

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 4
ИЮЛЬ—АВГУСТ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 г.

Выходит 6 раз в год



ФГБОУ ВО «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДочный УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ»

МОСКВА-2018

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ СТАТЕЙ, ПУБЛИКУЕМЫХ В ЖУРНАЛЕ

В журнале «Известия высших учебных заведений. Геология и разведка», включенным решением ВАК в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук», публикуются статьи, представляющие научный и практический интерес. Статьи, направляемые в редакцию, должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Статья должна быть представлена в двух экземплярах, изложена в сжатой форме строгим научным языком, тщательно отредактирована. К рукописи должны быть приложены аннотация на русском языке (100–250 слов) с ключевыми словами и резюме на английском языке с ключевыми словами (100–250 слов).

2. Рукопись должна быть напечатана на компьютере кеглем 12 на белой писчей бумаге, через два интервала с полями шириной 2,5 см, без помарок и вставок. Объем статьи не должен превышать 12 страниц. В рукописи необходимо сделать ссылки на полях на таблицы и рисунки.

3. В рукописи указываются: УДК, название статьи, инициалы и фамилия автора(ов), место работы и адрес на русском и английском языках, электронные адреса авторов. Рукопись подписывается всеми авторами. В конце статьи автор сообщает адрес для переписки (лучше домашний), телефон.

4. В формулах греческие буквы обводятся красным карандашом. Прописные и строчные буквы, имеющие одинаковое написание, нужно пометить двумя черточками простым карандашом: прописные (заглавные) снизу, строчные — сверху. Трудноразличимые в рукописном обозначении буквы и знаки обязательно пояснять на полях.

5. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

6. Таблицы должны иметь тематические заголовки, не быть громоздкими, не дублировать текст и рисунки. Таблицы печатаются на отдельных листах и прилагаются в конце статьи.

7. Рисунки должны быть четко выполнены в черно-белом и цветном виде в компьютерных графических редакторах (CorelDRAW, Photoshop и др.). Компьютерные рисунки необходимо предоставлять в виде изображений и в исходном виде, доступном для правки (т. е. с сохранением отдельных слоёв — кривых, надписей). На обороте каждого рисунка указываются его номер, фамилия автора и название статьи. Подписи к рисункам прилагаются на отдельном листе. Микрофотографии должны иметь контрастное изображение.

8. Список литературы должен содержать все цитируемые и упоминаемые в тексте работы в алфавитном порядке, оформленный по ГОСТ (в начале — на русском языке, затем — в романском алфавите). При ссылке на изобретение необходимо указать автора, название, год, номер и страницу «Бюллетеня изобретений». Ссылки на работы, находящиеся в печати, не допускаются. Библиографическое описание дается в следующем порядке: фамилия и инициалы автора, полное название работы (для сборника статей — его название), место издания, название издательства, год издания, число страниц (для неперiodических изданий) или интервал страниц (для сборников), для периодических изданий — название журнала, год выпуска, том, интервал страниц. При ссылке на литературный источник в тексте приводится порядковый номер работы в квадратных скобках, например, Н.М. Страхов [3]. Далее отдельным блоком приводится список литературы (References) в романском алфавите, повторяющийся список литературы к русскоязычной части, оформленный по стандартам Scopus. Если в списке есть ссылки на иностранные публикации, они полностью повторяются в списке, готовящемся в романском алфавите. Пример оформления журнальной статьи: Author A.A., Author B.B., Author C.C. (транслитерация) Title of article (перевод на английский). Title of Journal (транслитерация и перевод на английский), 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49-53. (In Russ). Более подробно см. О.В. Кириллова «Редакционная подготовка научных журналов по международным стандартам». http://academy.raspp.ru/files/documents/1_2_kirillovmetrec_2012.pdf. Транслитерация приводится по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

9. Никакие сокращения слов, имен, названий, как правило, не допускаются. Разрешаются лишь общепринятые сокращения названий мер, физических, химических и математических величин, терминов и т. д.

10. Необходимо представлять статью, набранную в Microsoft Word, на CD-диске или флеш-карте или отправить её по электронной почте.

11. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, возвращаются авторам для переделки. Датой поступления считается день получения редакцией окончательного текста.

12. Дополнения в корректуре против рукописи не допускаются.

13. Редакция журнала оставляет за собой право производить сокращения и редакционные изменения рукописей.

14. Оттиски авторам не высылаются.

15. В редакцию необходимо предоставлять официальное письмо-рекомендацию организации за подписью руководителя, заверенной печатью.

16. Плата за публикацию статей не взимается.

Главный редактор А.В. Лопатин (академик РАН)

Заместители главного редактора

В.В. Куликов, Ю.А. Попов

Члены редакционного совета

Председатель В.А. Косьянов

**А.И. Варламов, П.Н. Гусев, Е.А. Козловский, Пейчен Ли, В.И. Лисов, Г.А. Машковцев,
И.Г. Спиридонов, К.Н. Трубецкой (академик РАН)**

Члены редколлегии

**О.С. Брюховецкий, В.К. Гаранин, С.Д. Ганова, П.А. Игнатов, М.Н. Игнатьева, Н.Б. Кузнецов, В.С. Куликов,
М.Г. Леонов, А.В. Малков, А.В. Маслов (член-корр. РАН), Ю.Б. Марин, (член-корр. РАН), З.М. Назарова,
А.А. Никитин, Г.Н. Пилипенко, П.Ю. Плечов, В.С. Попов, А.В. Самсонов (член-корр. РАН), К.Ж. Семинский,
Н.В. Соловьев, А.В. Толстов, В.Ю. Фридовский, Л.Е. Чесалов, Е.Н. Щурова (отв. секретарь)**

Сдано в набор 15.06.2018.
Бумага офсет. № 1
Уч.-изд л. 11,50.

Подписано в печать 15.08.2018.
Гарнитура Таймс
Тираж 200 экз.

Формат 60 90/8.
Усл. печ. л. 11,50.
Заказ

Адрес редакции: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, МГРИ—РГГРУ. Тел.: 8(495)433-61-66.
E-mail: journal-geology@mgri-rggru.ru, shchurovaen@mgri-rggru.ru. Internet: <http://geology.mgri-rggru.ru/>

© Оформление «Изв. вузов. Геология и разведка», 2018

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА
2018, № 4

СОДЕРЖАНИЕ

Геология

Колодяжный С.Ю. Долгоживущие структурные ансамбли Восточно-Европейской платформы. Статья 3. Тектоника плитного чехла 5

Минералогия, петрография, литология

Алексеев В.П., Амон Э.О. Основной фациальный закон Н.А. Головкинского — проблематика и новые горизонты 17
Сонин В.М., Грязнов И.А., Жимулев Е.И., Чепуров А.И. Морфология алмазов, растворённых в расплаве Fe-S при разном содержании серы 23

Андреичев В.Л., Соболева А.А., Сергеев С.А., Пресняков С.Л. Цирконовая хронология интрузивного магматизма полуострова Канин 30

Полезные ископаемые, методика их поисков и разведки

Авдонин В.В., Жегалло Е.А., Сергеева Н.Е. О природе оксидных железомарганцевых руд океана 39
Зинчук Н.Н. О древних источниках алмазов в россыпях . 44
Степанов В.А. Золото и ртуть в процессах рудообразования на Камчатке 54

Геоинформатика

Нафигин И.О., Устинов С.А., Петров В.А. Трёхмерное ГИС моделирование чехла Стрельцовой кальдеры на основе цифровых моделей рельефа дневной поверхности и кровли фундамента 61

Вопросы геолого-разведочного образования

Фоменко Н.Е. О методике преподавания геофизических дисциплин в институте наук о Земле ЮФУ 68

Из истории науки

Щеглов И.А., Ахунов Ф.Ф., Еременко Р.У., Комаров В.Н. Жорж Кюве — выдающийся учёный-естествоиспытатель (к 250-летию со дня рождения) 77

Краткие сообщения

Петроченков Д.А. Геммологические характеристики сенгилита — нового вида ювелирно-поделочного сырья Ульяновской области 83
Вязкова О.Е., Черепанский М.М., Белов К.В. Об изменении роли гидрогеологических условий на разных этапах функционирования природно-археологических систем . 87

CONTENTS

Geology

- Kolodyazhny S.Y. Long-lived structural ensembles of the East European platform. Article 3. Tectonics of the platform's cover . . . 5

Mineralogy, petrography, lithology

- Alekseev V.P., Amon E.O. The N.A. Golovinsky's fundamental facial law — problematics and new horizons 17
- Sonin V.M., Gryaznov I.A., Zhimulev E.I., Chepurov A.I. Morphology of diamonds dissolved in the Fe-S melt at different sulfur contents 23
- Andreichev V.L., Soboleva A.A., Sergeev S.A., Presnyakov S.L. The zircon chronology of the intrusive magmatism of the Kanin Peninsula 30

Useful minerals, methods of their prospecting and exploration

- Avdonin V.V., Zhegallo E.A., Sergeeva N.E. On the nature of oxide ferromanganese ores ocean 39
- Zinchuk N.N. About ancient sources of diamonds placers . . . 44
- Stepanov V.A. Gold and mercury in the processes of ore formation in Kamchatka 54

Geoinformatics

- Nafigin I.O., Ustinov S.A., Petrov V.A. Three-dimensional GIS modeling of the Streltsovskaya caldera's cover on the basis of surface relief and the basement's top digital models 61

Geologic education Issues

- Fomenko N.E. On methodology of teaching geophysical courses at the Institute of Earth Sciences, SFU 68

From the history of science

- Shcheglov I.A., Akhunov F.F., Yermenko R.U., Komarov V.N. Georges Cuvier — an outstanding scientist-naturalist (to the 250th anniversary of birthday) 77

Brief reports

- Petrochenkov D.A. Gemmological characteristics of sengilit — a new kind of jewelry-ornamental raw materials of the Ulyanovsk region 83
- Vyazkova O.E., Cherepansky M.M., Belov K.V. The change of role of the hydrogeological conditions at the different stages of the functioning of natural-archeological systems 87

ГЕОЛОГИЯ

УДК 551.243(571.1)

ДОЛГОЖИВУЩИЕ СТРУКТУРНЫЕ АНСАМБЛИ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ
ПЛАТФОРМЫ. СТАТЬЯ 3. ТЕКТОНИКА ПЛИТНОГО ЧЕХЛА

С.Ю. КОЛОДЯЖНЫЙ

*Геологический институт РАН,
7, Пыжевский пер., г. Москва 119017, Россия
e-mail: kolod63@mail.ru*

В современной структуре Восточно-Европейской платформы (ВЕП) важную роль играют долгоживущие зоны дислокаций, осложняющие строение плитного чехла и фундамента. Эти зоны организованы нелинейно, образуют крупную вихревую мегаструктуру, закрученную по часовой стрелке, и характеризуются неоднородным строением в разрезе и вдоль простирания. В их этапах развития прослеживаются многочисленные кинематические инверсии, что связано с периодическим проявлением и повторением различных геодинамических обстановок: коллизионных, рифтогенных, транспрессионных и транстензионных. Процессы знакопеременного вращения ВЕП по модели «ирисовой диафрагмы» объясняют многие закономерности развития долгоживущих тектонических зон и образованной ими вихревой мегаструктуры.

Ключевые слова: внутриплитная тектоника; геодинамика; зона сдвига; рифтогенез; авлакоген; кинематика; вихревая структура; Восточно-Европейская платформа.

LONG-LIVED STRUCTURAL ENSEMBLES OF THE EAST EUROPEAN PLATFORM.
ARTICLE 3. TECTONICS OF THE PLATFORM'S COVER

S.Y. KOLODYAZHNY

*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences
7, Pyzhevsky street, Moscow 19017, Russia
e-mail: kolod63@mail.ru*

In the modern structure of the East European platform (EEP) an important role is played by long-lived dislocation zones, complicating the complexes of the platform's cover and the basement. They are organized non-linearly, form a large vortex megastructure twisted clockwise, and are characterized by an inhomogeneous structure in the vertical and lateral directions. In the stages of their development, numerous dynamic (kinematic) inversions are observed, which are associated with the periodic manifestation and repetition of various geodynamic settings: collision, rifting, transpression and transtension. The processes of alternating rotation of EEP using "iris diaphragm" model explain many development laws of long-lived tectonic zones and vortex megastructure.

Key words: intraplate tectonics; geodynamics; shear zone; rifting; aulacogen; kinematics; vortex structure; East European platform.

Особенности тектоники осадочного чехла Восточно-Европейской платформы (ВЕП) позволяют проследить дальнейший путь развития на плитном

этапе долгоживущих тектонических зон, обособленных в инфраструктуре фундамента. Для этой цели составлены структурные карты, основанные

на материалах дешифрирования цифровых моделей рельефа (спутниковая альтиметрия) и аэрокосмоснимков, а также анализе опубликованных и фондовых материалов [2, 3, 5—7, 9—17, 19, 21, 22]. Из множества выявленных линеаментов выбирались наиболее протяженные и контрастно проявленные в современном рельефе (рис. 1). При обнаружении их связей со структурой различных горизонтов осадочного чехла появлялись основания рассматривать линеаменты в качестве тектонических нарушений. Результаты дистанционного анализа уточнялись в процессе полевых структурно-кинематических исследований (1993—2017 гг.).

Структуры чехла и их соотношения с тектоникой фундамента

Крупнейшие тектонические элементы ВЕП представлены Балтийским и Украинским щитами, между которыми располагается обширная область, перекрытая осадочным чехлом, — Русская плита (рис. 2). В строении последней обособлены синеклизы и антеклизы, а также структуры высокого порядка: своды и впадины, валы и флексуры [3, 23]. Многие из этих платформенных структур наследуют позицию тектонических нарушений фундамента [3, 4]. В основании приосевых частей Москов-

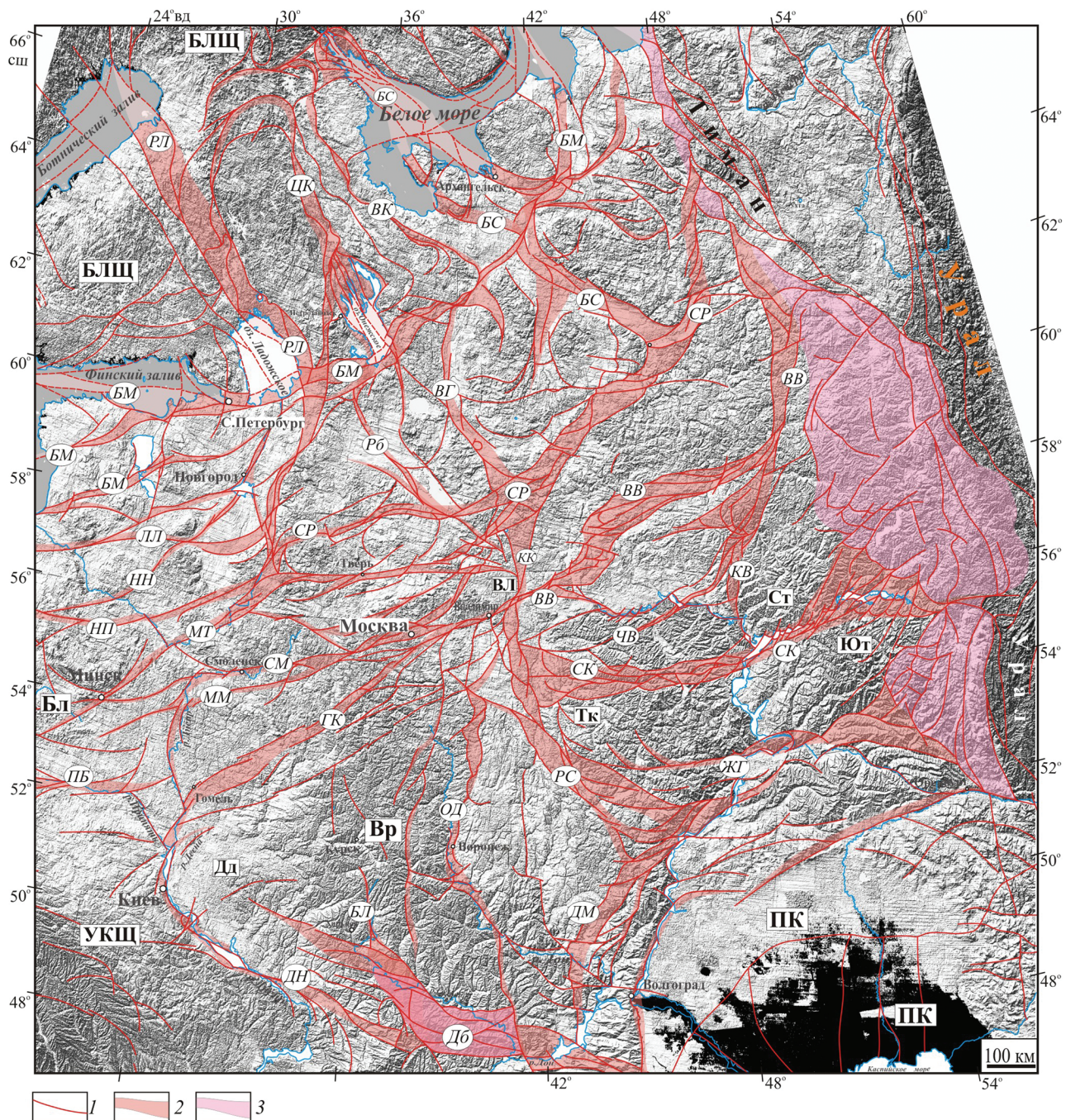


Рис. 1. Схема дешифрирования цифровой модели рельефа Восточно-Европейской платформы: 1 — линейменты и разрывы; 2 — зоны дислокаций; 3 — краевые складчато-надвиговые пояса; др. усл. обознач. на схеме см. рис. 2

