a fundamental basis for enhancing the level of geological exploration of the subsurface, development of advanced technologies for geological exploration and prospect-

ing in specific geological settings. It is essential to monitor the natural environment and climate of the region, establish a comprehensive system for observing, analyzing, and forecasting the response of ecosystem components to both natural and anthropogenic changes, and develop technologies for the restoration of disturbed areas. The recognition of the importance of ensuring a sufficient number of highly qualified staff members is also acknowledged.

Keywords: Earth Science, geological structure, mineral deposits, ecology

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the DPMGI SB RAS (number FUEM-2019-0004) and the Scientific and Educational Center “North: territory of sustainable development”.

For citation: Fridovsky V.Yu., Soloviev E.E. Advancements and research priorities in the field of Earth Science in the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(4):517–532. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-517-532>

Введение

Систематические исследования в области наук о Земле на территории Республики Саха (Якутия) были начаты коллективом первой комплексной научной экспедиции АН СССР в 1925–1930 гг. Результаты этой экспедиции показали исключительную перспективность территории на открытие разнообразных видов полезных ископаемых. Изыскания были продолжены сотрудниками созданного в 1947 г. сектора геологии Якутской научно-исследовательской базы АН СССР, а с середины 1950-х годов и позже – коллективами открытых в Республике Саха (Якутия) институтов Сибирского отделения АН СССР и Якутского государственного университета. В этот период были определены основные направления исследований, которые развиваются и сегодня в Институте геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Северо-Восточном федеральном университете им. М.К. Аммосова, Институте мерзлотоведения СО РАН и Институте проблем нефти и газа СО РАН. В организациях, находящихся на территории Якутии, в области наук о Земле работают 31 доктор и 104 кандидата наук. В последние годы исследования получили новый импульс развития и поддержку НОЦ «Север: территория устойчивого развития» и Программы комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия), направленных на развитие производительных сил и социальной сферы. Координацию деятельности научных и научно-образовательных учреждений, действующих на территории Республики Саха (Якутия) в области наук о Земле, осуществляет Объединенный Ученый совет Академии наук Республики Саха (Якутия). Его возглавляли д.г.-м.н., академик АН РС(Я) Л.М. Парфенов и д.г.-м.н., академик АН РС(Я) И.И. Колодезников.

Основные направления и важнейшие результаты научных исследований

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН проводит научные исследования, направленные на получение новых знаний о закономерностях строения и эволюции вещественно-структурных комплексов литосферы кратонов и орогенных поясов; геологии, минералогии и условий образования и размещения месторождений полезных ископаемых и геоэкологии как фундаментальных основ наращивания минерально-сырьевого потенциала стратегически важных видов полезных ископаемых и экологической безопасности. В последние годы ИГАБМ СО РАН были получены научные результаты, отмеченные отделением наук о Земле РАН среди важнейших в Российской Федерации.

В рамках актуализации региональных стратиграфических шкал каменноугольной системы России выполнено биостратиграфическое деление карбона Северо-Востока Азии по аммоноидеям (рис. 1) [1]. Для Верхояно-Охотского и Колымо-Омолонского регионов предложены две параллельные последовательности слоев с аммоноидеями, с помощью которых проведено сопоставление региональных стратиграфических шкал обоих регионов. Увязка аммоноидных шкал с брахиоподовыми биостратонами существенно повысила корреляционный потенциал верхояно-колымских и колымо-омолонских биостратиграфических подразделений, выделенных по различным группам беспозвоночных.

Получены первые данные изучения Re–Os изотопной системы самородного золота орогенных месторождений Яно-Колымского металлогенического пояса (Северо-Восток России) [2]. Re–Os изотопное датирование самородного золота орогенных месторождений показало, что их формирование произошло 148 и 137 млн лет назад (конец поздней юры–начало раннего мела) субсинхронно финальному импульсу внедрения/остывания магматических комплексов малых интрузий и позднеорогенным процессам в Яно-Колымском металлогеническом поясе и на вос-

	Система	Отдел	Ярус	Верхояно-Охотский регион			Колымо-Омолонский регион			
				Горизонт	Слои с брахиоподами	Слои с аммоноидеями	Н/г	Горизонт	Комплексы брахиопод	Слои с аммоноидеями
	Пермь			Хорокытский	Jakutoproductus verkhoyanicus	Prouddenites evolutus	Мунугуджакский	Jakutoproductus mirandus		
300	Верхний	Гжельский	Кыгылтасский	Jakutoproductus protoverkhoyanicus	Somoholites andrianovi	Пареньский	Учинейский	Verchojania monstrosus		
305		Касимовский		Muirwoodia mammata - Jakutoproductus tatjanae	Eoshumardites lenensis		Ичевеемский	Verchojania magiveemsis	Eoshumardites popowi	
310	Средний	Московский	Солончанский	Settedabanania stepanovi	Christioceras domokhotovi	Ольчинский	Горнинский	Verchoyania sp.		
315		Башкирский	Наталинский	Verchojania cheraskovi	Orulgani- nites trianguli- umbilicatus		Осокинский	Verchoyania centispinus - Verkhotomia lata	Diaboloceras ruzhenzewi	
								Balakhonia insinuata-Verkhotomia tukulaensis		Yansh. alexandri
320				Sajakella formosa						
325		Серпуховский	Хатынахский	Balkhashiconcha sarytchevae - Spirifer byrangi	Neoglyphioceras septentrionale	Магарский	Хаямский	Balkhashiconcha gigantea - Praehorridonia dorsoplicata		
330			Овлачанский	Orulgania gunbiniana	Neoglyphioceras abramovi		Момский	Balkhashiconcha sarytschevae - Verkhotomia gunbiniana	Pachylyroceras newsomi	
335		Визейский		Buxtonia rimmae - Sajakella migai	Goniatites americanus		Черский	Flexaria piassinaensis - Verkhotomia verkhotomica	Goniatites	
340		Чугучанский		Striatifera striata - Andreaspira snjatkovii				Moderatoproductus zyrjankensis		
345		Кириный		Echinoconchus punctatus - Dictyoclostus tixensis						
345		Базовский		Spirifer besnossovae					Muenstero- ceras	
350		Турнейский	Хамамытский	Prospira settedabanica						
355							Раздоль-нинский			
360	Девон			Таргимский			Таргимский			

Рис. 1. Сопоставление стратиграфических шкал карбона Верхояно-Охотского и Колымо-Омолонского регионов [1]

Fig. 1. Comparison of the Carboniferous stratigraphic scales of the Verkhoyansk-Okhotsk and Kolyma-Omolon regions [1]

точной окраине Сибирского континента (рис. 2). Начальные отношения изотопов осмия ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$) в интервале 0,1844–0,2475 изученных образцов и фракций золота указывают на существенную долю нерадиоогенного компонента, характерного для мантийных источников. Полученные результаты вносят вклад в решение проблем рудообразования и развития рудно-магматических систем.

Предложен новый подход для прогнозирования неустановленных коренных источников россыпей минералов платиновой группы (МПГ) Сибирской платформы с использованием индикаторных минералого-геохимических особенностей МПГ и минералов-включений в них, а также сопоставления ^{190}Pt – ^4He и Re – Os изотопных датировок МПГ с возрастом базит-ультрабазитовых комплексов крупных изверженных провинций [3]. Проведенная корреляция показала,

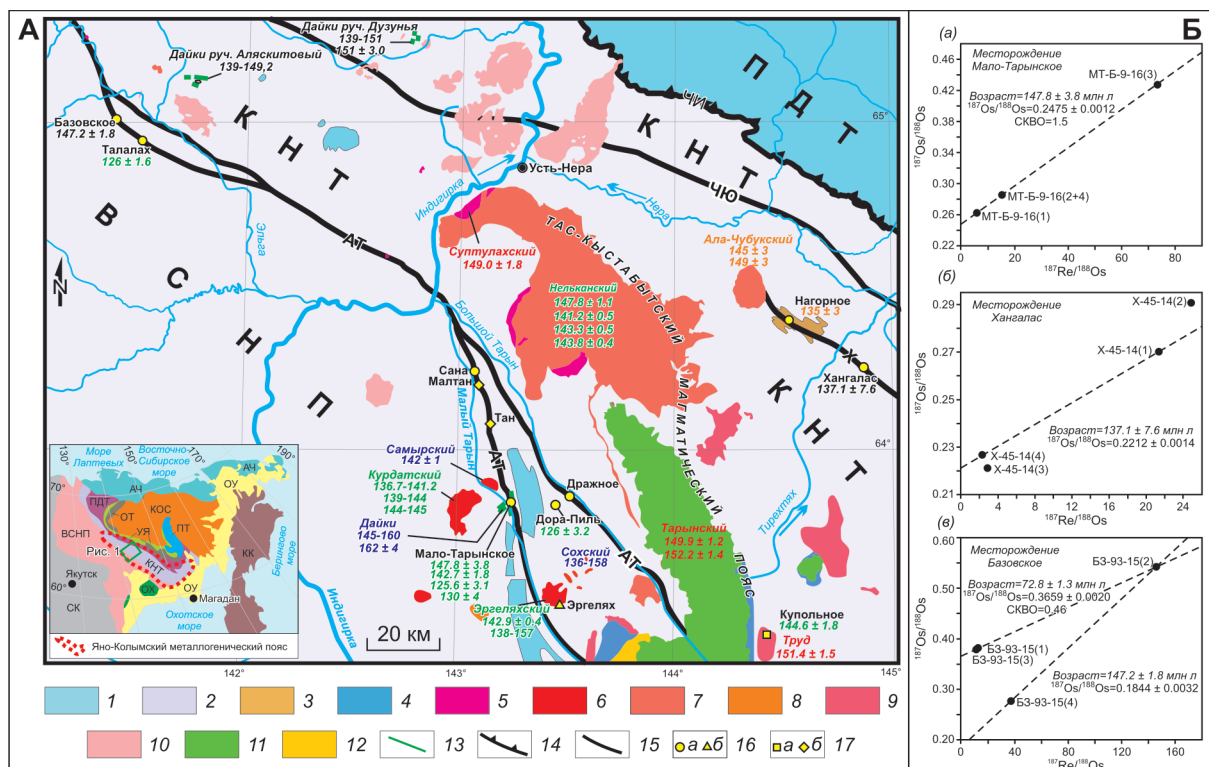


Рис. 2. Схема геологического строения Индигирского сектора Яно-Колымского металлогенического пояса и положение датированных J3–K1 плутонов и месторождений (А) и Re–Os изохронные диаграммы для самородного золота месторождений Мало-Тарынское (а), Хангалас (б) и Базовское (в) (Б). Залитые кружки – образцы и их номера [2].

1–3 – терригенные отложения: 1 – юрские, 2 – триасовые, 3 – верхнепермско-нижнетриасовые; 4 – верхнеюрские вулканогенно-осадочные отложения; 5–13 – магматические образования: 5–12 плутоны (5 – диориты, 6 – гранодиорит-граниты, 7 – адалеллит-граниты, 8 – гранодиориты, 9 – диорит-гранодиориты, 10 – гранит-лейкограниты, 11 – дациты, 12 – риолиты); 13 – дайки; 14, 15 – разрывные нарушения: 14 – Чаркы-Индибирский (ЧИ) надвиг, 15 – разломы сложной кинематики (АТ – Адыча-Тарынский, ЧЮ – Чай-Юреинский, Х – Хангаласский); 16, 17 – месторождения: 16 – золоторудные (а – золото-кварцевые (золото-сульфидно-кварцевые), б – связанные с интрузивами (золото-висмутовые), 17 – комплексные (а – олово-серебряные, б – золото-сурьмяные). Названия магматических образований показаны курсивом, месторождений – обычным шрифтом. Цветные числа показывают возраст в млн лет: красный – метод U-Pb SHRIMP-II, зеленый – метод $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, темно-синий – метод Rb-Sr, оранжевый – метод K-Ar, черный – метод Re-Os. На врезке показано положение района работ: СК – Сибирский кратон, ВСНП – Верхоянский складчато-надвиговый пояс, КНТ – Кулар-Нерский террейн, ПДТ – Полоусно-Дебинский террейн, ОТ – Омuleвский террейн, ОХ – Охотский кратонный террейн, ПТ – Приколымский кратонный террейн, УЯ – Уяндино-Ясаченская вулканическая дуга, КОС – Колымо-Омолонский супертеррейн, АЧ – Арктический и Чукотский террейны, ОУ – Охотско-Чукотский и Удско-Мургаальский вулканические пояса, Мезокайнозойские орогены: КК – Корякский и Камчатско-Курильский

Fig. 2. (A) Scheme of the geological structure of the Indigirka Sector of the Yana–Kolyma metallogenic belt and the location of the dated (J3–K1) plutons and deposits and (B) Re–Os isochronous diagrams for native gold of the Malo-Tarynskoe (*a*), Khangalas (*б*), and Bazovskoe (*в*) deposits. Full circles indicate the samples and their numbers [2].

1–3 – clastic deposits: 1 – Jurassic, 2 – Triassic, 3 – Upper Permian–Lower Triassic; 4 – Upper Jurassic volcanogenic–sedimentary deposits; 5–13 – igneous formations: 5–12 – plutons: 5 – diorite, 6 – granodiorite–granite, 7 – adamellite–granite, 8 – granodiorite, 9 – diorite–granodiorite, 10 – granite–leucogranite; 11 – dacite, 12 – rhyolite; 13 – dykes; 14, 15 – faults: 14 – Charky–Indigirka (ЧИ) thrust, 15 – faults of complex kinematics (AT, Adycha–Taryn; ЧЮ, Chai–Yureya; X, Khangalas); 16, 17 – deposits: 16 – gold: (a) gold–quartz (gold–sulfide–quartz), (б) associated with intrusions (gold–bismuth), 17 – complex: (a) tin–silver, (б) gold–antimony. The names of igneous formations are shown in italics; the names of deposits, in regular font. Colored numerals indicate the ages (Ma) obtained by different methods: U–Pb SHRIMP-II, red; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, green; Rb–Sr, dark blue; K–Ar, orange; Re–Os, black (numbers in brackets are the references). The inset shows the position of the studied area: CK, Siberian Craton; BCHI, Verkhoyansk fold and thrust belt; KHT, Kular–Nera Terrane; ПДТ, Polousno–Debin Terrane; OT, Omulevka Terrane; OKT, Okhotsk Cratonic Terrane; ИТ, PriKolyma Cratonic Terrane; УЯ, Uyandino–Yasachnenskaya Volcanic Arc; KOC, Kolyma–Omolon Superterrane; АЧ, Arctic and Chukotka terranes; ОУ, Okhotsk–Chukotka and Udsko–Murgal volcanic belts; Mesozoic–Cenozoic orogens: КК, Koryak and Kamchatka–Kuril

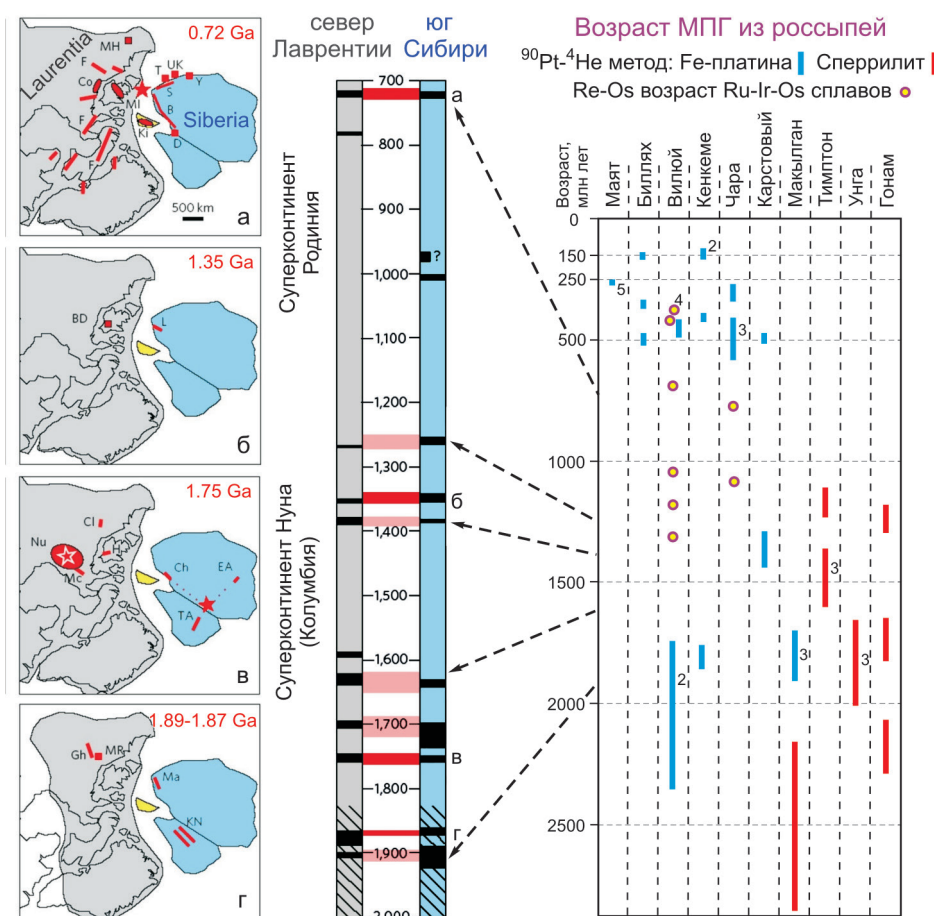


Рис. 3. Сопоставление времени проявления крупных изверженных провинций на юге Сибирского и севере Канадского (Лаврентия) кратонов с возрастом минералов платиновой группы из россыпей Сибирской платформы [3]

Fig. 3. Comparison of the time of occurrence of large igneous provinces in the southern Siberian and northern Canadian (Laurentian) cratons with the age of platinum group minerals from placers of the Siberian Platform [3]

что потенциальными источниками таких россыпей могли быть погребенные под платформенным чехлом докембрийские мафит-ультрамафитовые интрузии, связанные с крупными магматическими событиями, имевшими место 1915, 1870, 1750, 1640, 1500, 1380, 1270, 1005 и 720 млн лет назад на Северо-Азиатском (Сибирском) кратоне (рис. 3). Данный метод может быть применен при поисках МПГ и на других древних платформах (Восточно-Европейской, Северо-Американской, Африкано-Аравийской, Австралийской и др.), где известны ареалы их распространения с неустановленными источниками.