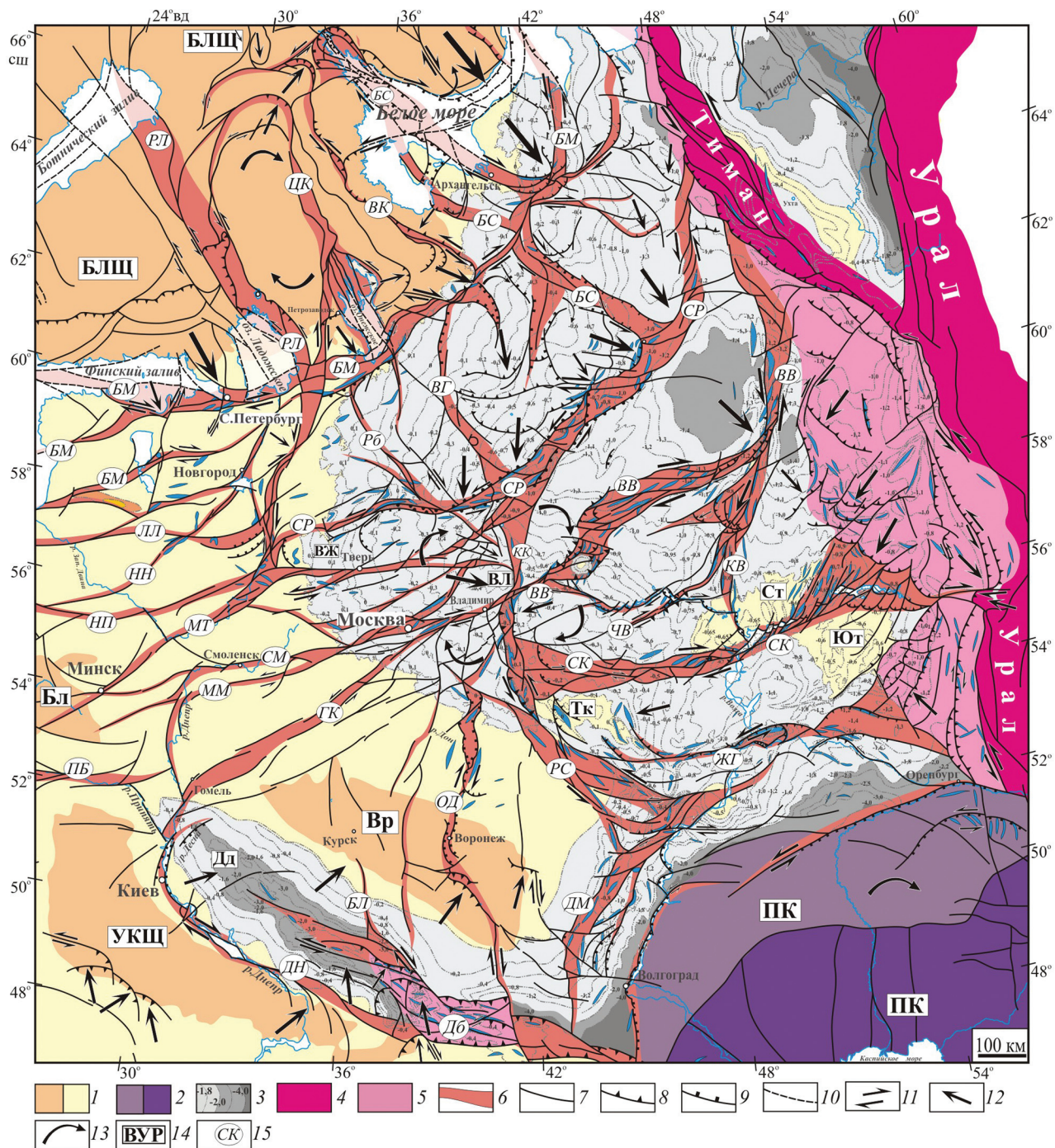


Рис. 2. Структурная схема Восточно-Европейской платформы (с использованием данных [2, 3, 5–7, 9–17, 19, 21, 22]): 1 — области поднятий и их склонов; 2 — депрессии и их склоны; 3 — стратоизогипсы кровли верейского горизонта московского яруса (C₂); 4 — горно-складчатые пояса; 5 — краевые складчато-надвиговые пояса; 6 — зоны дислокаций (сдвига); 7–10 — разрывы: 7 — сдвиги; 8 — взбросы и надвиги; 9 — сбросы; 10 — скрытые в акваториях; 11–13 — направления перемещений альпийского этапа: 11 — сдвиговых, 12 — горизонтально-тангенциальных, 13 — ротационных; 14–15 — названия: 14 — платформенных мегаструктур, 15 — зон дислокаций; геодинамические узлы: ВЖ — Верхневолжский, ВЛ — Владимирский; щиты: БЛЩ — Балтийский, УКЩ — Украинский; своды: Бл — Белорусский, Вр — Воронежский, Тк — Токмовский, Ст — Северо-Татарский, Ют — Южно-Татарский; впадины: Дд — Днепровско-Донецкая, ПК — Прикаспийская; зоны сдвига: РС — Рязано-Саратовская, КК — Касимов-Костромская, ЖГ — Жигулевская, СК — Сурско-Камская, КВ — Казанско-Вятская, ЧВ — Чебоксаро-Вятская, ВВ — Владимир-Вятская, СР — Среднерусская, БМ — Балтийско-Мезенская, БС — Беломорско-Северодвинская, ВК — Восточно-Карельская, ЦК — Центально-Карельская, РЛ — Раахе-Ладужская, РБ — Рыбинская, ВГ — Вологодско-Каргопольская, РВ — Рижско-Волховская, ЛЛ — Лиепайско-Локновская, НН — Неман-Новгородская, НП — Неман-Полоцкая, МТ — Минско-Тверская, СМ — Смоленско-Московская, ММ — Могилевско-Московская, ГК — Гомель-Калужская, ПБ — Припять-Брестская, ДН — Днепровская, ДБ — складчатый Донбасс, КР — зона (вал) Карпинского, БЛ — Белгород-Донецкая, ОД — Окско-Донская, ДМ — Доно-Медведицкая

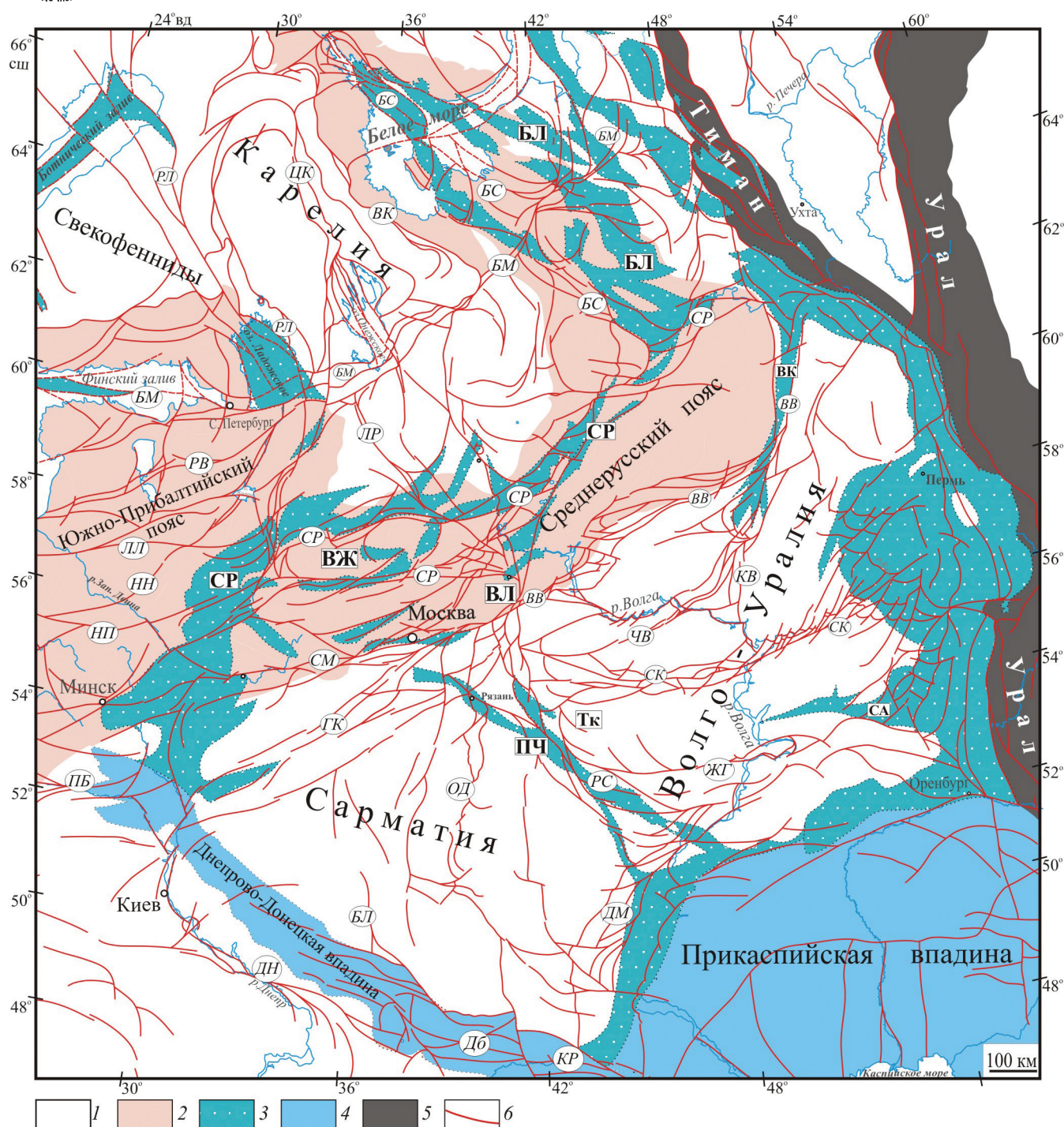


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая соотношения структур фундамента и зон дислокаций плитного чехла: 1 — архей-палеопротерозойские кратоны; 2 — палеопротерозойский орогенный пояс; 3 — рифейские авлакогены; 4 — фанерозойские впадины; 5 — горно-складчатые пояса; 6 — разломы и линейменты; др. усл. обознач. на схеме см. рис. 2

ской и Мезенской синеклиз расположены Среднерусский и Беломорский авлакогены. Над Пачелмским и Вятско-Кажимскими авлакогенами развиты соответственно Рязано-Саратовский и Вятский фанерозойские прогибы (рис. 3).

В современной структуре ВЕП важную роль играют протяженные зоны дислокаций, осложняющие комплексы плитного чехла и проникающие в фундамент. Они образуют паутинообразную ради-

ально-концентрическую систему тектонических нарушений и контролируют границы крупных структур ВЕП (рис. 2). Зоны, ориентированные радиально, сходятся в пределах тектонического узла диаметром порядка 500 км с центром в районе г. Владимира. По отношению к Верхневолжскому геодинамическому узлу, обособленному в структуре фундамента, Владимирский узел смещен к востоку примерно на 300 км (рис. 3). Радиальные зоны

чаще конформно наследуют древние структуры фундамента и, также как и они, образуют гигантскую вихревую структуру, закрученную по часовой стрелке (рис. 2, 3). Системы концентрических зон обычно дискордантны к структуре фундамента, но в целом конформны контурам ВЕП и обрамляющим её орогенным поясам. К ним относятся нарушения, развитые вдоль Днепровско-Донецкого рифта и окраины Балтийского щита. Дискордантными также часто являются складчато-надвиговые пояса окраин платформы, связанные с надвиганием окаймляющих её горно-складчатых сооружений (рис. 2) [3, 7, 8, 18, 20].

Строение зон дислокаций плитного чехла

Зоны дислокаций плитного чехла являются глубинными нарушениями: проникают в комплексы фундамента и находят отражение в строении его поверхности (рис. 2, 3). Они хорошо дешифрируются и контролируют морфоструктуры современного рельефа: им на одних участках соответствуют долины крупных водотоков, на других — гряды и уступы рельефа, крупные изгибы русел рек и сквозные долины (рис. 1). Этот признак свидетельствует о новейшей активности нарушений в процессе развития современной гидросети ВЕП в плиоцене—квартере [17]. Протяженность рассматриваемых зон составляет от 500 до 1000 км при ширине от 2 до 60 км. В вертикальном сечении они часто имеют цветковую структуру, а в плане — вид линейных поясов разрывно-складчатых дислокаций. В осадочном чехле зоны выражены разрывами, но чаще — системами малоамплитудных дизъюнктивно-пликативных нарушений, рассредоточенных в широкой полосе и образующих структурные рисунки, характерные для сдвиговых зон (сочетание продольных, диагональных и оперяющих разрывов, а также кулисно-эшелонированных систем валов и складок). В строении зон участвуют сдвиговые дуплексы, присдвиговые поднятия и депрессии пулл-апарт. Сдвиговая кинематика многих зон подтверждена материалами полевых исследований [9—17, 21].

В строении зон дислокаций плитного чехла важную роль играют валообразные структуры. Наиболее крупные из них представлены инверсионными мегавалами, расположенными над осевыми частями палеорифтов. В пределах Среднерусской зоны над одноименным авлакогеном расположен Рыбинско-Сухонский мегавал. Аналогичные системы инверсионных валов сопровождают Пачелмский (Окско-Цнинский вал) и Вятско-Кажимский (Вятский вал) палеорифты (рис. 2, 3). Ряд валов связан с разломами фундамента (Жигулевский, Казанско-Вятский и др.), либо с краевыми сбросами авлакогенов, по которым в фанерозое происходили инверсионные взбросо-сдвиговые перемеще-

ния (Керенско-Чембарский, Доно-Медведицкий валы). Крупные мегавалы состоят из системы кулисообразно надстраивающихся пологих антиклиналей, окаймленных взбросо-сдвигами и флексурами.

Зоны дислокаций чехла характеризуются неоднородным строением в вертикальном и латеральном направлениях. Вдоль простирания зон отмечается чередование участков концентрированных и рассредоточенных деформаций, структур сжатия и растяжения. В узлах пересечения зон, в их сегментах горизонтального изгиба и в сдвиговых дуплексах нередко формируются сложные разрывно-складчатые и дивергентные пальмовые структуры (рис. 4). Вертикальная неоднородность многих зон подчеркивается сочетанием в их разрезе гетерогенных структур, образующих единую колонну (снизу вверх): глубинное, часто листрическое, нарушение фундамента; уступ или грабен (авлакоген) в кровле фундамента; система инверсионных валов, надстраивающих рифейские трогги, и разрывов в отложениях чехла.

На сейсмопрофилях структурные рисунки систем разрывов меняются в вертикальном направлении. При этом в разрезе чехла над зонами нарушений фундамента нередко отмечается дисгармоничное чередование пакетов с разрывно-складчатым и горизонтально-слоистым строением [12]. Вертикальных смещений при этом либо нет, либо они незначительны. На поверхности было установлено, что такие ситуации связаны с проявлением сдвигов, в бортах которых формируются зоны субслоистого срыва с оперяющими их надвигами и асимметричными складками волочения [10, 12]. Вергентность этих структур по отношению к плоскости сдвига зеркально меняется и указывает на знак сдвиговых смещений. Таким образом, сдвиговые перемещения в фундаменте адаптируются к реологически расслоенным отложениям чехла, перераспределяясь между горизонтальными и вертикальными плоскостями.

Эти общие тектонические особенности зон дислокаций можно дополнить индивидуальными чертами строения отдельных наиболее изученных структур.

Среднерусская (СР) зона дислокаций представляет собой крупнейшую трансплатформенную структуру, которая прослеживается на протяжении более 1100 км (рис. 2) [10]. На уровне фундамента она соответствует северной границе Среднерусского палеопротерозойского пояса и во многом повторяет очертания одноименного рифейского авлакогена (рис. 3). Над троггами последнего в отложениях чехла развиты инверсионные валообразные структуры, в частности, крупнейший конседиментационный Рыбинско-Сухонским мегавал, прослеженный в приосевой части Московской синеклизы на протяжении 600 км. Амплитуда мегавала зако-

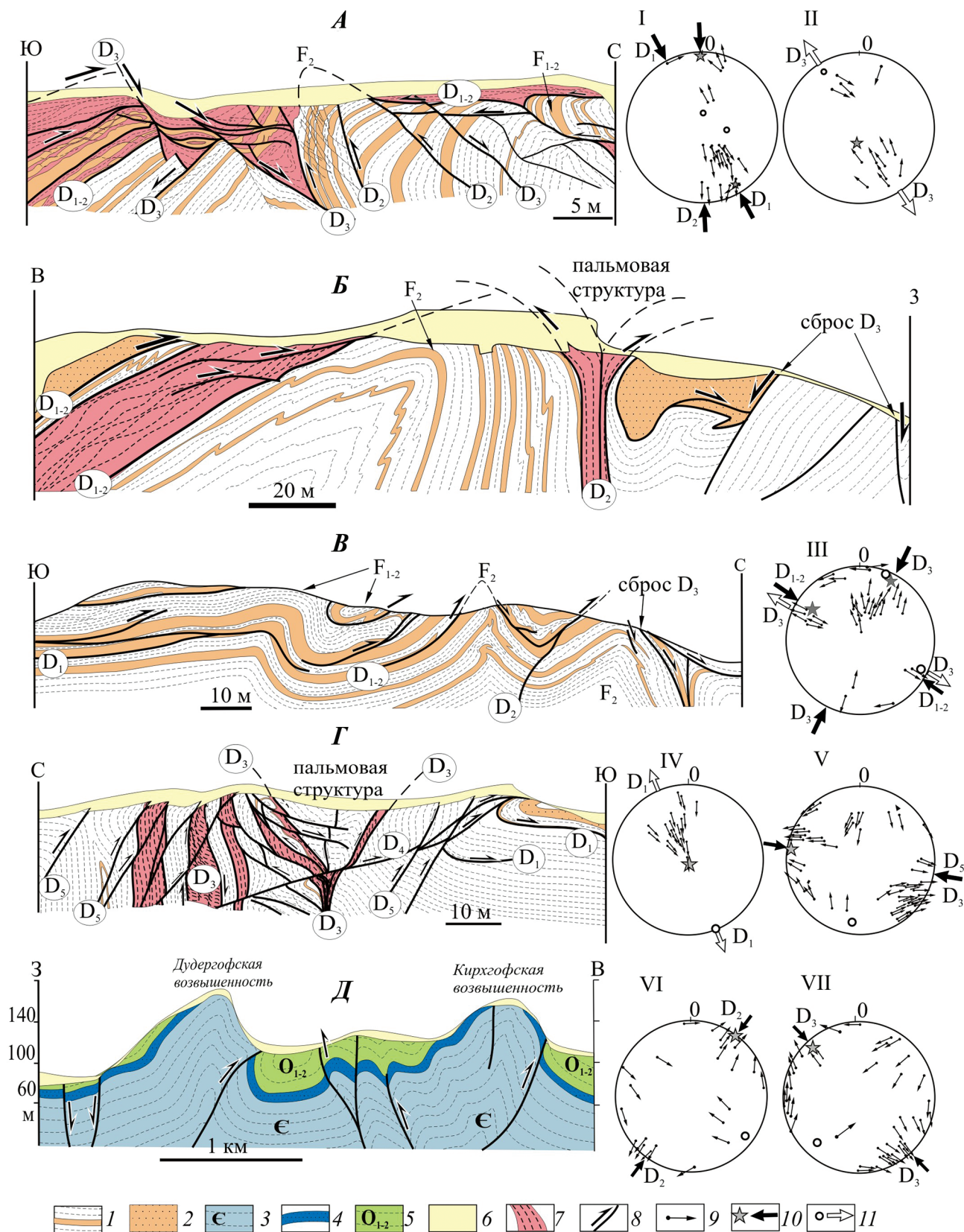


Рис. 4. Геолого-структурные разрезы, иллюстрирующие строение зон дислокаций плитного чехла: А — западная часть Владимир-Вятской зоны, берег р. Волги; Б — Чебоксаро-Вятская зона, район г. Чебоксары; В — Сурско-Камкая зона, пос. Тетюши; Г–Д — Балтийско-Мезенская зона в районах Андомской (Г) и Дудергофской (Д) возвышенностей; I–VII — равноплотные стереограммы (нижняя полусфера); 1 — слоистые породы; 2 — массивные песчаники; 3–5 — отложения кембрий–ордовика; 3 — глины, 4 — песчаники, 5 — известняки и мергели; 6 — четвертичные отложения; 7 — зоны расщепления и меланжа; 8 — разрывы и направления смещений; 9–11 — структурные элементы на стереограммах: 9 — полюса плоскостей разрывов и векторы перемещений висячего крыла, 10 — оси сжатия, 11 — оси растяжения; D₁ — D₅ — этапы деформаций

номерно уменьшается вверх по разрезу от 1000 до 150 м [4]. Мегавал осложняют продольные и диагональные складки второго порядка, часто образующие левостороннюю кулису. В крылья мегавала развиты взбросо-сдвиги, которые сливаются на глубине с зонами сбросов, ограничивающих рифейские грабены, и связаны с их активизацией и кинематической инверсией на плитном этапе развития. В нижних горизонтах чехла амплитуды взбросовых смещений достигают 1000 м, а вверх по разрезу они постепенно снижаются и на уровне отложений триаса и средней юры не превышают 100 м [4]. На поверхности эти нарушения представлены широкими зонами рассредоточенных смещений и флексурных изгибов. В целом СР зона представляет собой долгоживущую структуру, которая формировалась в следующих обстановках: 1) коллизионные события (поздний палеопротерозой); 2) рифтогенез (поздний рифей—ранний венд); 3) платформенный тектогенез и формирование конседиментационного мегавала (поздний венд—палеозой); 4) киммерийско-альпийская активизация (мезозой—кайнозой) [4, 10]. Для альпийского этапа тектогенеза выявлено две фазы проявления, связанные с ранними левосдвиговыми транспрессионными деформациями и более поздними дислокациями правого сдвига [10].

Беломорско-Северодвинская (БС) зона имеет северо-западное (СЗ) простирание и протяженность около 1000 км при ширине от 40 до 120 км [6, 10]. Она наследует палеопротерозойский Беломорско-Лапландский пояс и заложенную на нём рифейскую рифтовую систему (рис. 3). На СЗ в районе Кандалакшского залива БС зона проникает в комплексы фундамента и испытывает торцевое прерывание с развитием систем веерообразных и дугообразных нарушений. В центральной части в области чехла зона испытывает расщепление на две ветви, которые к юго-востоку (ЮВ) от Архангельска ортогонально срезаются Балтийско-Мезенской зоной. К ЮВ от последней прослеживается лишь одна ветвь БС зоны, контролирующая долину р. Северная Двина (рис. 1, 2). В современной структуре БС зона представлена системой неотектонических грабенов и депрессий, сегментированных поперечными сдвигами трансформного характера [6, 10]. Грабены ограничены сбросо-сдвигами, в бортах которых развиты оперяющие нарушения: взбросо-сдвиги, надвиги и диагональные складки, сбросы и грабен-синклинали. Изучение мезоструктур различных комплексов фундамента и чехла показало, что развитие БС зоны на плитном этапе происходило полистадийно и унаследованно по отношению к палеопротерозойским структурам. Статистически преобладают структурные парагенезы, связанные с развитием сбросо-сдвигов в режиме правосдвиговой транстенсии, но также имеются признаки кинематических инверсий и прояв-

ления транспрессии. Интенсивные транстенсионные деформации имели место на неотектоническом этапе развития [6].

Владимир-Вятская (ВВ) зона проявлена на всех структурных этажах платформы и характеризуется неоднородным строением вдоль простирания (рис. 2, 3) [11]. На СВ в районе г. Вятка располагается узкий пережатый сегмент ВВ зоны, в пределах которого развит Вятский мегавал, осложнённый разрывами и складками высокого порядка. По направлению к юго-западу (ЮЗ) зона расширяется (до 60 км) и сегмент повышенной компрессии сменяется системой рассредоточенных сдвиговых нарушений. Единый Вятский мегавал сменяется здесь несколькими рядами валообразных структур, образующих правосторонние кулисообразные цепочки (рис. 2). С этим согласуются закономерные сочетания магистральных и диагональных оперяющих разрывов, ориентированных по принципу синтетических (правых R) и антитетических (левых R') сколов. В пределах ЮЗ сегмента ВВ зона образует S -образный планарный изгиб, в области смыкающего крыла которого расположена Пучеж-Катунская импактная структура. В разрезах по берегам Волги здесь отмечается сочетание тектонических покровов и надвигов, сжатых лежащих и асимметричных складок, взбросо-сдвиговых нарушений и дивергентных пальмовых структур, сбросов и грабенов (рис. 4, А). Структурные исследования и анализ характера пересечений разновозрастных структур позволили выявить здесь четыре стадии деформаций: 1) складчато-надвиговые (D_1) и 2) транспрессионные деформации герцинского этапа (D_2); 3) развитие сбросов и грабенов (D_3), связанных с импактным событием в ранней юре (200–183 млн. лет); 4) деформации альпийского этапа, проявившиеся при регенерации герцинских разрывов в аналогичных условиях транспрессии [11]. Существенно, что обстановки горизонтального сжатия герцинского этапа (D_{1-2}) сменились условиями горизонтального растяжения (D_3) в ранней юре при полной кинематической инверсии (рис. 4, А, стереограммы I, II). Совершенно аналогичные соотношения структур разных генераций были выявлены в ряде других тектонических зон. В частности, в Чебоксаро-Вятской зоне, расположенной в 250 км к ЮВ, также отмечается наложение на ранние разрывно-складчатые структуры (D_{1-2}) более поздних инверсионных сбросов (D_3) (рис. 4, Б).

Сурско-Камская (СК) зона представляет собой глубинное субширотное тектоническое нарушение, участвующее в строении всех структурных этажей платформы (рис. 1–3) [12]. В северном борту СК зоны развита система диагональных складок СВ ориентировки, оперяющих главный магистральный разлом, в области которого их ориентировка приближается к его простиранию и приобретает характер правосторонней кулисы. При этом интен-

сивность деформаций нарастает, и складки становятся более сжатыми (рис. 4, *В*). Вдоль простирания данная зона имеет неоднородное строение (рис. 2). Западный её сегмент построен системой крупных (десятики километров) тектонических линз — сдвиговых дуплексов, для внутренней структуры которых характерно сочетание сдвигов, диагональных складок и дугообразных надвигов, а также диапироподобных протрузий (Карлинская структура) [12]. В восточной части СК зоны главную её магистраль оперяют разрывы СВ простирания, а разделяемые ими блоки образуют структуру «домино», которая подчеркивается морфологией долины р. Кама. На флангах зоны обособлены структуры веерообразной виргации и торцевого затухания зоны сдвига (рис. 1, 2). Имеются признаки унаследованного и полистадийного развития СК зоны от раннего докембрия до новейшего этапа [12]. Детально изучены структурные парагенезы двух стадий альпийской деформации: 1) ларамийская фаза складчатости (палеоцен, D_{1-2}), проявившаяся в условиях правосдвиговой транспрессии; 2) аттическая фаза (миоцен—квартер, D_3) — обстановка левосдвиговой трансенсии (рис. 4, *В*) [12]. Кинематические данные показывают, что аттические деформации (D_3) проявились в результате полной динамической инверсии предшествующей обстановки (D_{1-2}) (рис. 4, *В*, стереограмма III).

Зона надвиговых структур в южной части ВЕП, включая Донбасс, Скифскую плиту и Украинский щит, является областью проявления герцинских и альпийских деформаций [5, 16]. Ансамбли альпийских складчато-надвиговых структур отличаются направлением вергентности: ларамийские — на север—северо-запад, а аттические — на СВ [5]. Ларамийские перемещения примерно соответствуют общему направлению закрытия океана Тетис, а аттические — вергентности надвигов Карпат. При этом отмечается почти перпендикулярная смена направлений тектонических движений (кинематическая инверсия). Эти динамические особенности хорошо коррелируются с кинематикой и инверсией альпийских деформаций рассмотренной выше СК зоны, для которой выявлены аналогичные ориентировки осей сжатия для ларамийской (D_{1-2}) и аттической (D_3) фаз складчатости (рис. 4, *В*, стереограмма III).

Балтийско-Мезенская (БМ) зона развита вдоль границы Балтийского щита и Русской плиты и ортогонально пересекает тектонические структуры фундамента (рис. 3). Она прослеживается в акватории Финского залива и к югу от него, в южном Приладожье и Прионежье, контролирует крупные коленообразные изгибы рек Онега, Северная Двина и Мезень (рис. 2). На флангах зоны обособлены сегменты её веерной виргации. Узлы пересечения БМ зоны с тектоническими нарушениями конформными структуре фундамента сопровождаются ге-

олого-структурными аномалиями, например, в районах Дудергофской и Андомской возвышенностей, в долине р. Онега и в среднем течении р. Пинега [13–15]. Для них характерны прежде всего аномально интенсивные деформации слоёв чехла, которые проявлялись полистадийно и нашли отражение в сложных сочетаниях и пересечениях структур различного кинематического типа (рис. 4, *Г, Д*, стереограммы IV–VII). На основании структурных исследований выявлены следующие этапы развития БМ зоны: 1) транспрессия и формирование разрывно-складчатых структур в конце каледонского цикла; 2) раннегерцинская обстановка горизонтального растяжения и развития конседиментационных сбросов; 3) познегерцинские транспрессионные разрывно-складчатые деформации; 5) альпийские дислокации, проявившиеся в условиях знакопеременных сдвиговых смещений [13–15]. В районе Дудергофской структуры были установлены две фазы постледниковых (голоцен) деформаций: 1) ранний левый сдвиг (D_2) и 2) поздняя правосдвиговая транспрессия (D_3) (рис. 4, *Д*, стереограммы VI, VII) [13]. Выявленные структурными методами условия новейшей правосдвиговой транспрессии (D_3) согласуются с реконструкцией сейсмофокального механизма Осмуссаарского землетрясения, а также с результатами GPS наблюдений в западной части БМ зоны [25].

Особенности тектонического развития

Начиная с позднего венда Балтия (ВЕП) вступила в плитный этап развития, в процессе которого она, так же как и в рифее, часто располагалась в асимметрично организованном геодинамическом пространстве. Развитие палеоокеанов и пассивных окраин вдоль одной из её сторон на многих этапах уравнивалось аккреционно-коллизийными процессами со стороны противоположной её окраины [24]. При этом асимметрия окраин периодически (но не синхронно) зеркально менялась, что вызывало тектоническую перестройку внутриплитных осадочных бассейнов. На фоне этого СЗ сегмент ВЕП (часть Балтийского щита) выступал в роли устойчивого поднятия, а ЮВ сектор (Прикаспийская впадина), напротив, при сложных блоковых перемещениях в целом испытывал преобладающее погружение.

В позднебайкальский этап развития западных и СЗ окраин ВЕП было связано с раскрытием палеоокеана Япетус, а восточных — с аккреционными процессами, завершившимися коллизией Балтии с Арктидой и Скифией [3, 4, 18, 24]. В конце каледонского этапа обстановка вдоль окраин ВЕП зеркально меняется: происходит закрытие океана Япетус и формирование каледонского орогена, а вдоль других окраин плиты развиваются океанические структуры Урала и Палеотетиса, которые

закрылись и превратились в орогены в конце герцинского этапа [3, 20, 24]. В процессе альпийского тектогенеза ВЕП испытывала перемещение к юг—юго-востоку, что компенсировалось сжатием на юге в области альпийских орогенов (Кавказ, Карпаты) и растяжением в северной тыловой области плиты, что проявилось в разрастании и проградации Атлантической оси спрединга в Арктику [16].

Согласно палеотектоническим реконструкциям, Балтия, начиная со среднего палеозоя, испытывала перемещение из экваториального «горячего пояса» на север к нынешнему местоположению [1]. При этом плита вращалась преимущественно по часовой стрелке, что согласуется со следующими данными. Например, в позднем палеозое имело место согласованное проявление двух событий: закрытие Уральского палеоокеана со смещением коллизионных процессов с юга на север [20]; миграция и поворот против часовой стрелки осевой линии бассейна Московской синеклизы [4]. Это позволяет полагать, что депоцентр прогибания Московского бассейна перемещался вслед за узлом столкновения и коллизии континентальных плит, который мигрировал на север вследствие ножницеобразных перемещений при закрытии Уральского палеоокеана. Вращение оси прогиба против часовой стрелки, вероятно, объясняется обратным вращением (по часовой стрелке) Балтии, которая наподобие колеса «прокатывалась» по Уральскому поясу, последовательно раздавливая его северные океанические сегменты, превращая их в коллизионный ороген. Такие ротационно-коллизионные перемещения должны были компенсироваться процессами растяжения в других краевых сегментах ВЕП (участки «отката колеса»). В роли таковых могли выступать активно развивавшиеся в позднем палеозое Прикаспийская впадина и Днепровско-Донецкий рифт [24].

Аналогичным образом процессы познеальпийской коллизии и вращения ВЕП, вероятно, привели к обособлению в её южной части двух динамически разнородных сегментов, компенсировавших её поворот по часовой стрелке. При этом в пределах ЮВ (Прикаспийского) сегмента преобладали обстановки субширотного растяжения, а в районе ЮЗ (украинского) — структуры сжатия СВ вергентности, конформные тектоническим покровам Карпатского орогена [5, 16]. На других краях плиты также отмечаются сегменты, компенсирующие её вращение по часовой стрелке: на востоке это Уральская область новейшей активизации и компрессии, а на СЗ — Балтийская современная рифтовая система [3, 17]. После герцинского этапа ВЕП входила в состав Евразийской плиты, и её самостоятельное вращение было ограничено. Вероятно, имели место незначительные по амплитуде повороты плиты по часовой стрелке, которые от-

части компенсировались обратным вращением. В пользу этой версии колебательного вращения ВЕП могут свидетельствовать кинематические инверсии и чередование обстановок транспрессии и транстенсии при развитии зон дислокаций.

Обсуждение

Рассмотренные материалы показывают, что корневые области зон дислокаций плитного чехла представлены древними тектоническими нарушениями, выраженными в глубинной структуре фундамента и в его кровле (рис. 3). В целом такие структуры представляют собой долгоживущие зоны нарушений, в вертикальном разрезе которых совмещены гетерогенные образования: докембрийские коллизионные и рифтогенные ансамбли, инверсионные конседиментационные структуры и сдвиговые нарушения чехла, а также современные морфоструктуры. В наиболее типичных случаях в эволюции долгоживущих зон прослеживаются следующие этапы: 1) коллизия и формирование сутурных и транспрессионных зон в конце палеопротерозоя; 2) рифтогенез и становление рифейских авлакогенов в режиме транстенсии (готский—тиманский этапы); 3) формирование надрифтовых инверсионных валов и взбросов в процессе развития синеклиз (каледонский—герцинский этапы); 4) сдвиговые перемещения в обстановках транспрессии или транстенсии (киммерийский—альпийской этапы). Эта последовательность событий отражает циклическую смену обстановок сжатия и растяжения, что проявляется и в более короткие интервалы времени, например, кинематические инверсии выявлены для альпийского этапа диастрофизма (СК, СР, БМ зоны), а также на рубежах проявления каледонского (БМ зона), герцинского и киммерийского (ВВ зона) циклов.