Из других результатов отметим открытие нового минерала амгаита – первого в мире природного соединения таллия с теллуром – теллурида таллия – $Tl^{3+}_2Te^{6+}O_6$ [4]. Минерал обнаружен

на рудопоявлении Хохойское, расположенном в 120 км к западу от г. Алдан, в верхнем течении ручья Хохой, правого притока р. Амга, в Алданском районе Республики Саха (Якутия) ($56^{\circ}06'36''N$, $123^{\circ}14'42''E$). Амгаит назван в честь р. Амга, в бассейне которой находится золоторудное проявление Хохойское. Амгаит найден в рудах, сосредоточенных в карстовых полостях, заполненных сильно лимонитизированными глинисто-песчаными образованиями. Встречается в виде мелкозернистых агрегатов до 0,05 мм в поперечнике (рис. 4). Цвет – от темного красновато-коричневого до черного. Черта черная. Блеск – субметаллический, матовый, непрозрачный. Нефлуоресцентный. Твердость (по шкале Мооса) – очень мягкий, примерно 1,5–2. Хрупкий. Излом рако-

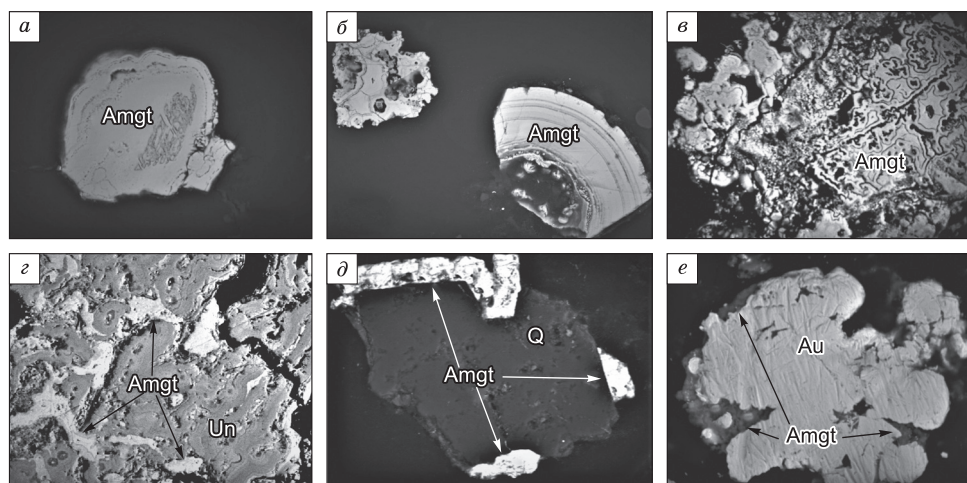


Рис. 4. Зональные агрегаты амгаита. Снято на сканирующем микроскопе. Формы выделения амгаита и его ассоциация с другими минералами: *a, б* – зональные агрегаты, *в* – ритмично-зональные индивиды, *г* – прожилки амгаита в неидентифицированном антимонате таллия, *д* – каймы амгаита вокруг кварца, *е* – тесная ассоциация самородного золота и амгаита. Amgt – амгаит, Au – самородное золото, Un – неидентифицированный антимонат таллия, Q – кварц [4]

Fig. 4. Zonal aggregates of amgait. Photographs taken with a scanning microscope. Forms of amgait particles and its association with other minerals: *a, б* – zonal aggregates, *в* – rhythmic-zonal individuals, *г* – amgait veinlets in unidentified thallium antimonate, *д* – amgait rims around quartz, *е* – close association of native gold and amgait. Amgt – amgait, Au – native gold, Un – unidentified thallium antimonate, Q – quartz [4]

вистый. Рентгенограмма идентична синтетическому аналогу.

Определена роль магматических поясов фанерозойских активных окраин Северо-Востока Азии в осадконакоплении юрско-меловых осадочных бассейнов юго-восточной части Верхояно-Колымского орогена [5]. Анализ U–Pb-датировок обломочных цирконов из юрских обломочных отложений Сугойского синклиория и меловых вулканогенно-осадочных пород Омсукчанского прогиба показал, что в средней–поздней юре Удско-Мургальская магматическая дуга была главным источником кластики (рис. 5). Для Омсукчанского прогиба основными источниками кластики были вулканы Уяндино-Ясачненской и Удско-Мургальской дуг; начиная с апта также и гранитоиды Главного (Колымского) батолитового пояса, а в позднемеловых осадках появляется кластика из вулканитов Охотско-Чукотской дуги и поднятий Колымо-Омолонского супертеррейна. Сравнение возрастов обломочных цирконов в юрских отложениях Западного Верхоянья, Иньяли-Дебинского и Сугойского синклиориев показывает, что последний формировался не на востоке дистальной части Верхоянской пассивной окраины, а в тылу позднемезозойского задугового бассейна.

На основе комплексного изучения уникальных образцов из россыпей Якутии, Урала и Бразилии предложена новая кристаллогенетическая

классификация балласов и балласоподобных алмазов [6]. Схема эволюции роста представляет собой последовательный ряд морфологических типов балласоподобных алмазов (рис. 6). Морфологическое разнообразие балласоподобных форм и уникальность условий кристаллизации определялись направлением изменения величины пересыщения и скорости роста кристаллов алмаза. Изменение кинетики роста при влиянии адсорбции и поглощении примесей сопровождалось возникновением автодеформационных дефектов в виде расщепления и многократного радиального двойникования кристаллов.

Коллективами ИГАБМ СО РАН, СВФУ м. М.К. Аммосова, АН РС(Я) и ИЗК СО РАН впервые создана карта сейсмоструктоники Восточной Сибири как индикатора типов сейсмоструктонической деструкции земной коры и издана новая карта сейсмоструктоники северо-восточного сектора Российской Арктики [7]. На картах отражена классификация геодинамической активности новейших структур, структурно-кинематическая характеристика систем активных разломов и параметры сейсмоструктонических деформаций. Впервые выполнена градация уровня сейсмической опасности для шельфов Восточно-

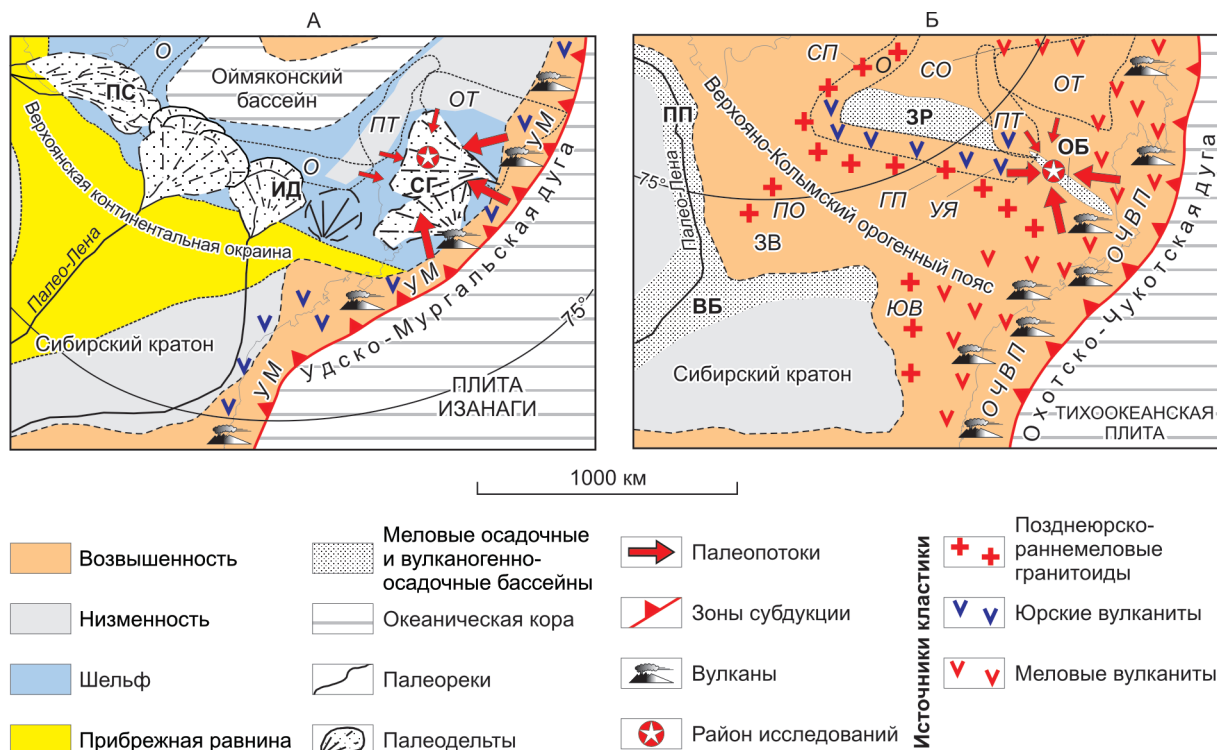


Рис. 5. Палеогеографические реконструкции северо-восточной Азии для средней–начала поздней юры (А) и готерива–позднего мела (Б) [5]