Крупнейшие зоны дислокаций плитного чехла располагаются радиально, сливаются и пересекаются в центральной части ВЕП в области Владимирского узла (рис. 2). В целом они наследуют древнюю вихревую мегаструктуру ВЕП (рис. 3). В развитии зон дислокаций важную роль играли транспрессионные альпийские структуры, для которых реконструируются концентрические и радиально-центростремительные траектории горизонтальных перемещений (рис. 2). Первые из них подчеркиваются дугообразной конфигурацией тектонических зон, обрамляющих серповидные транспрессионные ороклины, а также сопряженными сдвиговыми смещениями в крыльях некоторых структурных дуг, в областях максимального изгиба которых отмечаются пережимы и структуры фронтального сжатия. Центростремительные траектории перемещений выражены в вергентности складчато-надвиговых структур, осложняющих окраины ВЕП и, реже, центральные её сегменты.

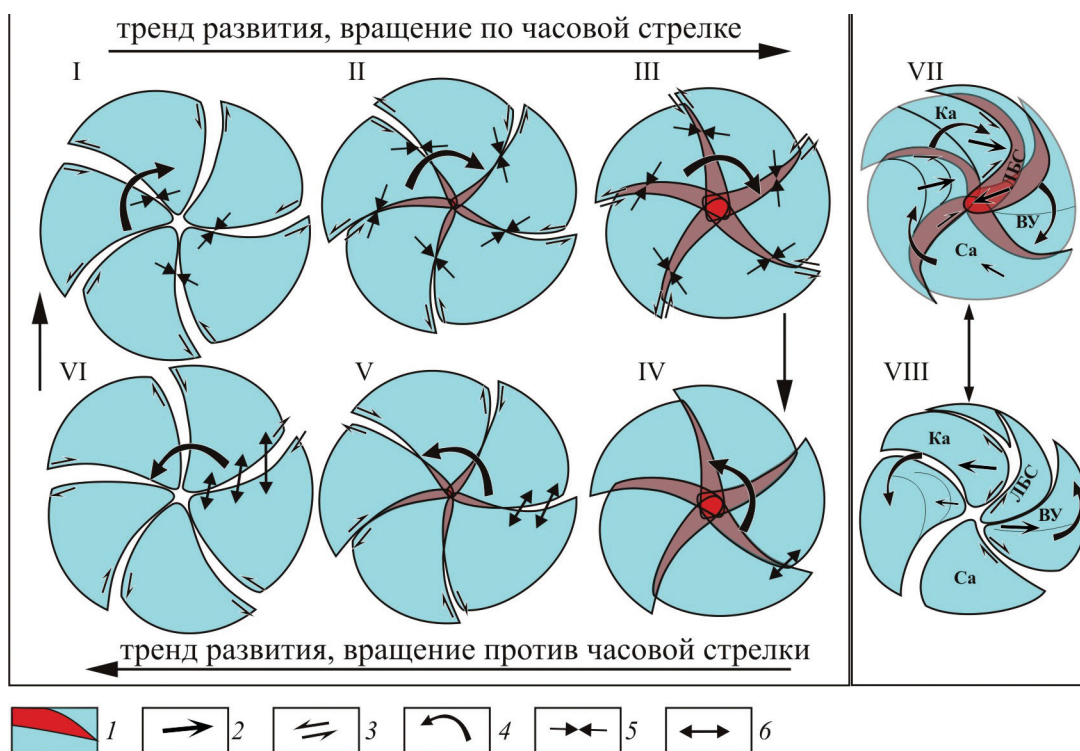


Рис. 5. Модель ирисовой диафрагмы на стадиях её закрытия (I–III) и раскрытия (IV–VI) в сопоставлении с ротационной моделью развития ВЕП в условиях транспрессии (VII) и транстенсии (VIII); 1 – пластины диафрагмы (плиты) и области их перекрытия; 2–3 – направления перемещений: 2 – горизонтально-тангенциальных, 3 – сдвиговых, 4 – ротационных; 5–6 – направления: 5 – сжатия, 6 – растяжения

Эти кинематические особенности можно объяснить процессами вращения плиты по часовой стрелке, что согласуется с рассмотренными выше палеотектоническими реконструкциями, а также проявлением внутриплитных деформаций в соответствии с моделью «ирисовой диафрагмы».

Модель «ирисовой диафрагмы», предложенная для ранних стадий развития ВЕП, может быть использована и для плитного этапа её эволюции. При вращении по часовой стрелке происходит закрытие диафрагмы и образующие её пластины, разделённые «детachmentами», испытывают перемещения вдоль концентрических и радиально-центростремительных траекторий, что сопровождается вращательными, надвиговыми и сдвиговыми смещениями пластин (рис. 5, I–III). В центре диафрагмы пластины надвигаются одна на другую, образуя область всестороннего динамического сжатия. Модель визуально объясняет процессы схождения и взаимного перекрытия крупных доменов плиты, а также проявление обстановок транспрессии в зонах нарушений, разделяющих домены. При вращении против часовой стрелки происходит раскрытие диафрагмы, а её лепестки испытывают обратные центробежные и концентрические перемещения, «детachmentы» проявляются как листрические сбросы, а между пластинами постепенно формируются клиновидные зияния – продольно асимметричные рифты (рис. 5, IV–VI). При этом в центре диафрагмы увеличивается зазор, в преде-

лах которого следует ожидать проявление нисходящих движений и компенсационных поднятий. Маятниковые колебательные движения приводят к циклическому повторению всех стадий развития модели (рис. 5, I–VI). Все её кинематические элементы находят аналогии в динамических реконструкциях ВЕП, с той разницей, что природные деформации часто имеют объёмный и более сложный характер (рис. 5, VII, VIII). Цикличность в изменении направлений вращения в реальной тектонике ВЕП находит отражение в многократных кинематических и морфологических инверсиях тектонических структур.

Выводы

1. В строении ВЕП важную роль играют долгоживущие зоны дислокаций, которые развивались начиная с палеопротерозоя вплоть до новейшего этапа развития ВЕП в пульсирующем режиме. В их этапах развития прослеживаются и периодически повторяются геодинамические обстановки, связанные с коллизионными, рифтогенными, транспрессионными и транстенсионными процессами.

2. Зоны дислокаций ВЕП организованы нелинейно: они образуют крупную вихревую мегасруктуру, характеризуются неоднородным строением и сложным сочетанием элементов тектоники сдвиговых зон и пологих detachmentов, обладают внутренней асимметрией строения и нелинейно-циклическим трендом развития.

3. Процессы знакопеременного вращения ВЕП по модели «ирисовой диафрагмы» объясняют многие закономерности развития долгоживущих тектонических зон и образованной ими вихревой мегаструктуры, выступающей в роли одного из главных элементов тектоники различных этажей платформы. Эта модель

не является универсальной и может рассматриваться лишь как один из факторов, в данном случае ротационных, в многоплановом механизме развития ВЕП.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-00485) и программы Президиума РАН №19 (проект 0135-2018-0040).

ЛИТЕРАТУРА

1. Балувев А.С., Моралев В.М. Структурный контроль и геодинамические условия внутриплитного магматизма на Восточно-Европейской платформе // Известия вузов. Геология и разведка. 2001. № 1. С. 13–30.
2. Валеев Р.Н. Тектоника Волго-Камского междуречья. М.: Недра, 1968. 117 с.
3. Гарецкий Р.Г. Особенности тектоники и геодинамики Восточно-Европейской платформы // Литасфера. 2007. № 2 (27). С. 3–13.
4. Гарецкий Р.Г., Нагорный М.А. Главные этапы развития Московской синеклизы // Литосфера. 2006. № 2. С. 14–24.
5. Горайнов С.В. Кайнозойские тектонические движения Восточной Европы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2013. № 3. С. 55–65.
6. Зыков Д.С., Колодяжный С.Ю., Балувев А.С. Признаки горизонтальной неотектонической подвижности фундамента в районе Беломорья // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2008. Т. 83. Вып. 2. С. 15–25.
7. Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т. Структурная геология юго-востока Восточно-Европейской платформы. Уфа: Гилем, 2001. 234 с.
8. Камалетдинов М.А., Степанов В.А., Жуков И.М. и др. Шарьяжно-надвиговая тектоника Волго-Уральской области. М.: Наука, 1990. 149 с.
9. Колодяжный С.Ю. Структурно-кинематическая эволюция юго-восточной части Балтийского щита в палеопротерозое. М.: ГЕОС, 2006. 332 с.
10. Колодяжный С.Ю. Структурно-кинематические парагенезы в осадках фанерозойского чехла Среднерусской зоны дислокаций // Геотектоника. 2010. № 2. С. 56–76.
11. Колодяжный С.Ю. Структурные парагенезы Владимирско-Вятской зоны дислокаций и положение Пучеж-Катунского кратера (Восточно-Европейская платформа) // Геотектоника. 2014. № 2. С. 23–41.
12. Колодяжный С.Ю. Структура и эволюция Сурско-Камской зоны сдвига в кайнозое (Волго-Уральская антеклиза Восточно-Европейской платформы) // Геотектоника. 2015. № 4. С. 30–53.
13. Колодяжный С.Ю. Структурно-кинематические условия формирования Дудергофской структуры (юго-восточная окраина Балтийского щита) // Изв. вузов. Геология и разведка. 2016. № 5. С. 8–17.
14. Колодяжный С.Ю., Балувев А.С., Терехов Е.Н. Структура и эволюция Андомского сегмента юго-восточной окраины Балтийского щита // Геотектоника. 2016. № 4. С. 48–67.
15. Колодяжный С.Ю., Зыков Д.С., Леонов М.Г. Структурно-кинематические парагенезы фундамента и чехла юго-восточной окраины Балтийского щита // Геотектоника. 2007. № 6. С. 3–22.
16. Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2005. 340 с.
17. Копп М.Л., Вержбицкий В.Е., Колесниченко А.А. и др. Кайнозойские напряжения востока Русской плиты, Южного и Среднего Урала: Методические, теоретические и прикладные аспекты / Отв. ред. Ю.Г. Леонов, М.Л. Копп. М.: ГЕОС, 2014. 88 с.
18. Кузнецов Н.Б. Кембрийская коллизия Балтики и Арктиды — начальный этап «собирания» северной части позднепалеозойско-раннемезозойской Пангеи // Бюл. МОИП, отд. геологич. 2009. Т. 84. Вып. 1. С. 18–38.
19. Милановский Е.Е. Геология СССР. Ч.1. Древние платформы и метаплатформенные области. М.: Изд-во МГУ, 1987. 416 с.
20. Пучков В.Н. Тектоника Урала. Современные представления // Геотектоника. 1997. № 4. С. 42–61.
21. Сим Л.А. Неотектонические поля напряжений Восточно-Европейской плиты и соседних структур: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: Изд-во МГУ, 1996. 41 с.
22. Структурная карта кровли верейского горизонта московского яруса среднего отдела каменноугольной системы Восточно-Европейской платформы / Гл. ред. В.В. Бронгулеев. М.: Недра, 1986.
23. Хаин В.Е. Общая геотектоника. М.: Недра, 1973. 512 с.
24. Хераскова Т.Н., Волож Ю.А., Антипов М.П., Быкадоров В.А., Сапожников Р.Б. Корреляция позднекембрийских и палеозойских событий на Восточно-Европейской платформе и в смежных палеоокеанических областях // Геотектоника. 2015. № 1. С. 31–59.
25. Assinovsky B., Ovsov M.K. Seismotectonic zoning of the Finnish-Bothnia region based on the structural analysis method // Russian journal of Earth sciences. 2014. V. 14. P. 1–12.

REFERENCES

1. Baluev A.S., Moralev V.M. Structural control and geodynamic conditions of the intraplate magmatism on the East European platform. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration] 2001, no. 1, pp. 13–30. (In Russian).
2. Valeev R.N. *Tectonics of the Volga-Kama interfluvium*. M., Nedra Publ., 1968, 117 p. (In Russian).
3. Garetsky R.G. Features of tectonics and geodynamics of the East European platform. *Lithosphere*, 2007, no. 2 (27), pp. 3–13. (In Russian).
4. Garetsky R.G., Nagornyi M.A. The main stages of development of the Moscow syncline. *Lithosphere*, 2006, no. 2, pp. 14–24. (In Russian).
5. Goryaynov S.V. Cenozoic tectonic movements of the Eastern Europe. *Geology and mineral resources of the world ocean*, 2013, no. 3, pp. 55–65. (In Russian).
6. Zikov D.S., Kolodyazhny S.Yu., Baluev A.S. Signs of horizontal neotectonic mobility of the basement in the area of the White Sea. *Bullet. of Mosc. Soc. of Naturalists*, 2008, vol. 83, no. 2, pp. 15–25. (In Russian).
7. Kazantsev Yu.V., Kazantseva T.T. *Structural geology of the south-east of the East European platform*. Ufa, Gilem Publ., 2001, 234 p. (In Russian).
8. Kamaletdinov M.A., Stepanov V.A., Zhukov I.M. *Thrust tectonics of the Volga-Ural region*. M., Nauka Publ., 1990, 149 p. (In Russian).
9. Kolodyazhny S.Yu. *Structural and kinematic evolution of the southeastern part of the Baltic shield in the Paleoproterozoic*. M., GEOS Publ., 2006, 332 p. (In Russian).
10. Kolodyazhny S.Yu. Structural and kinematic assemblies in sedimentary rocks of the Phanerozoic cover of the Mid-Russian dislocation zone. *Geotectonics*, 2010, vol. 44, no. 2, pp. 139–157. DOI: 10.1134/S0016852110020044
11. Kolodyazhny S.Yu. Structural assemblies of the Vladimir-Vyatka dislocation zone and the position of the Puchezh-Katunki crater, East European Platform. *Geotectonics*, 2014, vol. 48, no. 2, pp. 104–121. DOI: 10.1134/S0016852114020046
12. Kolodyazhny S.Yu. Structure and evolution of the Sura-Kama strike-slip zone in the Cenozoic (the Volga-Ural antecline of the East European Platform). *Geotectonics*, 2015, vol. 49, no. 4, pp. 269–290. DOI: 10.1134/S0016852115040044
13. Kolodyazhny S.Yu. Structural and kinematic conditions of the Dudergoff structure (southeastern edge of the Baltic shield). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2016, no. 5, pp. 8–17. (In Russian).

14. Kolodyazhny S.Yu., Baluev A.S., Terekhov E.N. Andoma segment of southeastern margin of Fennoscandian shield: Structure and evolution. *Geotectonics*, 2016, vol. 50, no. 4, pp. 389–406. DOI: 10.1134/S0016852116040051 (In Russian).
15. Kolodyazhny S.Yu., Zykov D.S., Leonov M.G. Structural–kinematic parageneses of the basement and cover at the southeastern margin of the Baltic shield. *Geotectonics*, 2007, vol. 41, no. 6, pp. 423–439. DOI: 10.1134/S0016852107060015 (In Russian).
16. Kopp M.L. *Mobilistic neotectonics of platforms of southeastern Europe*. M., Nauka Publ., 2005, 340 p. (In Russian).
17. Kopp M.L., Verzhbitsky V.E., Kolesnichenko A.A. et al. *Cenozoic stress field in the east of the Russian plate, Southern and Middle Urals: methodical, theoretical and applied aspects*. Ed. Yu.G. Leonov, M.L. Kopp. M., GEOS Publ., 2014, 88 p. (In Russian).
18. Kuznetsov N.B. The Cambrian collision between the Baltic and the Arctic plates: the initial stage of gathering of the Northern part of the late Paleozoic–Earlymesozoic Pangea. *Bullet. of Mosc. Soc. of Naturalists*, 2009, vol. 84, no. 1. pp. 18–38. (In Russian).
19. Milanovsky E.E. *Geology of the USSR. Part 1. Ancient platforms and metaplatform areas*. M., Moscow State University Publ., 1987, 416 p. (In Russian).
20. Puchkov V.N. Tectonics of the Urals — modern concepts. *Geotectonics*, 1997, vol. 31, no. 4, pp. 294–312.
21. Sim L.A. *Neotectonic stress fields of the East European plate and neighboring structures*. Dr. geol.-min. sci. autoref. diss. M., Moscow State University Publ., 1996, 41 p. (In Russian).
22. *Structural map of the roof of the Vereisky horizon of the Moscow stage of Middle Carboniferous system of the East European platform*. Ed. V.V. Rogulev. M., Nedra Publ., 1986. (In Russian).
23. Khain V.E. *General geotectonics*. M., Nedra Publ., 1973, 512 p. (In Russian).
24. Kheraskova T.N., Volozh Yu. A., Antipov M.P., Bykadorov V.A., and Sapozhnikov R.B. Correlation of late Precambrian and Paleozoic events in the East European Platform and the adjacent paleoceanic domains. *Geotectonics*, 2015, vol. 49, no. 1, pp. 27–52. DOI: 10.1134/S0016852115010021
25. Assinovskaya B., Ovsov M.K. Seismotectonic zoning of the Finnish–Bothnia region based on the structural analysis method. *Russian journal of Earth sciences*, 2014, vol. 14, pp. 1–12.

МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОГРАФИЯ, ЛИТОЛОГИЯ

УДК 552.5

**ОСНОВНОЙ ФАЦИАЛЬНЫЙ ЗАКОН Н.А. ГОЛОВКИНСКОГО —
ПРОБЛЕМАТИКА И НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ**

В.П. АЛЕКСЕЕВ¹, Э.О. АМОН²

*¹Уральский государственный горный университет,
30, Куйбышева ул., г. Екатеринбург 620144, Россия
e-mail: igg.lggi@ursmu.ru*

*²Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН,
123, Профсоюзная ул., г. Москва 117647, Россия
e-mail: amon@paleo.ru*

Известным российским геологом Н.А. Головкинским 150 лет назад опубликована важная научная работа, в которой было установлено явление перемещения однородных литологических слоёв по латерали («скольжение» во времени). Этим созданы важнейшие предпосылки к основному фациальному закону: слои, лежащие рядом, формировались в той же последовательности по вертикали. Закон был сформулирован несколько позже А.А. Иностранцевым, а впоследствии «переоткрыт» И. Вальтером. Идеи, заложенные Н.А. Головкинским, позднее нашли применение в изучении геологической цикличности, и в настоящее время — в бурно развивающейся сейсмической стратиграфии. Творческое развитие и продолжение теоретических положений, содержащихся в работе Н.А. Головкинского, позволило разработать метод фациально-циклического анализа, который успешно использован при изучении многих угленосных толщ, а в настоящее время применяется для безугольных отложений Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. В методическом плане они развивают понимание причинности (каузальности) и соответствуют принципам синергетического мировидения. Главное содержание этих идей остаётся актуальным в свете новых реалий познавательного процесса (нелинейная наука, эндовидение).

Ключевые слова: фация; основной фациальный закон; причинность (каузальность); цикл, секвенс.

**THE N.A. GOLOVKINSKY'S FUNDAMENTAL FACIAL LAW —
PROBLEMATICS AND NEW HORIZONS**

V.P. ALEKSEEV¹, E.O. AMON²

*¹Ural State Mining University
30, Kuibysheva street, Yekaterinburg 620144, Russia
e-mail: igg.lggi@ursmu.ru*

*²Borissiak Paleontological Institute of Russian Academy of Sciences
123, Profsoyuznaya street, Moscow 117647, Russia
e-mail: amon@paleo.ru*

Famous Russian geologist N.A. Golovkinsky published 150 years ago an important scientific work, where the phenomenon of lateral displacement (movement) of homogeneous lithological layers («slide» over time) was asserted. This created the most significant prerequisites for the fundamental facial law: the layers, lying nearby, were formed in the same sequence vertically. The law was formulated a little later by A.A. Inostrantsev, and later «rediscovered» by J. Walter. The ideas, developed by N.A. Golovkinsky, subsequently found the application in the study of geological cyclicity, and currently in the booming seismic stratigraphy. The creative improvement and continuation of theoretical positions

contained in the Golovkinsky's work allowed to advance a method of facially-cyclic analysis, which has been successfully used in the study of many coal-bearing strata, and is currently used for coal-free deposits of the West Siberian oil and gas basin. Methodically, they develop an understanding of causality and correspond to the principles of synergetic world-view. The main content of these ideas remains relevant in the light of new realities of cognitive process (nonlinear science, endovision).

Key words: facies; Golovkinsky's facial law; causality; cycle; sequence.

Краткая история

В истории литологии XIX в. был ознаменован двумя крупными событиями теоретического и научно-методического характера. Первое — это введение в круг научных представлений идеи и понятия «фация», сделанное на рубеже 1830—1840-х гг. швейцарским геологом А. Грессли (A. Gressly). Второе заключалось в установлении закономерного смещения («скольжения») границ литологически однородных слоёв во времени, что получило название основного фациального закона. Приоритет в его открытии в 1868 г. принадлежит Николаю Алексеевичу Головкинскому, который был знаком

с работами А. Грессли и первым из российских геологов использовал представления о фациях в своих исследованиях. Однако основному труду самого Н.А. Головкинского — его докторской диссертации, защищенной 20 декабря 1868 г. [4] — выпала сложная судьба. Российские современники не поняли и не приняли основных идей, изложенных в работе, увидев в них нарушение принципа Н. Стенона. Главным оппонентом выступил видный российский геолог А.А. Иностранцев, представивший в 1872 г. отличающуюся схему процесса осадконакопления. В конечном итоге показанные Н.А. Головкинским и А.А. Иностранцевым результаты через четверть века в 1893 г. были «переоткрыты» не-

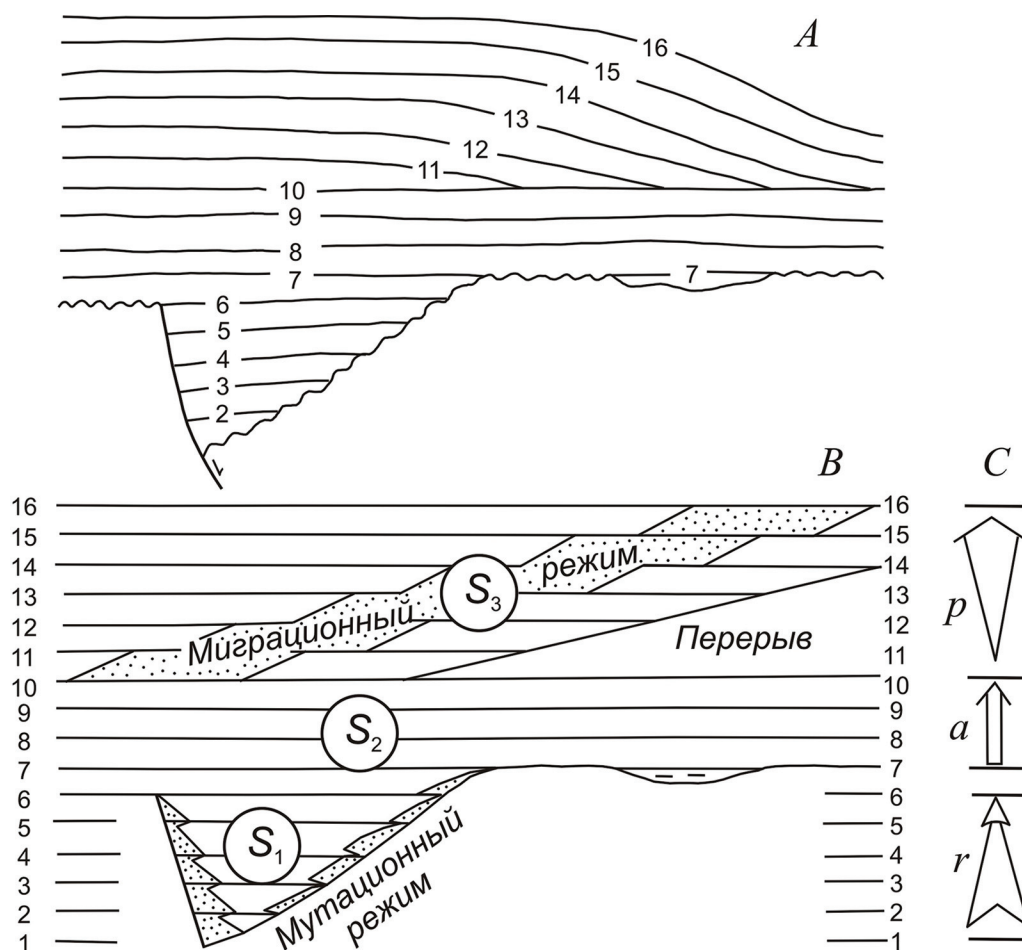


Рис. 1. Принципиальная схема основных режимов осадконакопления: А — реальный разрез; В — хроностратиграфическая развертка; С — направленность смены основных типов терригенных пород; для В: 1–5 — заполнение грабена скоростными осадками (S_1); 6–7 — перестройка тектонического режима; 7–10 — широкое развитие полнокомпенсированных и недокомпенсированных осадков (S_2); 10–16 — проградация преимущественно дельтовых осадков (S_3), с формированием перерыва (10–14); для С: r — ретроградация, a — агградация, p — проградация

мецким геологом И. Вальтером (J. Walter). Благодаря европейской известности труда И. Вальтера, основной фациальный закон получил его имя и широко известную формулировку: *фациальные разновидности осадочной породы любого бассейна седиментации смещаются по стратиграфической вертикали в том же порядке, как и по горизонтали*.

Добротная, но в практическом отношении достаточна «ординарная» работа Н.А. Головкинского оказалась вне поля внимания отечественных геологов долгие 80 лет. Лишь в конце 1940-х гг. научно-методическое значение высказанных в ней идей получило должную оценку, чему в немалой степени способствовал полузабытый к настоящему времени период энергичной «борьбы с космополитизмом». Начиная с этого времени, монографии Н.А. Головкинского уделяется надлежащее и заслуженное внимание.

Изложенные в монографии идеи и представления позднее были рассмотрены и проанализированы большим числом отечественных специалистов, среди работ которых особенно выделяются блестящие труды С.И. Романовского, посвящённые как деятельности Н.А. Головкинского в целом, так и полученным им результатам [10]. Основным достижением С.И. Романовского, по мнению авторов настоящей статьи, явился показ непротиворечивости представлений Н.А. Головкинского и А.А. Иностранцева: первые относятся к *миграционному*, а вторые — к *мутационному* типам слоенакопления (названия типов предложены Н.Б. Вассоевичем в 1948 г.) (рис. 1).

К настоящему времени увидело свет немалое число публикаций, приуроченных к юбилейным датам, связанным как с годами и периодами жизни и деятельности Н.А. Головкинского, так и годом издания его основной работы. Свою задачу авторы настоящей статьи видят не в очередном детальном рассмотрении монографии Н.А. Головкинского (это исчерпывающе выполнено С.И. Романовским), и не в её повторной оценке в связи с круглой датой — 150 лет со дня выхода в свет. В представленной статье сделана попытка подвергнуть анализу значение этого труда в ракурсе эволюции [1] и в трёх временных измерениях — прошлом, настоящем и будущем.

Взгляд в прошлое

С.И. Романовский, анализируя творческое наследие Н.А. Головкинского, тонко и точно отметил аспект, важный для всех геологических работ, содержащих элементы научно-методической новизны: «Результаты научных исследований, сколь бы значительны они ни были, неизбежно отстают перед новыми достижениями региональной геологии. ... Поэтому именно творцы теоретических идей навсегда входят в историю науки, а их регио-

нальные работы, которые имеются в избытке практически у любого геолога, с течением времени полностью утрачивают своё значение» [10, с. 6]. Действительно, для познания геологического строения собственно пермских отложений Камско-Волжского бассейна исследования Н.А. Головкинского ныне представляют всего лишь архивно-исторический интерес. Принципиально иначе обстоит дело с теоретическими построениями, выполненными в его работе. Проиллюстрируем их значимость двумя примерами, относящимися к прошедшему времени и имеющими: 1) общенаучный и 2) конкретно-геологический характер.

1. В 1959 г., через 90 лет после выхода в свет книги Н.А. Головкинского, аргентинский философ и физик М. Бунге опубликовал подробное исследование о роли и месте принципа причинности (*каузальности*) в науке, вскоре переведённое на русский язык [3]. Рассуждая о понятийной и терминологической путанице, сопровождающей этот принцип, Бунге предложил различать *акаузализм*, предусматривающий отсутствие причинных связей; *полукаузализм*, согласно которому причинность является лишь одной из возможных категорий соотношений, и собственно *каузализм*, представляющий жёстко детерминированное соотношение между изучаемыми событиями или явлениями. Два последних могут рассматриваться в трёх вариантах: *а*) простая причинная связь (действие — отклик); *б*) принцип или общий закон причинности; *с*) всеобщая доктрина, имеющая отчётливо детерминистский характер. Не вдаваясь в детальное обсуждение, укажем, что основной фациальный закон, следующий из работы Н.А. Головкинского, можно считать эталоном «геологического полукаузализма», реализующимся по варианту «*б*»: взаимодействию зон слоенакопления по вертикали и латерали. Повсеместно наблюдаемая в литологии нестрогость посылок и следствий, которую можно пояснить известным определением «явление шире закона», не позволяет отнести её к наукам, функционирующим по принципу «*с*». В то же время установленные Н.А. Головкинским закономерности сложнее «простой» причинности вида «*а*».

Дополнительной проверкой правильности фациальных (иными словами генетических) построений Н.А. Головкинского служит выделение М. Бунге «генетического принципа», уходящего своими корнями в представления античности. Будучи совместим с полукаузализмом в полном его понимании, данный принцип определяет: «... все может быть результатом процесса и в свою очередь может порождать другие явления, даже не закономерным путём» [3, с. 39]. У Н.А. Головкинского такая «незакономерность» представлена «зубчатым сцеплением слоев», фиксирующим фациальные контакты. В геологии и литологии генетический принцип субъективируется, и особенно значим для геологи-

ческих реконструкций в свете продолжающегося противопоставления генетического и агенетического (структурно-вещественного) подходов [1].

2. Н.А. Головкинский в своей работе, по сути, остановился «в полушаге» от установления принципа цикличности в литологии. Более того, по мнению С.И. Романовского, высказанному в 1985 г., «геологическая чечевица» Н.А. Головкинского является единственной моделью циклов миграционного типа. (Образное название «чечевица» использовано Н.А. Головкинским для характеристики последовательности слоёв, имеющих отчётливо уплощённый облик по периферии и схожих с «оболочкой чечевичного зерна, одевающей ядро» [4, с. 119].) Отметим, что этот недостающий «полушаг» сделал Ю.А. Жемчужников, высказав в докладе на Геологическом угольном совещании, состоявшемся в апреле 1944 г., ёмкий лозунг: «Геологу надо мыслить циклами» [6].

Современные представления

Исследования Н.А. Головкинского высветили круг проблем, вызывающих непреходящий интерес у геологической общественности. Отметим всего два аспекта, относящиеся как к 1) общенаучной, так и 2) собственно геологической проблематике.

1. Н.А. Головкинский явно отдавал себе отчёт в том, что изложенные им идеи, как минимум, не тривиальны и идут против устоявшихся воззрений и стандартов. Сформулировав тезис: «*общепринятое убеждение в последовательности образования последовательно друг на друге налегающих слоев — не верно*» [4, с. 125; курсив автора], он здесь же оговорился, что этот тезис «**повидимому, парадоксальный**» [Там же; сохранена орфография автора]. Этим важным замечанием он, с высокой научной честностью, отдал дань такому явлению, которое в настоящее время получило название «трудная проблема сознания» Д. Чалмерса [11]. Трудность проблемы состоит в признании, понимании и/или объяснении «субъективной реальности» или «субъективного опыта». В

определённой степени это перекликается с «генетическим принципом», о котором шла речь выше. В наиболее отчётливом, очищенном виде проблема субъективной реальности относится к понятию «фация», до сих пор остающимся одним из самых «запутанных» и субъективизированных в геологии. Общетеоретический подход к решению подобных сложных вопросов предложен Д.И. Дубровским [5], а его интерпретация для фациальных исследований, развиваемая нами, показана в таблице.

Из изложенного несложно увидеть, что в соответствии с «дополнительным соглашением», обозначенным в таблице, причинная (каузальная) латеральная связь между слоями разного генезиса, осторожно названная Н.А. Головкинским «парадоксальной», вполне включается в современные методологические представления, имеющие большое значение, в том числе и для создания искусственного интеллекта.

2. Творческое развитие и продолжение идей, заложенных в работе Н.А. Головкинского, позволило Ю.А. Жемчужникову разработать метод фациально-циклического анализа, который успешно использован при изучении многих угленосных толщ, а в настоящее время применяется для безугольных отложений Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна [1].

Наиболее важным представляется то, что в работе Н.А. Головкинского предвосхищено основное содержание сейсмической стратиграфии: по образному высказыванию Н.Г. Нургалиевой, им заложены «проэлементы геометрии секвенсов» [7]. «Чечевица» Н.А. Головкинского имеет отчётливо выраженный трансгрессивно-регрессивный характер, т. е. соответствует сочетанию ретроградации и проградации в смене слоёв, в современном понимании данных процессов [8]. Такой характер цикла полностью соответствует секвенсу (sequence) — относительно согласно залегающей последовательности генетически связанных пластов, ограниченных несогласиями или соответствующими им согласными границами.

Преломление «трудной проблемы сознания» в фациальном анализе

Информационный подход [5, с дополнениями]		Фациальный анализ как база основного фациального закона
Исходные посылки	1) информация необходимо воплощена в своем материальном, физическом носителе (не существует вне и помимо него)	Порода — как физический носитель; обстановка — как образное восприятие (фация = осадок + условия)
	2) информация инвариантна по отношению к физическим свойствам своего носителя	Разные воплощения фации (литофации, сейсмифации и прочее) предназначены для создания модели геологического объекта
Дополнительное соглашение	Явление субъективной реальности может интерпретироваться как информация (ментальная каузальность)	Информация о явлении <i>A</i> , реализованная в носителе <i>X</i> , реализуется в виде кодовой связи, фиксирующей взаимоднозначное соответствие <i>A</i> и <i>X</i>

Перспективы

Охарактеризованные выше положения могут быть рассмотрены и в перспективном видении, вновь с использованием бинарного подхода: 1) с общетеоретической и 2) конкретно-геологической составляющими.

1. «Генетический принцип» М. Бунге, дополненный «трудной проблемой сознания» Д. Чалмерса, находит решение в рамках нелинейной науки. В соответствии с постулатами НБИКС (NBICS)-конвергенции¹ **«Информационная причинность — особый тип каузальности, характерный для самоорганизующихся систем... Она определяется принципом инвариантности информации по отношению к физическим свойствам ее носителя»** [5, с. 31; выделено автором]. В полной мере это относится к эндолитологии, или «литологии изнутри» [1].

На рис. 2 приведена схематическая иллюстрация моделей взаимодействия субъекта (наблюдателя) и окружающего мира, показывающая смену представлений перехода от «объектного» изучения природы в рамках классической парадигмы к осознанию нелинейности протекающих процессов и «вмонтированности» субъекта в процесс познания окружающего мира. Применительно к оценке труда Н.А. Головкинского это означает, что установленные им закономерности связаны с истинным пониманием «фации» (Facies), как специфического *интерфейса*² между наблюдателем и геологическим прошлым (рис. 2, d).

2. В развитие начатых выше рассуждений о сейсмической стратиграфии укажем, что длительное время реконструкции осадочных последовательностей по сути ограничивались двумя регламентированными типами (I и II), различающимися по

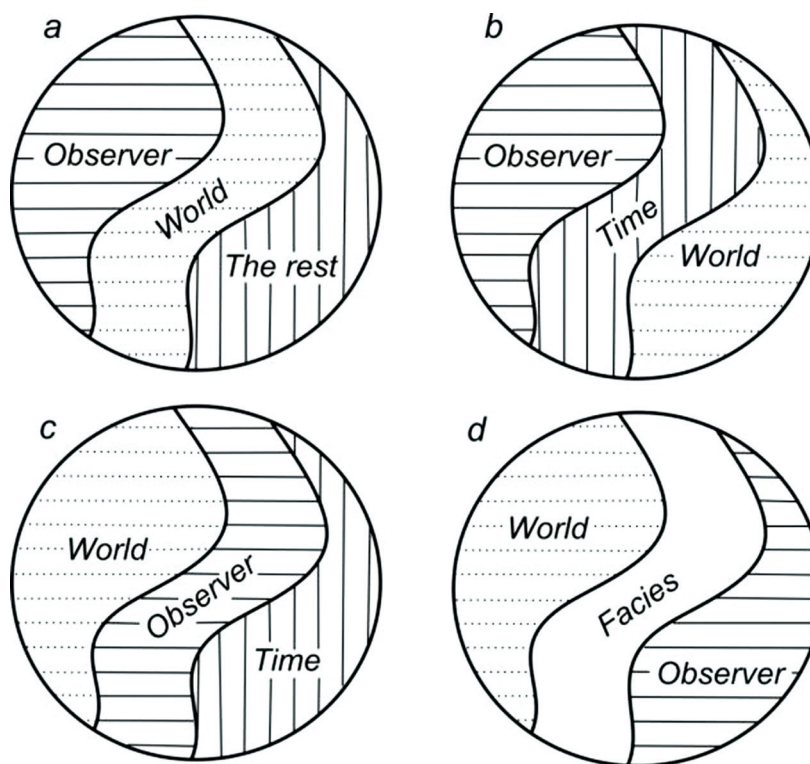


Рис. 2. Модели, отражающие взаимоотношения субъекта или наблюдателя (Observer); объекта или окружающего мира (World); непознанного (The rest) и времени (Time): a — представления О. Рёсслера [10], предложившего «взгляд изнутри» на окружающий мир; b — представления И. Пригожина о «порядке из хаоса», послужившие основой для создания «нелинейной науки» (nonlinear science) [7]; c — эндолитологический подход или «литология изнутри» при «безразмерности» геологического времени; d — фация (Facies) как интерфейс, в диапазоне «стрелы времени» от 0 (при униформистском подходе) до квазибесконечности

¹НБИКС (NBICS)-конвергенция — современное направление в фундаментальной науке, характеризующееся междисциплинарными связями областей знания (нано-, био-, инфо-, когно-, социо-). Науки о Земле находятся «на обочине» этих исследований, но использование таких базовых представлений, как основной фациальный закон, позволяет надеяться на «рынок» в их включении в общий тренд [1].

²Интерфейс (лат. inter — между + face — поверхность) — в рассматриваемом контексте не имеющая осознания «толщины» перегородка между какими-то сущностями (в эндофизике (см. рис. 2, a) — наблюдателем и окружающим миром). Для фациального анализа (см. рис. 2, d) в интерфейс «сжимается» геологическое время, что позволяет использовать принцип актуализма.

ОСАДОЧНЫЕ СЕКВЕНСЫ

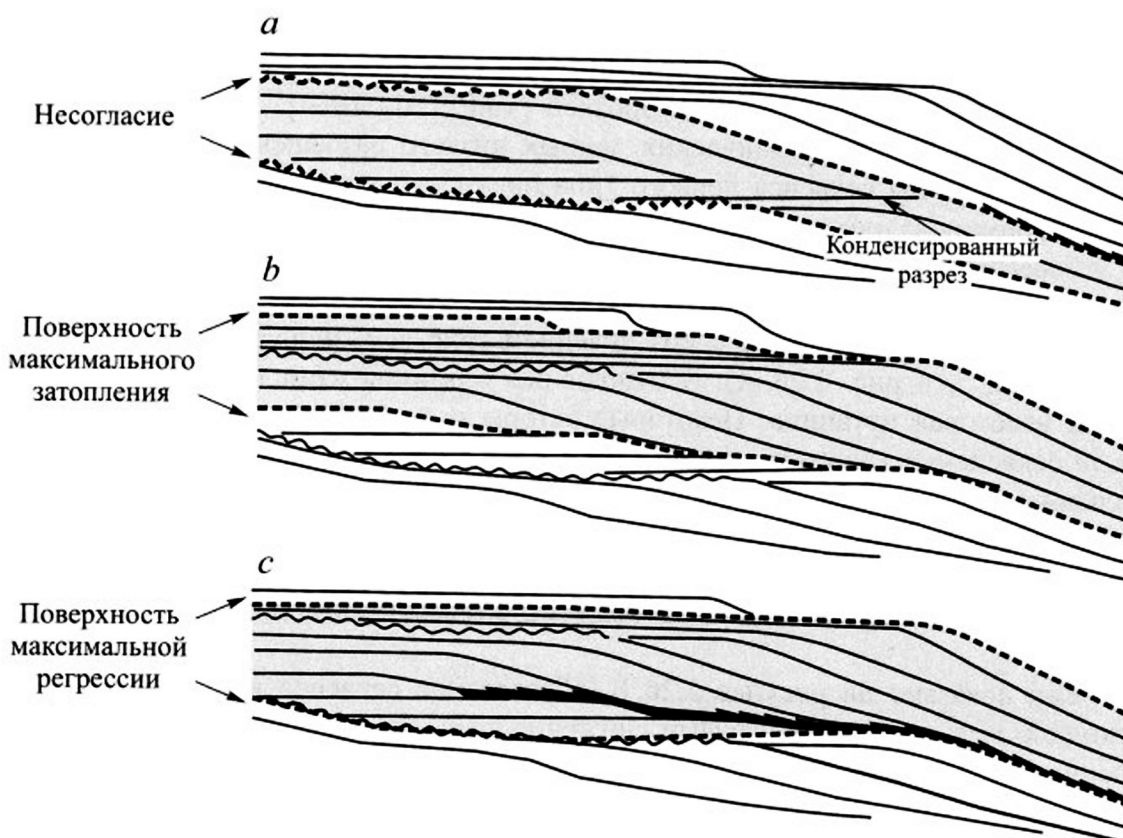


Рис. 3. Схематическое изображение различных определений секвенсы или осадочной последовательности [8, с. 59]: *a* — ограничение несогласиями или коррелятивными им согласными залеганиями; *b* — ограничение поверхностями максимального затопления; *c* — ограничение поверхностями максимальной регрессии

интенсивности эвстатических колебаний уровня моря и соответственно латеральному смещению зон седиментации [6].

Однако жёстко детерминированное выделение секвенсов как последовательностей слоёв, ограниченных несогласиями или коррелятивными им согласными, в последнее время подвергается существенному пересмотру [2, 8]. На рис. 3 продемонстрированы три различных подхода к их установлению. Верхний (*a*) является «классическим» и строго детерминированным, именно он в наибольшей степени соответствует «чечевице Н.А. Головкинского». Несложно заметить, что выделяемые при этом последовательности с неизбежным постоянством будут «скользить» по разрезу в силу диахронности своих границ — несогласий. В меньшей степени такое скольжение будет присуще границам последовательностей при варианте *c*, и в минимальной — для варианта *b*, когда границами служат поверхности максимального затопления.

Вариант *b* на рис. 3 используется для построения в рамках генетической стратиграфии, ориентирующейся на установление изохронных границ [2]. С позиций фациально-циклического анализа

он является наиболее предпочтительным при корреляции сложнопостроенных осадочных толщ, что представляет непреходяще важную задачу при изучении нефтегазоносных толщ. Дополним, что ещё большую актуальность эти исследования приобретают при разработке трудноизвлекаемых ресурсов (запасов) углеводородов.

Заключение

Сопоставление представлений полуторавековой давности и сегодняшних реалий показывает, что первые не утратили своей актуальности. По нашему мнению, одним из основных направлений в дальнейшем развитии идей, заложенных в работе Н.А. Головкинского, является их «наложение» на понимание нелинейности геологических процессов. Несомненно, что нелинейность (nonlinearity) органически присуща многим каузальным связям [3], хотя многими исследователями она принималась и принимается на интуитивном уровне. В целом же 2018-й год вполне можно считать «годом Головкинского» в российской литологии/седиментологии, да, пожалуй, и не только в ней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.П., Амон Э.О. Седиментологические основы эндолитологии. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. 476 с.
2. Бижу-Дюваль Б. Седиментационная геология: пер. с англ. М.-Ижевск: ИКИ, 2012. 704 с.
3. Бунге М. Причинность: Место принципа причинности в современной науке: пер. с англ. Изд. 2-е. М.: Едиториал УРСС, 2010. 512 с.
4. Головкинский Н.А. О пермской формации в центральной части Камско-Волжского бассейна. СПб., 1868. 143 с.
5. Дубровский Д.И. Субъективная реальность, мозг и развитие НБИК-конвергенции: эпистемологические проблемы // Искусственный интеллект: философия, методология, инновации. М.: Радио и связь, 2013. С. 25–37.
6. Жемчужников Ю.А. Цикличность строения угленосных толщ, периодичность осадконакопления и методы их изучения // Труды ИГН АН СССР. Вып. 90. Угольная серия (№ 2). 1947. С. 7–18.
7. Нурғалиева Н.Г. Основы формационного анализа нефтегазоносных толщ. Казань: Казанский ун-т, 2016. 150 с.
8. Позаментьер Г.В., Аллен Дж.П. Секвентная стратиграфия терригенных отложений. Основные принципы и применение: пер. с англ. М.-Ижевск: ИКИ, 2014. 436 с.
9. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой: пер. с англ. М.: Прогресс, 1986. 432 с.
10. Романовский С.И. Николай Алексеевич Головкинский (1834–1897). Л.: Наука, 1979. 192 с.
11. Чалмерс Д. Сознательный ум. В поисках фундаментальной теории: пер. с англ. М.: Изд-во УРСС, 2015. 512 с.
12. Rössler O.E. Endophysics: The World as Interface. Singapore: World Scientific. 1998. 204 p.

REFERENCES

1. Alekseev V.P., Amon E.O. *Sedimentological fundamentals of endolithology*. Ekaterinburg, URSMU Publ., 2017, 476 p. (In Russian).
2. Biju-Duval B. *Sedimentary Geology: Eng. transl.* M.-Izhevsk, IKI Publ., 2012, 704 p. (In Russian).
3. Bunge M. Causality. *The Place of the Causal Principle in Modern Science: Eng. transl. 2nd edition*. M., Editorial URSS Publ., 2010, 512 p. (In Russian).
4. Golovkinsky N.A. *On Permian formation in central part of Kama-Volga basin*. Saint-Petersburg, 1868, 143 p. (In Russian).
5. Dubrovsky D.I. Subjective reality, the brain and the development of NBIC-convergence: epistemological problems. *Artificial intelligence: philosophy, methodology, innovation*. M., Radio and communication Publ., 2013, pp. 25–37. (In Russian).
6. Zhemchuzhnikov Yu.A. Cyclic structure of coal-bearing strata, periodicity of sedimentation and methods of their study. *Trudy IGAN AN SSSR [Proceedings of Institute of Geological Sciences of the Acad. Sci. of USSR]*, 1947, vol. 90, coal series (no. 2), pp. 7–18. (In Russian).
7. Nurgalieva N.G. *Basics of the formational analysis of oil and gas bearing strata*. Kazan, Kazan Univ. Publ., 2016, 150 p. (In Russian).
8. Posamentier H.W., Allen G.P. *Siliciclastic Sequence stratigraphy: Eng. transl.* M.-Izhevsk, IKI Publ., 2014, 436 p. (In Russian).
9. Prigogine I., Stengers I. *Order Out of Chaos (Radical Thinkers): Eng. transl.* M., Progress Publ., 1986, 432 p. (In Russian).
10. Romanovsky S.I. *Nikolaj Alekseevich Golovkinsky (1834–1897)*. L., Nauka Publ., 1979, 192 p. (In Russian).
11. Chalmers D.J. *The Conscious Mind In Search of a Fundamental Theory: Eng. transl.* M., URSS Publ., 2015, 432 p. (In Russian).
12. Rössler O.E. *Endophysics: The World as Interface*. Singapore, World Scientific, 1998, 204 p.

УДК 548.58:549.211

МОРФОЛОГИЯ АЛМАЗОВ, РАСТВОРЁННЫХ В РАСПЛАВЕ Fe-S ПРИ РАЗНОМ СОДЕРЖАНИИ СЕРЫ

В.М. СОНИН¹, И.А. ГРЯЗНОВ², Е.И. ЖИМУЛЕВ¹, А.И. ЧЕПУРОВ¹

¹Институт геологии и минералогии СО РАН
3, проспект Академика Коптюга, г. Новосибирск 630090, Россия
e-mail: sonin@igm.nsc.ru

²Новосибирский государственный университет,
1, Пирогова ул., г. Новосибирск 630090, Россия
e-mail: gryaznov_9@mail.ru

Проведено экспериментальное исследование процесса растворения алмазов в серосодержащем расплаве железа с разным содержанием серы (10, 15, 20, 25, 30 мас. %) при 3,5 ГПа и 1400°C. Полученные результаты свидетельствуют, что при реализованных условиях плоскогранные кристаллы алмаза октаэдрического габитуса преобразуются в кривогранную форму октаэдроидов с морфологическими характеристиками, подобными природным алмазам из кимберлитов. Сделан вывод, что металл-сульфидные расплавы, учитывая их относительно низкие температуры плавления, могли влиять на сохранность алмазов в мантии. Присутствие серы уменьшает растворимость углерода и при составах расплава Fe-S, близких к эвтектическому (25 и 30 мас. %), она стремится к нулю, т. е. присутствие серы благоприятно сказывается на устойчивости алмазов.

Ключевые слова: алмаз; морфология; высокое давление; металл-сульфидный расплав; растворение кристаллов.

MORPHOLOGY OF DIAMONDS DISSOLVED IN THE Fe-S MELT AT DIFFERENT SULFUR CONTENTS

V.M. SONIN¹, I.A. GRYAZNOV², E.I. ZHIMULEV¹, A.I. CHEPUROV¹

¹*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
3, Prospekt Akademika Koptuyga, Novosibirsk 630090, Russia
e-mail: sonin@igm.nsc.ru*

²*Novosibirsk State University,
1, Pirogova street, Novosibirsk 630090, Russia
e-mail: gryaznov_9@mail.ru*

An experimental study of the process of the dissolution of diamonds in a sulfur-containing iron melt with different contents of sulfur (10, 15, 20, 25, 30 wt. %) at 3,5 GPa and 1400°C has been carried out. The obtained results indicate that under the realized conditions, the plane-faced diamond crystals of octahedral habit are transformed into a curved octahedroid shape with morphological characteristics similar to natural diamonds from kimberlites. It has been concluded that metal-sulphide melts, given their relatively low melting points, could affect the safety of diamonds in the mantle. The presence of sulfur reduces the solubility of carbon and tends to zero in the Fe-S melt compositions close to eutectic (25 and 30 wt. %). That is, the presence of sulfur has a favorable effect on the stability of diamonds.

Key words: diamonds; morphology; high pressure; metal-sulphide melt; dissolution of crystals.

Принято считать, что морфология природного алмаза характеризуется большим разнообразием [1, 2, 4, 11–13]. Тем не менее морфология алмазов, например, из кимберлитов, характеризуется всего тремя эволюционными трендами, которые связаны с процессами растворения кристаллов [16]. Это определяется тем обстоятельством, что именно процессы растворения влияли на морфологию алмазов при их выносе из мантии Земли. Флюидонасыщенная кимберлитовая магма является активной реакционной средой по отношению к кристаллам алмаза: в ней они могут окисляться с относительно значительной скоростью. Этот факт подтверждён методом экспериментального моделирования [17, 18, 23, 26, 28, 29]. При выносе алмазов кимберлитовой магмой эволюция морфологии кристаллов происходит с образованием полуокруглых и округлых алмазов, кристаллографически являющихся тетрагексаэдрами, хотя в отечественной научной литературе их называют ромбодекаэдрами или просто додекаэдрами. «Псевдограницы» ромбодекаэдра преломлены как по длинной, так и по короткой диагонали «гранным швом» [12]. Данная форма (тетрагексаэдр) образуется при растворении, например, плоскогранного октаэдра посредством дитригональных слоёв травления, что и ведёт к появлению гранного шва. Растворение посредством дитригональных слоёв реализуется в силикатных системах в присутствии воды [14].

С другой стороны, в кимберлитах часто встречаются ламинарные октаэдры (октаэдрониды) алмаза, представляющие собой индивиды с тригональной, т. е. строго параллельной ребрам кристаллов штриховкой. Такие формы алмаза могут образовываться

как при росте, так и при растворении кристаллов. Возможность их появления в «сухих» силикатных расплавах в результате растворения показана экспериментально [15, 21].