Основные юрские и меловые осадочные бассейны: СГ – Сугойский, ОБ – Омсукчанский, ИД – Иньяли-Дебинский, ПС – Полоусный, ВБ – Вилуйский, ПП – Приверхоянский, ЗР – Зырянский. Террейны: ПТ – Приколымский, ОТ – Омолонский, О – Омuleвский, ЗВ – Западноверхоянский. Магматические пояса: УМ – Удско-Мурга́льский, ОЧВП – Охотско-Чукотский, УЯ – Уяндина-Ясачненский, ГП – Главный (Колымский), СП – Северный, СО – Святоиноско-Олойский, ЮВ – Южноверхоянский

Fig. 5. Paleogeographic reconstructions of northeast Asia for the Middle – Early Late Jurassic (A) and Hauterivian – Late Cretaceous (B) [5]

The main Jurassic and Cretaceous sedimentary basins: СГ – Sugoisky, ОБ – Omsukchansky, ИД – Inyali-Debin, ПС – Polousny, ВБ – Vilyui, ПП – Verkhoyansk, ЗР – Zyryansky. Terranes: ПТ – Prikolyma, ОТ – Omolon, О – Omulevka, ЗВ – Western Verkhoyansk. Magmatic belts: УМ – Uda-Murgalsky, ОЧВП – Okhotsk-Chukotka, УЯ – Uyandina-Yasachnensky, ГП – Main (Kolyuma), СП – Northern, СО – Svyatonosko-Oloy, ЮВ – South Verkhoyansk

Арктических морей и прилегающей акватории Северного Ледовитого океана

В СВФУ им. М.К. Аммосова получены новые знания о глубинном геологическом строении и рудоносности территории Якутии, геофизических критериях регионального прогноза оруденения и состоянии инженерных сооружений; водоемах Арктики и Субарктики и палеоклиматических условиях их формирования; накопленном экологическом ущербе; разработаны технологии и мероприятия ликвидации вреда окружающей среде и рекультивации нарушенных земель; выполнен прогноз изменения климата и состояния многолетнемерзлых пород северных регионов России. Значительный вклад в геологическую изученность территории и укрепление минерально-сырьевой базы внесли выпускники

университета, где подготовка геологов осуществляется с 1956 г. [8].

На основе анализа современных геолого-геофизических данных при помощи автоматизированной программы KOSCAD 3D уточнены особенности глубинного строения Верхоянского складчатонадвигового пояса [9]. Выделены региональные гравитационные аномалии, положение нескрытых магматических ареалов и трансформных разломов (рис. 7). Установлено максимальное погружение поверхности кристаллического фундамента в Южно-Верхоянском секторе, минимальное – в Сетте-Дабанской тектонической зоне. Блоковое строение фундамента характерно для Адыча-Эльгинской тектонической зоны. Отмечена корреляция границ тектонических зон с линейными знакопеременными аномалиями Δg . Полученные

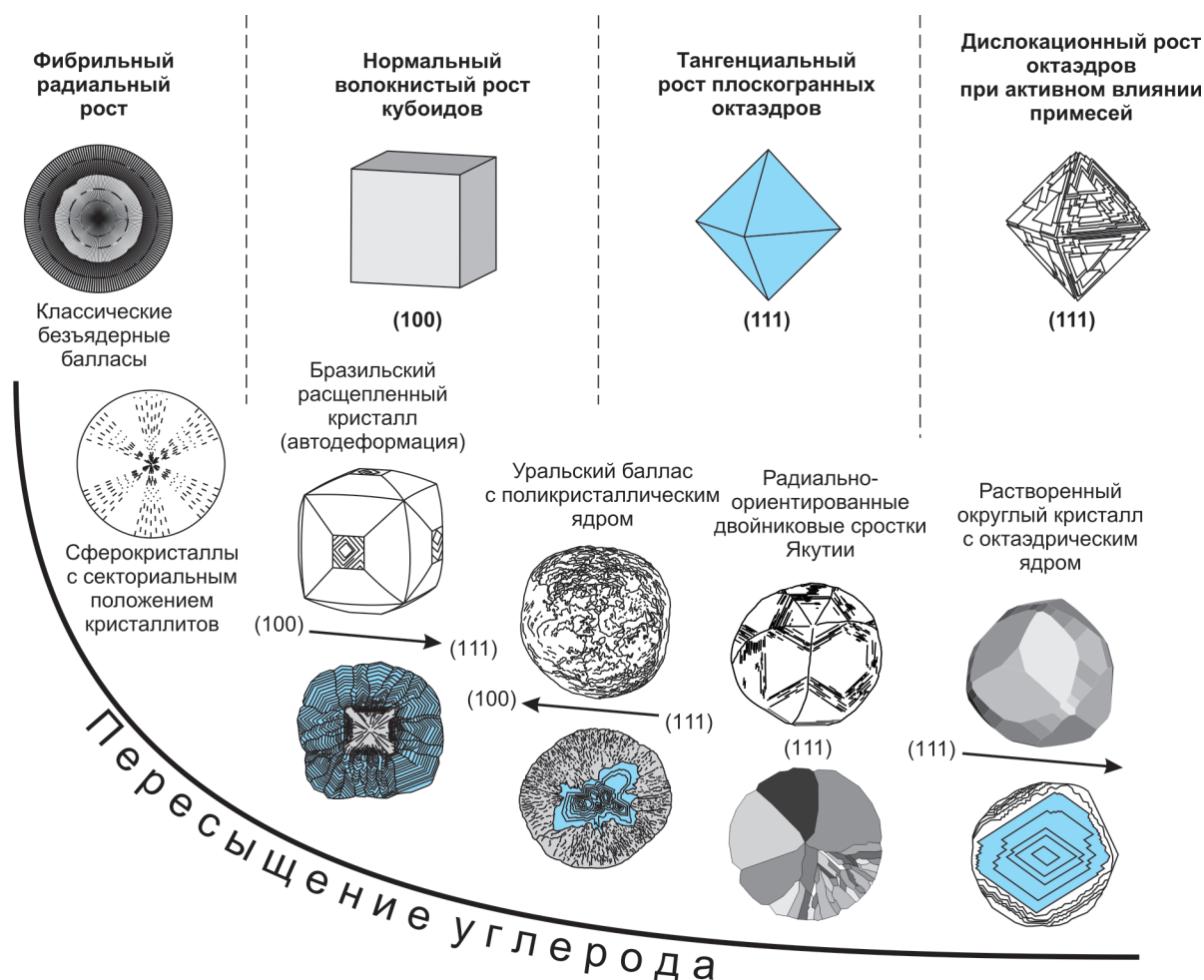


Рис. 6. Схема эволюции роста баллоподобных алмазов [6]

Fig. 6. Scheme of the evolution growth of balassa-like diamonds [6]

результаты являются основой для актуализации металлогенических построений.

Изучение околорудных метасоматитов ряда золоторудных объектов позволило установить их геохимическую специфику, условия формирования и золотоносность [10]. На примере Мало-Тарынского золоторудного месторождения (Северо-Восток России) выявлено, что руды и метасоматиты характеризуются As–Au–Sb–W-специализацией, при низких концентрациях Bi, Co, Ni, Cr, Cu, Zn и повышенных Li, Ag, Cd, Cs. Об участии в рудообразовании магматогенных источников свидетельствует обогащенность руд W и Mo (рис. 8, А). Спектры распределения содержаний РЗЭ в метасоматитах и рудах сходны с распределением РЗЭ во вмещающих породах, при этом установлен их вынос в процессе формирования месторождения (рис. 8, Б). Величины Eu/Eu^* (0,61–0,88) и Ce/Ce^* (0,6–1,3) аномалий указывают на

слабовосстановительные условия рудообразования, что ограничивает участие окисленных метеорных вод.

Определена оптимальная модель климатического реанализа для территории РС(Я) по среднему росту среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) и по годовой сумме осадков [11]. По данным реанализа рассчитаны поля изменений СГТВ и годовой суммы осадков между историческим и актуальным климатическими периодами, соответственно 1961–1990 и 1991–2020 гг. Среднее увеличение СГТВ на территории Якутии составило $+1,3 \pm 0,14$ °С. Годовая сумма осадков выросла на 8 мм, однако выделяются области ее заметного увеличения (южная и юго-западная Якутия) и уменьшения (арктическое побережье).