Недавно октаэдрониды алмаза получены нами при растворении плоскогранных октаэдров в серо-содержащем расплаве железа при высоких P – T параметрах [8], при этом скорость растворения (опыты проведены при содержании серы 20 мас. %) много выше в сравнении с силикатными системами [19]. Поэтому актуальной становится задача установления возможной роли металл-сульфидных систем в кристаллизации и устойчивости природных алмазов в восстановленной мантии Земли [27, 30].

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по исследованию морфологической эволюции плоскогранных октаэдрических кристаллов алмаза при растворении в расплаве Fe-S при высоких P – T параметрах в зависимости от содержания серы.

Методика

Эксперименты проводили на беспрессовом многопуансонном аппарате типа «разрезная сфера» (БАРС) в твердофазной ячейке высокого давления, изготовленной из прессованных порошков тугоплавких оксидов ZrO_2 , CaO , MgO , с цилиндрическим графитовым нагревателем по методике, описанной в [9, 19]. Для растворения использовали плоскогранные и остросереберные кристаллы алмаза октаэдрического габитуса, выращенные в системе Fe-Ni-C на затравку при высоких P – T параметрах [22]. Выбор синтетических кристаллов обусловлен отсутствием на них морфологических скульптур,

характерных для природных алмазов (рис. 1). Кристалл № 1 — октаэдр с второстепенными гранками куба весом 7,60 мг. Кристалл № 2 — октаэдр с второстепенными гранками куба и тетрагон-три-октаэдра весом 5,71 мг. Кристалл № 3 — октаэдр с второстепенными гранками куба весом 7,28 мг.

Растворение алмазов осуществляли в расплаве Fe-S при разном содержании серы: 10, 15, 20, 25, 30 мас. %. Общая масса растворителя составляла 1200 мг. Алмазы (1 кристалл в опыт) помещали в порошкообразную смесь из компонентов раство-

рителя и опрессовывали в специальной прессформе. Использовали железо, полученное карбонильным способом, и молекулярную серу. Параметры экспериментов: P 3,5 ГПа, T 1400°C, t 60 мин. Охлаждение образцов осуществляли закалкой.

После экспериментов для выделения алмазов образцы растворяли в смеси кислот HCl и HNO₃. Затем кристаллы очищали в окислительной смеси (раствор K₂Cr₂O₇ в концентрированной кислоте H₂SO₄). После очистки кристаллы изучали с помощью оптического микроскопа МБС-10 с фотоприставкой и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Jeol JSM-6510LV в ЦКП ИГМ СО РАН во вторичных электронах. Взвешивание кристаллов алмаза проводили на весах ВЛР-20 с точностью $\pm 0,02$ мг, а компонентов растворителя — на весах ACCULAB VIC-200 с точностью ± 5 мг. Гониометрическое изучение кристаллов алмаза выполняли фотометодом в цилиндрической камере. Кристалл на юстировочной головке в фотокамере устанавливали таким образом, чтобы одна из осей кристалла L_4 совпадала с осью фотокамеры. При освещении кристалла параллельным пучком света на фотобумаге, расположенной на цилиндрической поверхности камеры, фиксировались рефлексy — отражения от поверхности кристалла, т. е. фотограмма кристалла.

Результаты и обсуждение

Как указывалось выше в исследовании по растворению алмазов в расплаве Fe-S, проведённом в [8, 19], нами использовался растворитель с содержанием серы 20 мас. %. Поэтому в настоящем исследовании первый эксперимент проведён с аналогичным составом. Вес кристалла алмаза № 1 в результате растворения уменьшился на 1,04 мг или на 13,7%. На кристалле сохранились грани октаэдра и куба (рис. 2). На гранях {111} появились треугольные ямки травления в обратной ориентировке относительно контуров граней (так называемые отрицательные тригоны), а вдоль рёбер — параллельная им штриховка. Кроме того, на гранях октаэдра у рёбер, смежных с гранями куба, проявился так называемый лесенковидный узор, по терминологии З.В. Бартошинского [2] (зубчатая скульптура по терминологии Ю.Л. Орлова [13]), представляющий скульптуру в виде серий ступенек с заметным наклоном к граням {100}. При относительно большом наклоне лесенковидный узор преобразуется в копьевидные выступы [2] — бугорки с острыми вершинками, направленными перпендикулярно рёбрам с кубическими гранями (рис. 2). На кристалле также проявились вогнутые участки поверхности на месте рёбер, как между гранями октаэдра, так и между смежными гранями октаэдра и куба. Данная особенность морфологии характерна в основном для синтетических алмазов и является

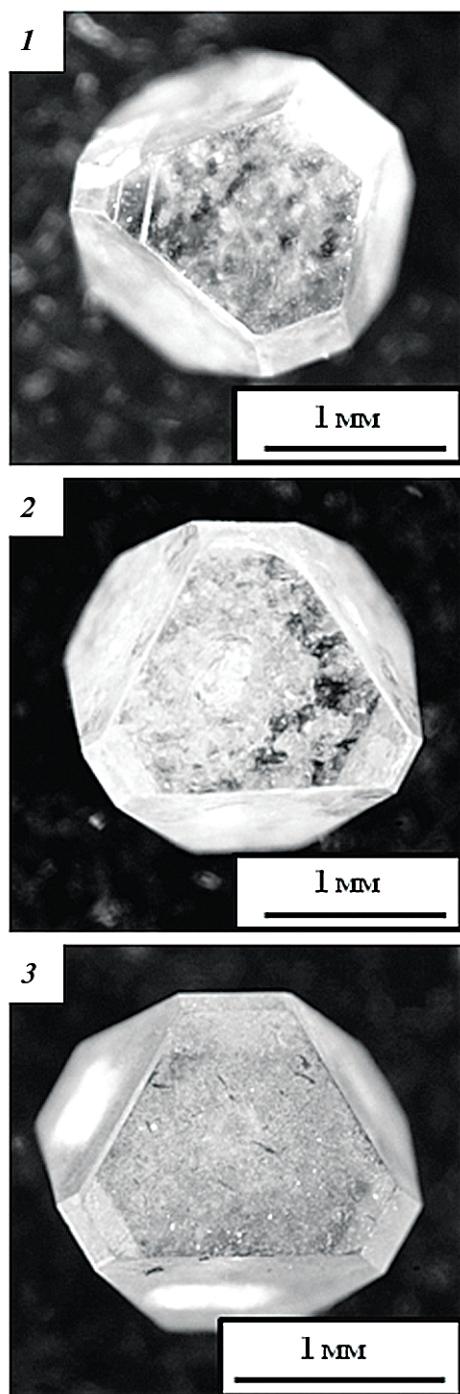


Рис. 1. Исходный вид кристаллов алмаза, использовавшихся в экспериментах

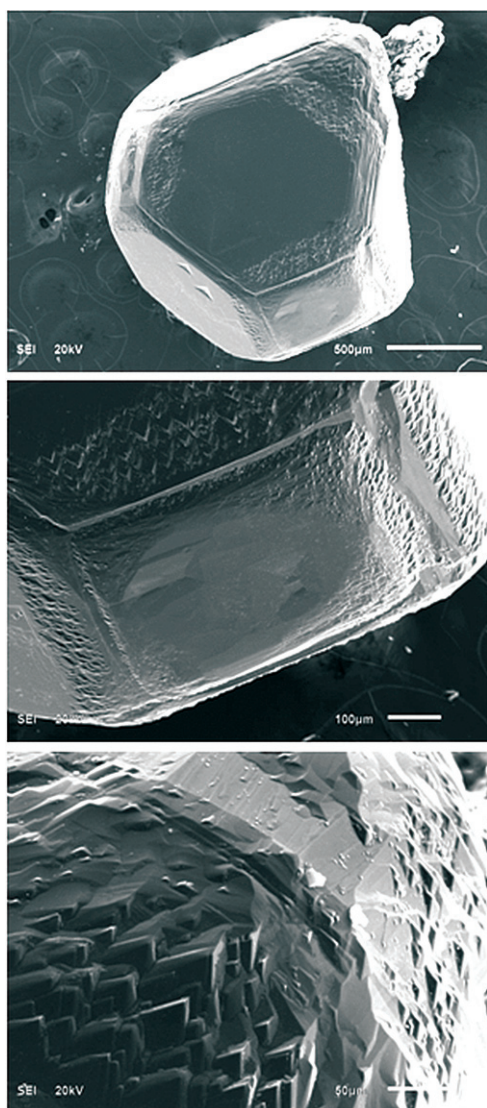


Рис. 2. Кристалл № 1 после растворения в расплаве Fe-S при 3,5 ГПа и 1400°C (общий вид и фрагменты поверхности)

следствием наличия секторов роста как октаэдра, так и куба, границы между которыми — наиболее дефектные места во внутренней структуре кристаллов, поэтому эти участки испытывают преимущественное травление [7].

В экспериментах с содержанием серы 30 мас. % (кристалл № 2) и 25 мас. % (кристалл № 3) вес кристаллов не изменилась, но на кристалле № 3 появились мельчайшие ямки травления — отрицательные тригоны. Поэтому оба алмаза подвергли повторному растворению.

Кристалл № 2 испытал интенсивное растворение при содержании серы 15 мас. % в расплаве (рис. 3). Вес алмаза после опыта составил 2,62 мг, т. е. он уменьшился на 3,09 мг или 54,11%. Морфология кристалла изменилась кардинально. Появились обширные поверхности растворения, по своему положению близкие к плоскостям ромбодекаэдра. Но поверхности растворения криво-гран-

ные, основные их микроморфологические элементы — шестоватая скульптура, причем торцы «шестиков» огранены поверхностями, визуальными близкими к плоскостям $\{111\}$. Шестоватая скульптура параллельна направлению $\langle 100 \rangle$. Сохранились реликты исходных граней $\{111\}$, которые распались на несколько фрагментов, благодаря чему

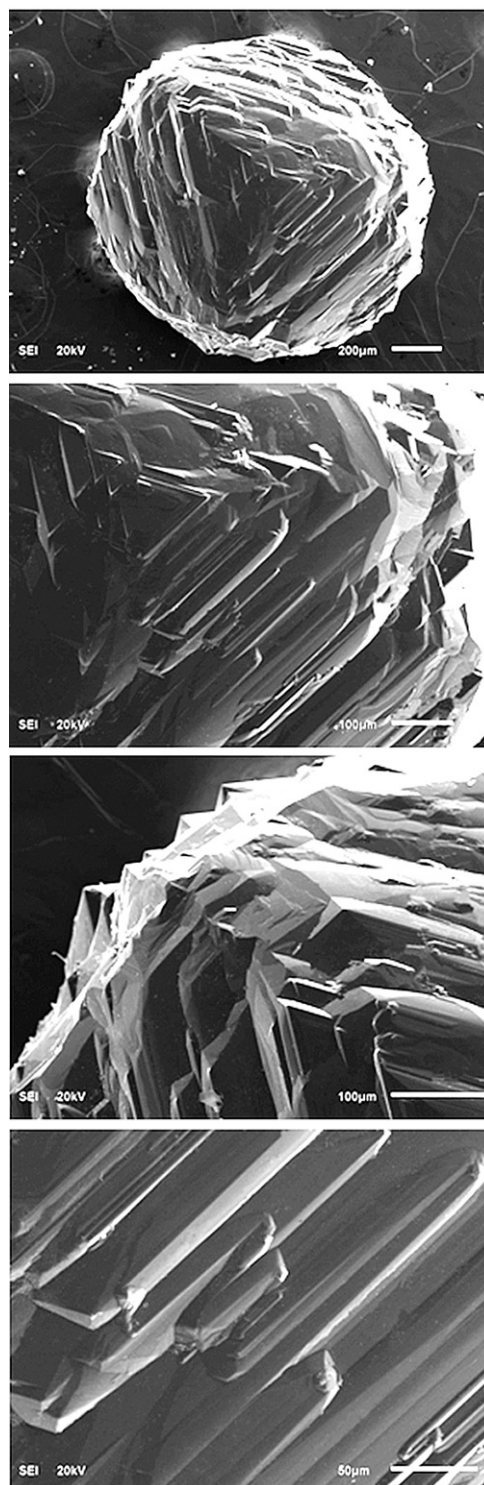


Рис. 3. Кристалл № 2 после растворения в расплаве Fe-S при 3,5 ГПа и 1400°C (общий вид и фрагменты поверхности)

октаэдрические грани приобрели полицентрическое строение.

В опыте с содержанием серы в расплаве 10 мас. % кристалл алмаза (№ 3) растворился в меньшей степени, чем при 15 мас. %. Потеря веса кристалла № 3 составила 1,25 мг (17,2%). Приобретённая в результате растворения морфология алмаза (рис. 4) аналогична таковой кристалла № 1, растворённому при содержании серы 20 мас. %.

Более точную информацию о форме растворения кристаллов алмаза дают их фотограммы (рис. 5). Фотограммы всех трёх кристаллов после опытов идентичны. Отчетливо проявились точечные засветы от плоскостей {111}, между которыми располагаются одинарные дугообразные засветы, по своему положению отвечающие геометрическому месту тригон-триоктаэдров. Фрагментарно проявились также «размытые» засветы от тетрагон-триоктаэдров и гексооктаэдров. Исходя из основного мотива рефлексов на фотограммах, форма растворённых кристаллов алмаза соответствует октаэдриду. Подчеркнём, «световые треугольники» на фотограммах отсутствуют, поэтому данная форма не является ромбододекаэдридом или тетрагексаэдридом. По классификации природных алмазов из кимберлитов З.В. Бартошинского [2], фотограммы, на рис. 5 соответствуют форме октаэдра с тригональной штриховкой у рёбер. Незначительная «дитригональность» дугообразных засветов в виде небольшого расщепления проявилась только на фотограмме кристалла № 1, испытавшего самую низкую степень растворения. Присутствие дугообразных засветов — отличие форм растворения алмазов от форм роста, на фотограммах которых проявляются только точечные засветы от ростовых плоскостей на кристаллах.

Таким образом, форма растворения алмазов и их микроморфологические особенности полностью соответствуют природным алмазам из кимберлитов. В связи с этим актуальность приобретают вопросы генезиса октаэдридов алмаза с тригональными геометрическими мотивами штриховок и скульптур у рёбер кристаллов. Алмазы данного типа характерны в большей степени для глубинных ксенолитов из кимберлитов, чем для самих кимберлитов [20]. Частично растворённые алмазы данной формы могли образоваться либо в «сухих» силикатных расплавах в мантии Земли, либо в восстановленных участках мантии в металл-сульфидных расплавах. В пользу второй версии свидетельствует ряд фактов: многочисленные наход-

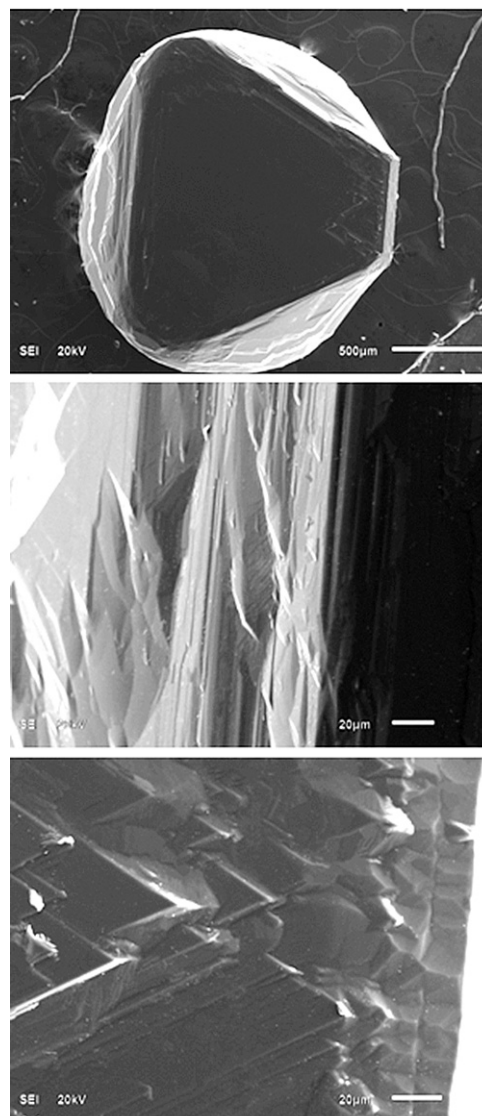


Рис. 4. Кристалл № 3 после растворения в расплаве Fe-S при 3,5 ГПа и 1400°C (общий вид и фрагменты поверхности)

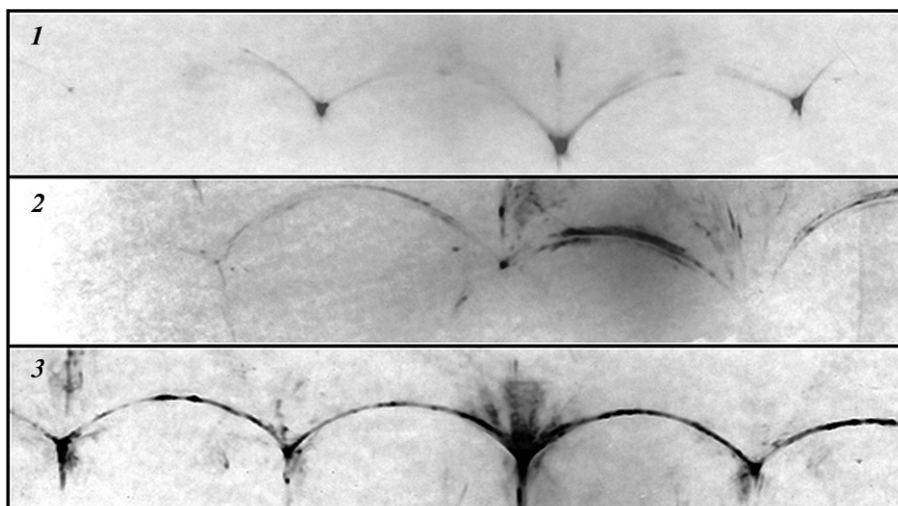


Рис. 5. Фотограммы кристаллов алмаза после растворения в расплаве Fe-S при 3,5 ГПа и 1400°C

ки самородных металлов, карбидов и сульфидов в виде включений в природных алмазах, особенно так называемые центральные включения [25]; сложное внутреннее строение природных алмазов со структурными особенностями, которые можно объяснить перерывами в росте и процессами растворения [3, 5, 6]. Кроме того, реконструированная среда кристаллизации наиболее глубинных алмазов II типа (по оптическим свойствам) соответствует металл-сульфидным природным системам [31]. Следует подчеркнуть, что серосодержащий расплав железа является алмазпродуцирующим при высоких давлениях и температурах [9, 10]. Комплекс этих фактов позволяет высказать предположение о большой роли металл-сульфидных расплавов в генезисе мантийных алмазов.