Выполнен прогноз климатических изменений среднемесячной температуры воздуха зимнего периода [12]. Показано, что в ближайшем будущем

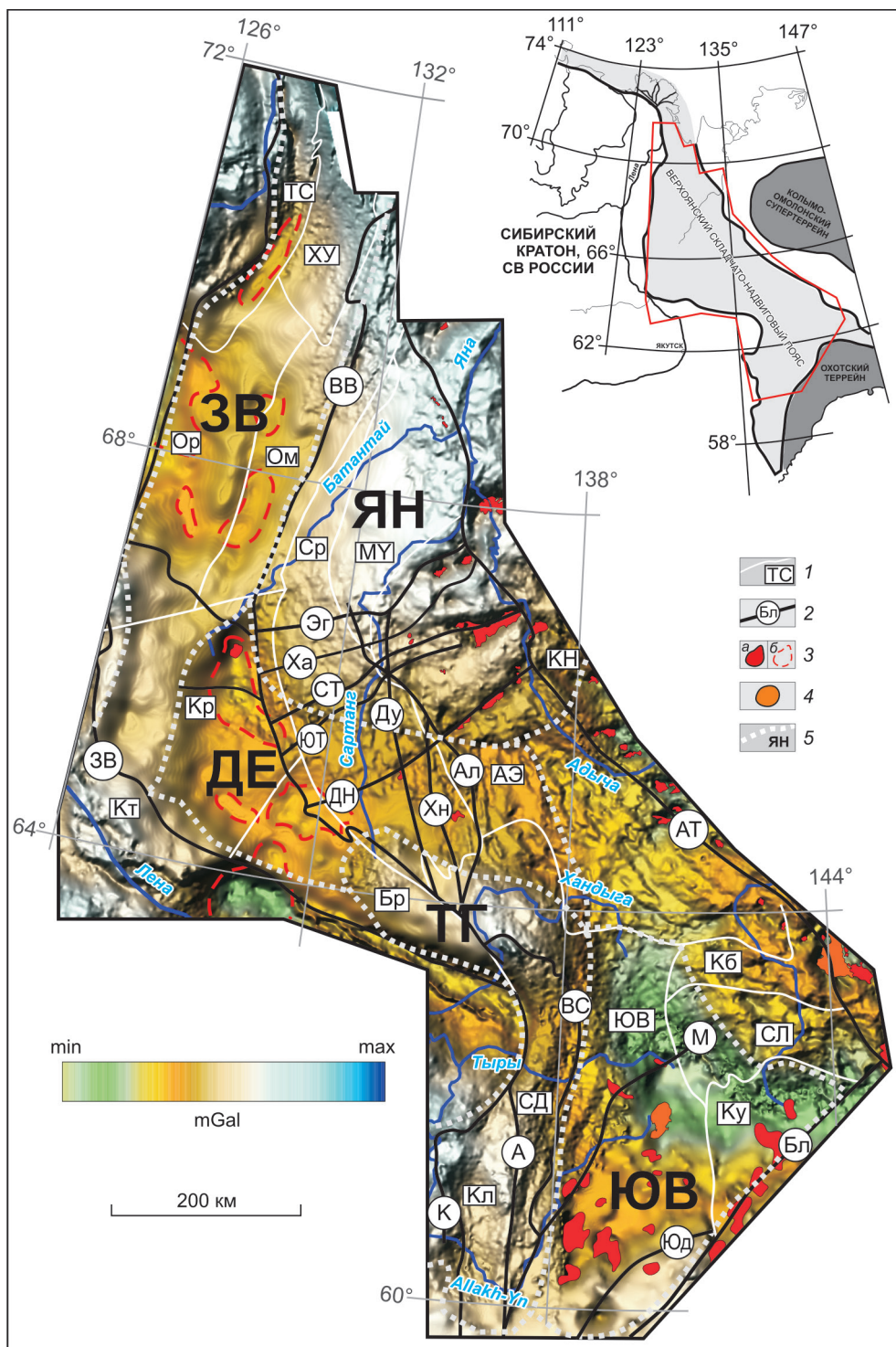


Рис. 7. Гравитационные аномалии Верхоянского складчато-надвигового пояса [9].

1 – границы тектонических зон; 2 – разломы; 3 – гранитоиды: а – установленные, б – предполагаемые; 4 – субвулканы; 5 – границы региональных гравитационных аномалий: ЗВ – Западно-Верхоянская, ДЕ – Дербекинская, ЯН – Янская, ТГ – Томпо-Горностахская, ЮВ – Южно-Верхоянская. Тектонические зоны (буквы в квадратах): ТС – Туора-Сисская, ХУ – Хараулахская, Ор – Орулганская, Ом – Омлойская, Кр – Куранахская, Кт – Китчанское поднятие, Ср – Сартангская, СЯ – Средняянская, Бр – Бараинская, АЭ – Адыча-Эльгинская, СД – Сетте-Дабанская, Кл – Кыллахская, Кб – Кобюминская, СЛ – Сунтар-Лабынкырская, Ку – Куйдусунская впадина, ЮВ – Южно-Верхоянская, КН – Кулар-Нерский террейн. Разломы (буквы в кружках): ЗВ – Западно-Верхоянский, ВВ – Восточно-Верхоянский, Эг – Эгехайский, Ха – Халтысинский, СТ – Северо-Тирехтяхский, ЮТ – Южно-Тирехтяхский, Хн – Хунхандинский, Ал – Аллахский, ДН – Дербек-Нель-

гесинский, Ду – Дулгалахский, АТ – Адыча-Тарынский, К – Кыллахский, А – Акринский, ВС – Восточно-Сетте-Дабанский, Юд – Юдомский, М – Минорский, Бл – Билякчанский

Fig. 7. Gravity anomalies of the Verkhoyansk fold-thrust belt [9].

1 – boundaries of tectonic zones; 2 – faults; 3 – granitoids: *a* – established, *b* – supposed; 4 – subvolcanoes; 5 – boundaries of regional gravity anomalies: 3В – Western Verkhoyansk, ДЕ – Derbekinskaya, ЯН – Yana, ТГ – Tompo-Gornostakhskaya, ЮВ – South Verkhoyansk. Tectonic zones (letters in squares): TC – Tuora-Sisskaya, XY – Kharaulakhskaya, Op – Orulganskaya, Om – Omo-loiskaya, Kp – Kuranakhskaya, Kt – Kitchansky uplift, Cp – Sartangskaya, CЯ – Sredneyanskaya, Bp – Barainskaya, AЭ – Adycha-Elgin, CD – Sette-Dabanskaya, Кл – Kyllakhskaya, Кб – Kobyuminskaya, CJ – Suntar-Labyntyarskaya, Ky – Kuidusunskaya depression, ЮВ – South Verkhoyansk, KH – Kular-Nera terrane. Faults (letters in circles): 3В – Western Verkhoyansk, BB – East Verkhoyansk, Эг – Egekhaisky, Ха – Khaltysinsky, CT – North Tirekhtyakhsky, ЮТ – South Tirekhtyakhsky, Хн – Khunkhandinsky, Ал – Allahsky, ДН – Derbeke-Nelgesinsky, Ду – Dulgalakhsky, АТ – Adycha-Taryn, К – Kyllakhsky, А – Akrinsky, ВС – East Sette-Dabansky, Ю – Yudomsky, М – Minorsky, Бл – Bilyakhchansky

(2021–2050 гг.) рост среднемесячной температуры воздуха (СМТВ) ожидается преимущественно в декабре и январе. В отдаленном будущем, 2071–2100 г., только по оптимистичному сценарию изменение СМТВ не превысит 3,5 °С, но и в этом случае апрельская СМТВ на станциях южной Якутии превысит –2 °С. Наибольшее увеличение СМТВ до более чем 12 °С прогнозируется с декабря по февраль в арктической зоне Якутии. Данные регионального сценарного климатического прогноза могут использоваться для разработки регионального плана адаптации к климатическим изменениям, различных отраслевых сценариев с максимальными рисками перехода либо физическими рисками.

Одним из научных направлений Института проблем нефти и газа СО РАН в области наук о Земле являются проблемы геологии, разработки месторождений, транспорта и переработки углеводородного сырья в условиях Крайнего Севера. В рамках этого научного направления в течение последних лет проводятся исследования глубинного строения арктических территорий Якутии и прилегающих шельфов Восточно-Арктических морей и их потенциальной нефтегазоносности; разработка новых методических подходов к про-

риев с максимальными рисками перехода либо физическими рисками.

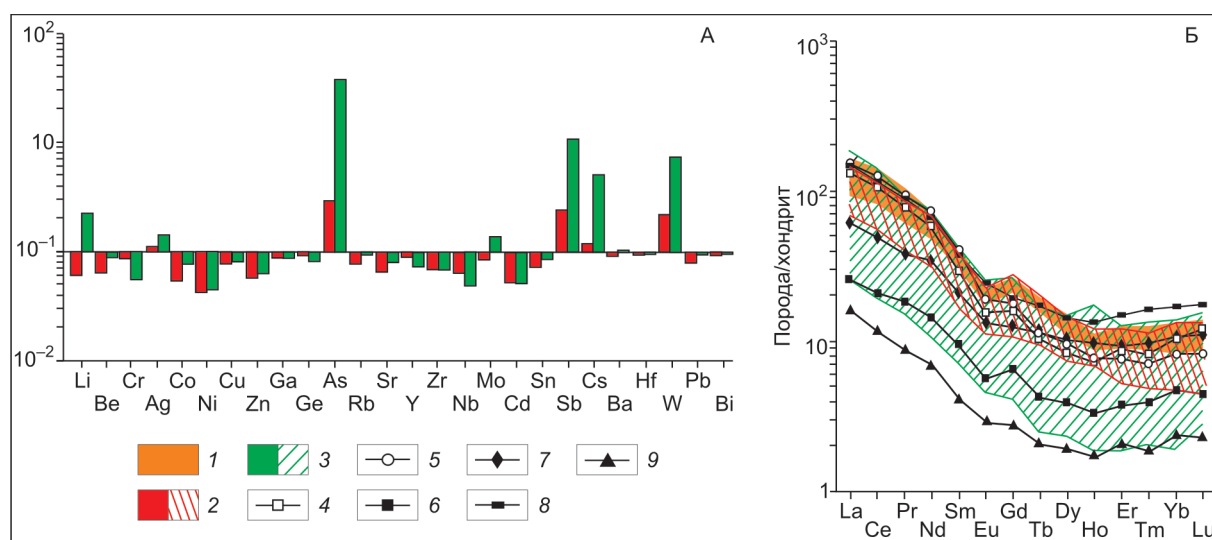


Рис. 8. Распределение микроэлементов (А) и редкоземельных элементов (Б) в метасоматитах и рудах золото-кварцевых месторождений Яно-Колымского складчатого пояса [10].

1–3 – вариации содержаний (Мало-Тарыньское месторождение): 1 – неизмененные породы; 2 – околорудные метасоматиты; 3 – рудные зоны; 4, 5 – околорудные метасоматиты: 4 – Наталкинское месторождение, 5 – Нежданинское месторождение; 6–9 – руды месторождений: 6 – Наталкинское; 7 – Дразное, 8 – Павлик, 9 – Родионовское. Содержания микроэлементов нормализованы к малоизмененным породам верхнего триаса; РЗЭ нормированы по хондриту

Fig. 8. Distribution of trace elements (A) and rare earth elements (B) in metasomatites and ores of gold-quartz deposits of the Yana-Kolyma fold belt [10].

1–3 – content variations (Malo-Tarynskie deposit): 1 – unaltered rocks; 2 – near-ore metasomatites; 3 – ore zones; 4, 5 – near-ore metasomatites: 4 – Natalka deposit, 5 – Nezhdaninskoye deposit; 6–9 – ores of deposits: 6 – Natalkinskoye; 7 – Drazhnoe, 8 – Pavlik, 9 – Rodionovskoye. The contents of trace elements are normalized to slightly altered Upper Triassic rocks; REE normalized by chondrite

гнозу, поискам, разведке и освоению месторождений традиционных и нетрадиционных видов углеводородного сырья; геохимические исследования нефтематеринских свойств осадочных толщ среднепалеозойско-мезозойского комплекса территорий на шельфе восточной Арктики и северо-востоке Сибирской платформы. Ведутся работы в области геоэкологии по изучению загрязнения окружающей среды (почвы и донные осадки) при разливах нефти и нефтепродуктов, разрабатываются технологии восстановления загрязненных земель, эффективные для условий Крайнего Севера. Выполняются фундаментальные и прикладные исследования в области теории образования гидратных скоплений в земной коре, физической химии газовых гидратов (термодинамические условия, кинетика образования и диссоциации), математического моделирования прогноза и предупреждения гидратообразования в системах добычи и транспорта газа, а также изучаются возможности подземного хранения газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах.

Впервые по особенностям состава и распределения углеводородов-биомаркеров, присущих аквагенному органическому веществу (ОВ), показано, что в среднепалеозойском комплексе отложений нижнедевонские битуминозные толщи неличенской свиты Индигиро-Зырянского прогиба и шлюпочной свиты на о. Котельный (Новосибирский архипелаг) относятся к типичным доманикоидным образованиям с высоким нефтематеринским потенциалом [13]. Установлена достаточно высокая термическая зрелость ОВ, соответствующая главной фазе нефтеобразования. Генетическое единство исходного ОВ этих толщ доказывает близкий характер распределения реликтовых углеводородов (рис. 9). Данные по геохимии свидетельствуют о сходстве условий формирования нефтегазоносности на территории континентальной части востока Сибирской платформы и прилегающего шельфа восточных морей.

В результате многолетнего мониторинга территории, нарушенной при разливе нефти, выявлены поверхностные техногенные углеводородные аномалии и изучен механизм их разрушения [14]. Установлены основные этапы трансформации нефтяных углеводородов в мерзлотных почвах, в том числе при интродукции аборигенных углеводородокисляющих микроорганизмов, на основе которых созданы биопрепараты для очистки почв от нефтезагрязнений. Проведены эксперименты

по биоремедиации загрязненных почв различных биоклиматических зон Якутии и выполнена оценка балансовой стороны динамики биодеградации нефтяных углеводородов (рис. 10) [15]. Изучение природного геохимического фона мерзлотных почв позволило установить, что с увеличением широты содержание углеводородных компонентов, так же как и микробиологическая активность, уменьшаются, при этом нефтезагрязненные почвы Арктических районов начинают заселяться гнилостными и патогенными микроорганизмами [16].

Численные и экспериментальные исследования, направленные на создание научных основ технологии подземного хранения газов в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах на территории Якутии, позволили уточнить математическую модель фильтрации и отбора [17], а также закачки природного газа для случая учета образования гидратов от состава и минерализации пластовых вод. На основе обобщенной математической модели неизотермической фильтрации многофазной жидкости в гетерогенной пористой среде с учетом образования гидратов оценивается динамика распределения гидратонасыщенности, водонасыщенности, давления и температуры в выбранном пласте, определяются зоны возможного гидратообразования в коллекторах, а также динамика изменения проходного сечения скважин. Для задачи отбора определены равновесные условия и кинетические параметры образования гидратов природного газа в объеме растворов солей, имитирующих пластовые воды Вилуйской синеклизы. Получены зависимости равновесного давления от температуры в системе раствор гидрокарбоната натрия (0,25 и 2 %) –метан–гидрат метана в интервале температур 268–288 К [18] (рис. 11). Полученные результаты и математические модели могут быть использованы при разработке научных основ технологии подземного хранения не только природного газа, но и попутного нефтяного газа, а также парниковых и токсичных газов в гидратном состоянии. Решение этой задачи существенно повысит надежность и экологичность систем газоснабжения арктических и северных регионов России.

Перспективы развития научных исследований

Одним из ключевых преимуществ Республики Саха (Якутия) является минерально-сырье-

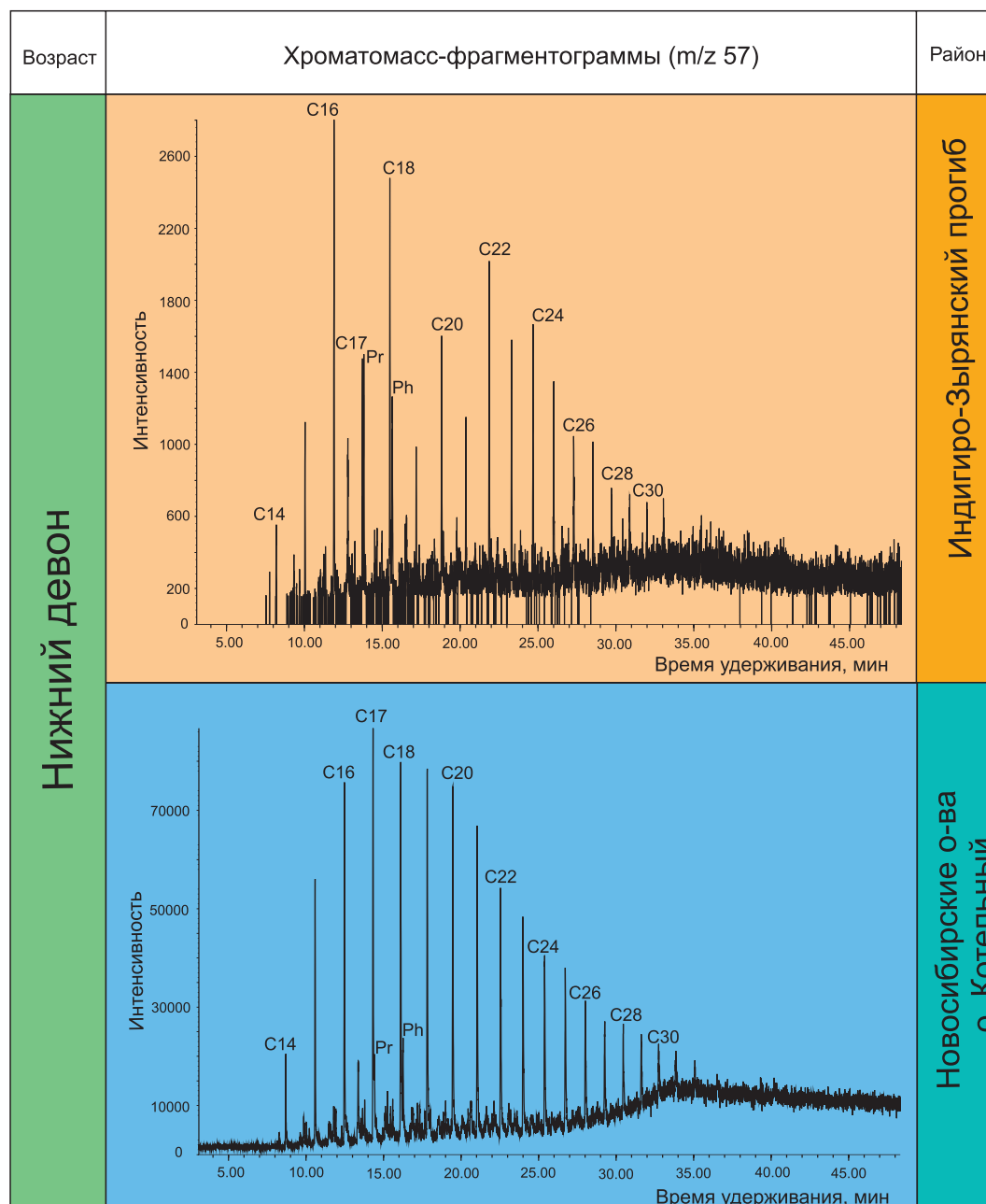


Рис. 9. Хроматомасс-фрагментограммы (m/z57) насыщенных углеводородов в битумоидах пород нижнедевонских отложений Индигиро-Зырянского прогиба и о. Котельный [13]

Fig. 9. Chromatomass-fragmentograms (m/z57) of the saturated hydrocarbons in bitumens of rocks of the Lower Devonian deposits of the Indigirka-Zyryansky trough and Kotelny Island [13]

вой комплекс, геологическая изученность которого остается недостаточной. Предстоит дальнейшее изучение геологического строения и эволюции земной коры территории Якутии, рудообразующих систем стратегических видов полезных ископаемых как фундаментальной основы повышения уровня геологической изученности недр и разработки современных технологий про-

гнозирования и поисков месторождений. Важны совершенствование типовых и разработка новых прогнозно-поисковых комплексов для конкретных геологических обстановок и стратегических типов полезных ископаемых, не обеспеченных запасами (алмазы и др.), и нетрадиционных типов месторождений с учетом перспективных задач развития Республики Саха (Якутия) и России.

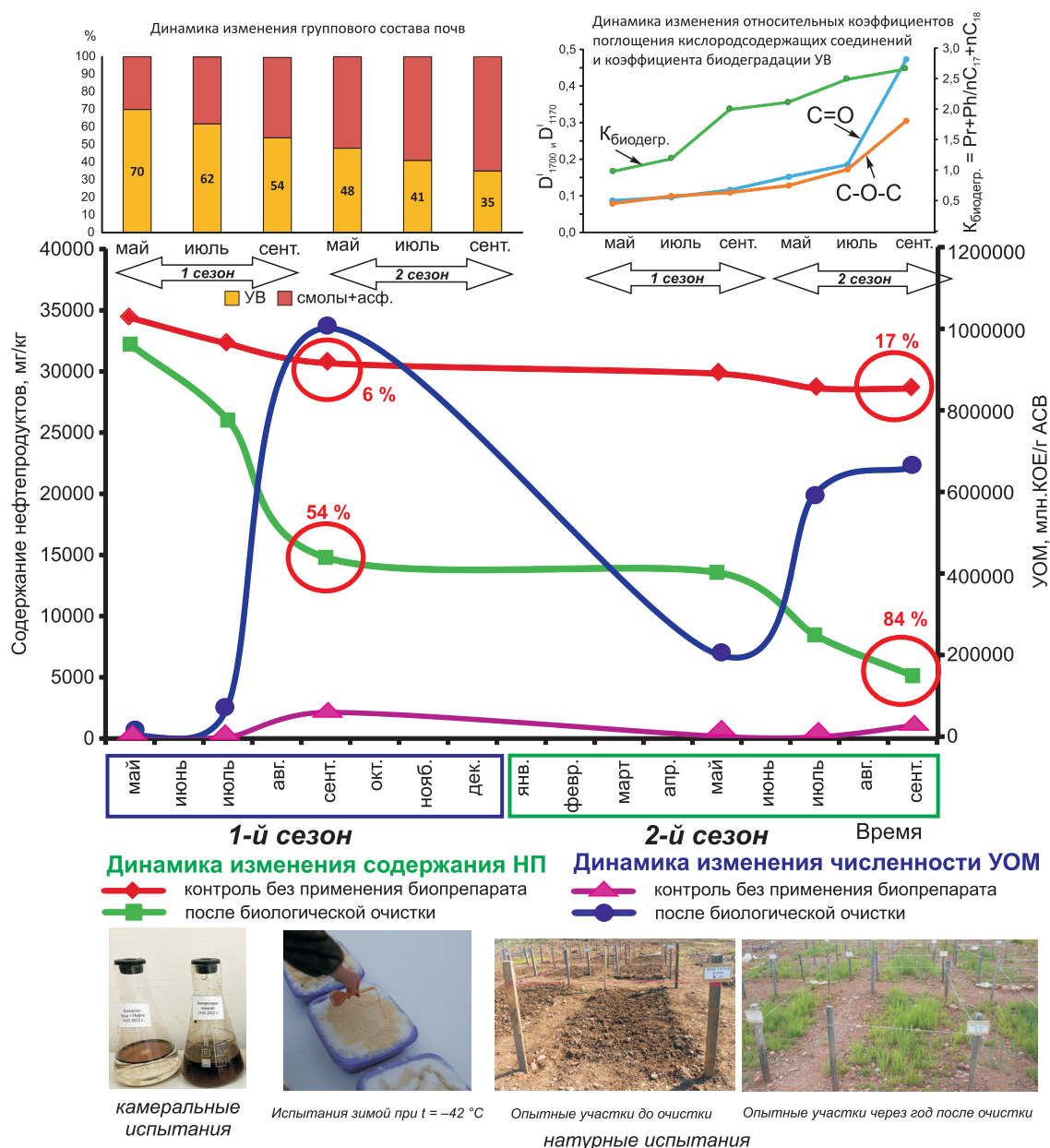


Рис. 10. Биодegradация нефтезагрязнения в мерзлотных почвах в процессе биологической очистки [14]

Fig. 10. Biodegradation of oil pollution in frozen soils in the process of biological treatment [14]

С учетом современных представлений о геодинамическом развитии осадочных бассейнов, их генерационном потенциале и оценки перспектив нефтегазоносности будут продолжены геолого-геохимические исследования потенциально нефтематеринских пород и скоплений природных нафтидов на территории континентальной части северо-востока Сибирской платформы и прилегающем шельфе арктических морей. На территории Якутии открыты 22 нефтегазоконденсатных месторождения, содержащие гелий в промышленных кон-

центрациях, что позволяет рассматривать территорию Якутии в качестве основы для комплексного развития гелиевой промышленности России. Будут проведены исследования по оценке экологических рисков техногенного воздействия на окружающую среду при разливах нефти и созданию технологий восстановления нарушенных территорий Арктической зоны.

Важным является развитие сценарного прогнозирования климата региона на основе климатических моделей на период до 2100 г. Актуальные

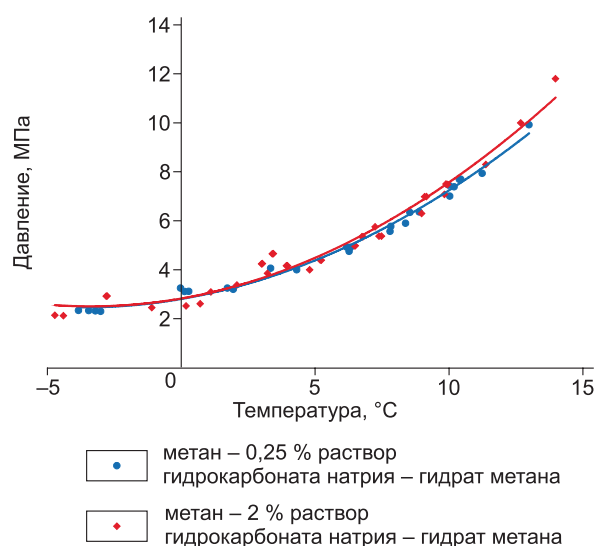


Рис. 11. Равновесные условия гидратообразования метана в растворах гидрокарбоната натрия [18]

Fig. 11. Equilibrium conditions for methane hydrate formation in sodium bicarbonate solutions [18]

задачи региональной климатологии включают оценку параметров атмосферной макроциркуляции и ее связь с уровнем основных гидроклиматических рисков (горимость лесов, наводнения); изучение городского микроклимата и его медицинских аспектов; мониторинг биогеохимических циклов в криолитозоне, включая эмиссию климатически активных газов, миграцию различных форм углерода и других химических элементов.

В целях минимизации негативного воздействия антропогенного фактора необходим комплекс мер по установлению естественного состояния природной среды региона, создание системы наблюдений, анализа, прогноза реакции экосистемных компонентов на воздействие отраслей народного хозяйства Якутии, а также совокупность мероприятий по предупреждению и предотвращению деградации окружающей среды, социального и экономического ущерба.

Обязательным условием дальнейшего продолжения научных исследований в области наук о Земле и решения отмеченных выше задач является обеспеченность высококвалифицированными специалистами. В настоящее время средний возраст специалистов, работающих на территории республики и выполняющих исследования в области наук о Земле, составляет для докторов наук 74 года, кандидатов наук 51 год. Привлечение молодежи в науку – важная задача. Не-

обходимы развитие системы целевого обучения в магистратуре и аспирантуре ведущих университетов страны, грантовая поддержка академической мобильности и научных исследований молодых ученых. Перспективна реализация индивидуальных траекторий образования с учетом приоритетных направлений научных исследований, что гарантирует высокое качество подготовки специалистов.

Список литературы / References

1. Alekseev A.S., Nikolaeva S.V., Goreva N.V., et al. Russian regional Carboniferous stratigraphy. In: Lucas S.G., Schneider J.W., Wang X. and Nikolaeva S. (eds). *The Carboniferous Timescale*. London: Geological Society of London; 2022:49–117. <https://doi.org/10.1144/SP512-2021-134>
2. Fridovsky V.Y., Goryachev N.A., Krymsky R.S., et al. The age of gold mineralization in the Yana-Kolyma Metallogenic Belt, Northeast Russia: first data of Re-Os isotope geochronology of native gold. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2021;15(4):293–306. <https://doi.org/10.1134/S1819714021040035>
3. Okrugin A.V., Yakubovich O.V., Ernst R.E., Druzhinina Zh.Yu. Platinum-bearing placers: mineral associations and their ^{190}Pt - ^4He and Re-Os ages, and potential links with large igneous provinces in the Siberian craton. *Economic Geology*. 2020;115(8):1835–1853. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4773>
4. Kasatkin A.V., Anisimova G.S., Nestola F., et al. Amgaite, $\text{Ti}_3+2\text{Te}_6+\text{O}_6$, a New Mineral from the Khokhoyское Gold Deposit, Eastern Siberia, Russia. *Minerals*. 2022;12(9):1064. <https://doi.org/10.3390/min12091064>
5. Prokoviev A.V., Ershova V.B., Stockli D.F. Detrital zircon U-Pb data for Jurassic–Cretaceous strata from the South-Eastern Verkhoyansk-Kolyma Orogen – correlations to magmatic arcs of the North-East Asia active margin. *Minerals*. 2021;11:291. <https://doi.org/10.3390/min11030291>
6. Pavlushin A., Zedgenizov D., Vasil'ev E., Kuper K. Morphology and Genesis of Ballas and Ballas-Like Diamonds. *Crystals*. 2021;11(1):17. <https://doi.org/10.3390/cryst11010017>
7. Имаева Л.П., Имаев В.С., Смекалин О.П. и др. *Карта сейсмоструктоники Восточной Сибири*. Иркутск, Нерюнгри: Изд-во Технического института (ф) СВФУ; 2015. 127 с.
8. Имаева Л.П., Имаев В.С., Смекалин О.П., et al. *Seismotectonic map of Eastern Siberia*. Irkutsk, Neryungri: Publishing House of the Technical Institute, NEFU; 2015. 127 p.
8. Фридовский В.Ю., Колосов П.Н., Попов Б.И. Вклад выпускников Якутского государственного университета в геологическую изученность территории и создание минерально-сырьевой базы (к 65-летию начала подготовки геологов в Якутии и 60-летию первого выпуска). *Вестник Северо-Восточного федерально-*

го университета им. М.К. Аммосова. 2021;(3):46–57. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2021.23.3.002>.

Fridovsky V.Y., Kolosov P.N., Popov B.I. Contribution of graduates of the Yakutsk State University to the geological study of the territory and development of the mineral resource base of Yakutia (to the 65th anniversary of the beginning of the geology training in Yakutia and the 60th anniversary of the first graduation). *Vestnik of North-Eastern Federal University Series. "Earth Sciences"*. 2021;(3):46–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.25587/SVFU.2021.23.3.002>

9. Solovyov E., Fridovsky V. Deep structure of the Eastern Margin of the Siberian Craton, NE Russia: evidence from analysis of an anomalous gravitational field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;609(1): 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/609/1/012036>

10. Polufuntikova L.I., Fridovsky V.Y., Goryachev N.A. The geochemical features of ores and host rocks of the Malo-Taryn orogenic gold deposit (Verkhoyansk-Kolyma folded region, Northeast Russia). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2020;14:421–433. <https://doi.org/10.1134/S1819714020050061>

11. Тананаев Н.И. Подбор оптимальной модели климатического реанализа по среднегодовой температуре воздуха для территории Республики Саха (Якутия). *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». Earth Sciences*. 2023;(2):88–101. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.30.2.008>

Tananaev N.I. Selection of the best-performing climate reanalysis model for the Sakha (Yakutia) Republic, based on mean annual air temperature. *Vestnik of North-Eastern Federal University Series "Earth Sciences"*. 2023;(2):88–101. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.30.2.008>. (In Russ.)

12. Kirillina K., Tananaev N., Savvinova A., et al. Climate change impacts the state of winter roads connecting indigenous communities: Case study of Sakha (Yakutia) Republic. *Climate Services*. 2023; 30:100356. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2023.100356>

13. Зуева И.Н., Чалая О.Н., Глянцева Ю.С. и др. Геохимические особенности битумопроявлений в нижне-среднедевонских отложениях северо-запад-

ной части о. Котельный (архипелаг Новосибирские острова). *Георесурсы*. 2019;21(3):31–38. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.31-38>

Zueva I.N., Chalaya O.N., Glyaznetsova Yu.S., et al. Geochemical features of bitumen shows in the Lower-Middle Devonian deposits of the Northern-Western part of Kotelny Island (Novosibirsk Island Archipelago). *Georesursy = Georesources*. 2019;21(3):31–38. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.3.31-38>. (In Russ.)

14. Ерофеевская Л.А., Глянцева Ю.С., Зуева И.Н. и др. Биоремедиация нефтезагрязненных почв в климатических условиях Крайнего Севера. Новосибирск: СО РАН; 2022. 130 с.

Erofeevskaya L.A., Glyaznetsova Yu.S., Zueva I.N., et al. *Bioremediation of oil-contaminated soils in the climatic conditions of the Far North*. Novosibirsk: SB RAS, 2022. 130 p. (In Russ.)

15. Глянцева Ю.С. Особенности трансформации старого нефтяного загрязнения в почвах Арктической зоны Якутии. *Теоретическая и прикладная экология*. 2021;(2):89–94. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-089-094>

Glyaznetsova Y.S. Features of transformation of old oil pollution in the soils of the Arctic zone of Yakutia. *Theoretical and Applied Ecology*. 2021;(2):89–94. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-089-094>. (In Russ.)

16. Lifshits S., Glyaznetsova Yu., Erofeevskaya L., et al. Effect of oil pollution on the ecological condition of soils and bottom sediments of the arctic region (Yakutia). *Environmental Pollution*. 2021;288:117680. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117680>

17. Rozhin I.I., Ivanov G.I. Simulation of hydrate plug formation during joint operation of a gas-bearing reservoir and a well under the equilibrium conditions of hydrate formation depending on stratum water composition. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2023;64(2):284–296. <https://doi.org/10.1134/S002189442302013X>

18. Kalacheva L.P., Ivanova I.K., Portnyagin A.S., et al. Equilibrium conditions of methane and natural gas hydrates formation in sodium bicarbonate solutions. *Mendeleev communications*. 2023;33(5):619–621. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2023.09.009>

Об авторах

ФРИДОВСКИЙ Валерий Юрьевич, член-корреспондент РАН, академик Академии наук РС(Я), доктор геолого-минералогических наук, директор, <https://orcid.org/0000-0002-4994-2141>, Scopus Author ID: 6505824025, РИНЦ AuthorID: 71199, e-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru

СОЛОВЬЕВ Евгений Эдуардович, кандидат геолого-минералогических наук, проректор, РИНЦ AuthorID: 144694, e-mail: ee.solovev@s-vfu.ru

ГЛЯЗНЕЦОВА Юлия Станиславовна, кандидат химических наук, заведующая лабораторией, <https://orcid.org/0000-0002-9195-5296>, ResearcherID: J-9714-2018, РИНЦ AuthorID: 232039, e-mail: glyaz1408@mail.ru

About the authors

FRIDOVSKY, Valery Yurievich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Director, <https://orcid.org/0000-0002-4994-2141>, Scopus Author ID: 6505824025, RISC AuthorID: 71199, e-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru

SOLOVYOV, Evgeniy Eduardovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Vice-Rector, RISC AuthorID: 144694, e-mail: ee.solovev@s-vfu.ru

GLYAZNETSOVA, Yuliya Stanislavovna, Cand. Sci. (Chem.), Head of the Laboratory, <https://orcid.org/0000-0002-9195-5296>, ResearcherID: J-9714-2018, RISC AuthorID: 232039, e-mail: glyaz1408@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 18.10.2023

Поступила после рецензирования / Revised 10.11.2023

Принята к публикации / Accepted 16.11.2023