Растворимость углерода (алмаза) в «сухих» силикатных расплавах много меньше, чем в серосодержащем расплаве железа [15, 19]. Поэтому металл-суль-

фидные расплавы, учитывая их относительно низкие температуры плавления, могли влиять на сохранность алмазов в мантии. Присутствие серы в значительной мере уменьшает растворимость углерода: в расплавах Fe-S, близких к эвтектическому (25 и 30 мас. % в наших экспериментах), она стремится к нулю, т. е. присутствие серы благоприятно сказывается на устойчивости алмазов. Уменьшение потери веса алмаза при 10 мас.% S в расплаве, по сравнению с 15-процентным содержанием, связано, вероятно, с появлением в системе твердой фазы Fe [24] и соответственно с уменьшением количества жидкости (при температуре экспериментов).

Авторы благодарят А.Т. Титова и Е.С. Линденблот за помощь в проведении исследований, а также В.К. Гаранина за рецензирование статьи.

Работа выполнена в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева в рамках базового проекта № 0330-2016-0012.

ЛИТЕРАТУРА

- Афанасьев В.П., Ефимова Э.С., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Атлас морфологии алмазов России. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГМ, 2000. 298 с.
- Бартошинский З.В., Квасница В.Н. Кристалломорфология алмаза из кимберлитов. Киев: Наук. думка, 1991. 172 с.
- Бескровнов В.В. Онтогенез алмаза. Новосибирск: Наука, 2000. 264 с.
- Богатилов О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А., Кудрявцева Г.П., Васильева Е.Р., Вержак В.В., Веричев Е.М., Парсаданян К.С., Посухова Т.В. Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия). М.: Изд-во МГУ, 1999. 360 с.
- Варшавский А.В. Аномальное двупреломление и внутренняя морфология алмаза. М.: Наука, 1968. 92 с.
- Генштафт Ю.С., Якубова С.А., Волкова Л.М. Внутренняя морфология природных алмазов // Исследования глубинных минералов. М.: ИФЗ АН СССР, 1977. С. 5–31.
- Жимулев Е.И., Сонин В.М., Чепуров А.И. Образование кристаллов алмаза с выступающими гранями при травлении // Записки РМО. 2002. Т. 131. № 1. С. 111–113.
- Жимулев Е.И., Сонин В.М., Афанасьев В.П., Чепуров А.И., Похиленко Н.П. Расплав Fe-S — возможный растворитель алмаза при мантийных условиях // Доклады РАН. 2016. Т. 471. № 5. С. 583–585. DOI: 10.7868/S0869565216350243
- Жимулев Е.И., Сонин В.М., Миронов А.М., Чепуров А.И. Влияние содержания серы на кристаллизацию алмаза в системе Fe-C-S при 5,3–5,5 ГПа и 1300–1370°C // Геохимия. 2016. № 5. С. 439–446. DOI: 10.7868/S0016752516050113
- Жимулев Е.И., Шейн М.А., Похиленко Н.П. Кристаллизация алмаза в системе Fe-S-C // Доклады РАН. 2013. Т. 451. № 1. С. 73–75. DOI: 10.7868/S0869565213190249
- Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. 603 с.
- Кухаренко А.А. Алмазы Урала. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 515 с.
- Орлов Ю.Л. Морфология алмаза. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 236 с.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Федоров И.И., Осоргин Н.Ю. Травление кристаллов алмаза в силикатном расплаве в присутствии существенно водного флюида при высоких P–T параметрах // Геохимия. 1997. № 4. С. 451–455.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Федоров И.И., Томиленко А.А., Чепуров А.И. Травление кристаллов алмаза в «сухом» силикатном расплаве при высоких P–T параметрах // Геохимия. 2001. № 3. С. 305–312.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Афанасьев В.П., Чепуров А.И. Генетические аспекты морфологии алмазов // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44. № 4. С. 291–300.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Томиленко А.А., Афанасьев В.П. Морфология кристаллов алмаза, протравленных в расплаве кимберлита при высоких P–T параметрах // Известия вузов. Геология и разведка. 2002. № 1. С. 60–69.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Чепуров А.И., Чепуров С.А., Чепуров А.И. Хроматографическое изучение процесса травления алмазов в расплаве кимберлита в связи с их устойчивостью в природных условиях // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. № 3. С. 212–221.
- Сонин В.М., Жимулев Е.И., Помазанский Б.С., Земнухов А.Л., Чепуров А.А., Афанасьев В.П., Чепуров А.И. Морфологические особенности растворения кристаллов алмаза в расплаве Fe_{0.7}Si_{0.3} при 4 ГПа и 1400°C // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60. № 1. С. 91–102. DOI: 10.7868/S0016777018010057
- Сонин В.М., Чепуров А.И. О типоморфизме и гомоморфизме алмазов // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. С. 253–255.
- Чепуров А.И., Хохряков А.Ф., Сонин В.М., Пальянов Ю.Н., Соболев Н.В. О формах растворения кристаллов алмаза в силикатных системах при высоком давлении // Доклады АН СССР. 1985. Т. 285. № 1. С. 212–216.
- Чепуров А.И., Федоров И.И., Сонин В.М. Экспериментальные исследования образования алмаза при высоких P–T параметрах (приложение к модели природного алмазообразования) // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 2. С. 234–244.
- Arima M., Kozai Y. Diamond dissolution rates in kimberlitic melts at 1300–1500°C in the graphite stability field // Eur. J. Mineral. 2008. V. 20. P. 357–364. DOI: 10.1127/0935-1221/2008/0020-1820.
- Brett R., Bell P.M. Melting relations in the Fe-rich portion of the system Fe-FeS at 30 kb pressure // Earth Planet. Sci. Lett. 1969. V. 6. P. 479–482.
- Bulanova G.P., Griffin W.L., Ryan C.G. Nucleation environment of diamonds from Yakutian kimberlites // Mineral. Mag. 1998. V. 62. P. 409–419.
- Fedorotchouk Y., Canil D., Semenets E. Mechanism of diamond oxidation and their bearing on the fluid composition in kimberlitic magmas // Am. Mineral. 2007. V. 92. P. 1200–1212.
- Frost D.J., McCammon C.A. The redox state of the Earth's mantle // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2008. V. 36. P. 389–420. DOI: 10.1146/annurev.earth.36.031207.124322
- Khokhryakov A.F., Pal'yanov Yu.N. The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data // Am. Mineral. 2007. V. 92. P. 909–917.

29. Kozai Y., Arima M. Experimental study on diamond dissolution in kimberlitic and lamproitic melts at 1300–1420°C and 1 GPa with controlled oxygen partial pressure // *Am. Mineral.* 2005. V. 90. P. 1759–1766.
30. Rohrbach A., Ballhaus C., Gola-Schindler U., Ulmer P., Kamenetsky V.S., Kuzmin D.V. Metal saturation in the upper mantle // *Nature*. 2007. V. 449. P. 456–458. DOI: 10.1038/nature06183.
31. Smith E.M., Shirey S.B., Nestola F., Bullock E.S., Wang J., Richardson S.H., Wang W. Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle // *Science*. 2016. V. 35 (6318). P. 1403–1405. DOI: 10.1126/science.aal1303.

REFERENCE

1. Afanasiev V.P., Efimova E.S., Zinchuk N.N., Koptil V.I. *Atlas of morphology of Russian diamonds*. Novosibirsk, SB RAS, OIGGM Publ., 2000, 298 p. (In Russian).
2. Bartoshinskii Z.V., Kvasnitsa V.N. *Crystal morphology of kimberlite diamond*. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1991, 172 p. (In Russian).
3. Bescrovanov V.V. *Diamond ontogeny*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000, 264 p. (In Russian).
4. Bogatkov O.A., Garanin V.K., Kononova V.A., Kudr'yavtseva G.P., Vasil'eva E.P., Verzhak V.V., Verichev E.M., Parsadanyan K.S., Posukhova T.V. *Arkhangelsk Diamond Province (geology, petrography, geochemistry and mineralogy)*. Moscow, MGU Publ., 1999, 360 p. (In Russian).
5. Varshavskii A.V. *Anomalous birefringence and internal morphology of diamond*. Moscow, Nauka Publ., 1968, 92 p. (In Russian).
6. Genshaft Yu.S., Yakubova S.A., Volkova L.M. *Internal morphology of natural diamonds, Studies of deep minerals*. Moscow, Akad. Nauk USSR Publ., 1977, pp. 5–31. (In Russian).
7. Zhimulev E.I., Sonin V.M., Chepurov A.I. Formation of diamond crystals with faces protruding due to etching. *Proceedings RMS*, 2002, vol. 131, no. 1, pp. 111–113. (In Russian).
8. Zhimulev E.I., Sonin V.M., Afanasiev V.P., Chepurov A.I., Pokhilenko N.P. Fe-S melt as a likely solvent of diamond under mantle conditions. *Dokl. Earth Sci.*, 2016, vol. 471, no. 2, pp. 1277–1279. DOI: 10.1134/S1028334X16120163. (In Russian).
9. Zhimulev E.I., Sonin V.M., Mironov A.M., Chepurov A.I. Effect of sulfur concentration on diamond crystallization in the Fe-C-S system at 5.3–5.5 GPa and 1300–1370°C. *Geochem. Int.*, 2016, vol. 54, no. 5, pp. 415–422. DOI: 10.1134/S0016702916050116/ (In Russian).
10. Zhimulev E.I., Shein M.A., Pokhilenko N.P. Diamond crystallization in the Fe-S-C system. *Dokl. Earth Sci.*, 2013, vol. 451, no. 1, pp. 729–713. DOI: 10.1134/S1028334X1307009X. (In Russian).
11. Zinchuk N.N., Koptil V.I. *Typomorphism of diamonds of Siberian platform*. Moscow, «Nedra-Biznestsentr» Publ., 2003, 603 p. (In Russian).
12. Kukharensko A.A. *Diamonds of the Urals*. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1955, 515 p. (In Russian).
13. Orlov Yu.L. *Diamond morphology*. Moscow, Acad. Nauk USSR Publ., 1963, 236 p. (In Russian).
14. Sonin V.M., Zhimulev E.I., Fedorov I.I., Osorgin N.Yu. Etching of diamond crystals in silicate melt in the presence of aqueous fluid under high *P-T* parameters. *Geochemistry*. 1997, no. 4, pp. 451–455.
15. Sonin V.M., Zhimulev E.I., Fedorov I.I., Tomilenko A.A., Chepurov A.I. Etching of diamond crystals in a dry silicate melt at high *P-T* parameters. *Geochem. Int.*, 2001, vol. 39, no. 3, pp. 268–274.
16. Sonin V.M., Zhimulev E.I., Afanas'ev V.P., Chepurov A.I. Genetic aspects of diamond morphology. *Geol. Ore Deposits*, 2002, vol. 44, no. 4, pp. 291–299.
17. Sonin V.M., Zhimulev E.I., Chepurov A.I., Afanas'ev V.P. Morphology of diamond crystals etched in kimberlite melt at high *PT* parameters. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy, Geologiya i Razvedka*, [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2002, no. 1, pp. 60–69. (In Russian).
18. Sonin V.M., Zhimulev E.I., Tomilenko A.A., Chepurov S.A., Chepurov A.I. Chromatographic study of diamond etching in kimberlitic melts in the context of diamond natural stability. *Geol. Ore Deposits*, 2004, vol. 46, no. 3, pp. 182–190. (In Russian).
19. Sonin V.M., Zhimulev E.I., Pomazanskiy B.S., Zemnuhov A.L., Chepurov A.A., Afanasiev V.P., Chepurov A.I. Morphological features of diamond crystals dissolved in Fe_{0.7}S_{0.3} melt 4 GPa и 1400°C. *Geol. Ore Deposits*, 2018, vol. 60, no. 1, pp. 82–92. DOI: 10.1134/S1075701518010051. (In Russian).
20. Sonin V.M., Chepurov A.I. Typomorphism and gomomorphism of diamonds, The problems of forecasting, searching for and studying mineral deposits at the threshold of the 21st century. Voronezh: VGU Publ., 2003, pp. 253–255. (In Russian).
21. Chepurov A.I., Khokhryakov A.F., Sonin V.M., Pal'yanov Yu.N., Sobolev N.V. The shape of diamond crystal dissolution in silicate melts under high pressure. *Dokl. Acad. Nauk USSR*, 1985, vol. 285, no. 1, pp. 212–216. (In Russian).
22. Chepurov A.I., Fedorov I.I., Sonin V.M. Experimental studies of diamond formation at high *PT*-parameters: supplement to the model for natural diamond formation. *Geol. Geofiz.*, 1998, vol. 39, no. 2, pp. 234–244. (In Russian).
23. Arima M., Kozai Y. Diamond dissolution rates in kimberlitic melts at 1300–1500°C in the graphite stability field. *Eur. J. Mineral.*, 2008, vol. 20, pp. 357–364. DOI: 10.1127/0935-1221/2008/0020-1820/ (In Russian).
24. Brett R., Bell P.M. Melting relations in the Fe-rich portion of the system Fe-FeS at 30 kb pressure. *Earth Planet. Sc. Lett.*, 1969, vol. 6, pp. 479–482.
25. Bulanov G.P., Griffin W.L., Ryan C.G. Nucleation environment of diamonds from Yakutian kimberlites. *Mineral. Mag.*, 1998, vol. 62, pp. 409–419.
26. Fedortchouk Y., Canil D., Semenets E. Mechanism of diamond oxidation and their bearing on the fluid composition in kimberlitic magmas. *Am. Mineral.*, 2007, vol. 92, pp. 1200–1212.
27. Frost D.J., McCammon C.A. The redox state of the Earth's mantle. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2008, vol. 36, pp. 389–420. DOI: 10.1146/annurev.earth.36.031207.124322.
28. Khokhryakov A.F., Pal'yanov Yu.N. The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data. *Am. Mineral.*, 2007, vol. 92, pp. 909–917.
29. Kozai Y., Arima M. Experimental study on diamond dissolution in kimberlitic and lamproitic melts at 1300–1420°C and 1 GPa with controlled oxygen partial pressure. *Am. Mineral.*, 2005, vol. 90, pp. 1759–1766.
30. Rohrbach A., Ballhaus C., Gola-Schindler U., Ulmer P., Kamenetsky V.S., Kuzmin D.V. Metal saturation in the upper mantle. *Nature*, 2007, vol. 449, pp. 456–458. DOI: 10.1038/nature06183.
31. Smith E.M., Shirey S.B., Nestola F., Bullock E.S., Wang J., Richardson S.H., Wang W. Large gem diamonds from metallic liquid in Earth's deep mantle. *Science*, 2016, vol. 35, no. 6318, pp. 1403–1405. DOI: 10.1126/science.aal1303.

ЦИРКОНОВАЯ ХРОНОЛОГИЯ ИНТРУЗИВНОГО МАГМАТИЗМА ПОЛУОСТРОВА КАНИН

В.Л. АНДРЕИЧЕВ¹, А.А. СОБОЛЕВА¹, С.А. СЕРГЕЕВ², С.Л. ПРЕСНЯКОВ²

¹Институт геологии Коми НЦ УрО РАН
54, Первомайская ул., г. Сыктывкар 167982, Россия
e-mail: izo@geo.komisc.ru

²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского
74, Средний проспект, г. Санкт-Петербург 199106, Россия
e-mail: Sergey_Sergeev@vsegei.ru

П-ов Канин представляет собой приподнятый блок Тиманской гряды, где докембрийские осадочно-метаморфические толщи и прорывающие их магматические породы слагают хребет Канин Камень. В северо-западной части полуострова на побережье Баренцева моря находится единственный выход двуслюдяных гранитов, монзонитоидов и лампрофиров, интрузирующих метатерригенные отложения верхнерипейской табуевской серии и перекрытых нижнепермскими известняками. Для установления возраста магматических пород было проведено U-Pb датирование цирконов методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS). По цирконам из гранитов получен возраст 883 ± 16 млн. лет, что соответствует началу позднего рифея, а субсинхронное образование пород повышенной щелочности происходило в позднем кембрии. Возраст монцогаббро составляет 505 ± 7 млн. лет, лампрофиров — 504 ± 7 млн. лет.

Ключевые слова: циркон; граниты; монзонитоиды; лампрофиры; п-ов Канин; Тиман; поздний рифей; поздний кембрий; U-Pb изотопный возраст.

THE ZIRCON CHRONOLOGY OF THE INTRUSIVE MAGMATISM OF THE KANIN PENINSULA

V.L. ANDREICHEV¹, A.A. SOBOLEVA¹, S.A. SERGEEV², S.L. PRESNYAKOV²

¹Institute of Geology of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
(IG Komi SC UB RAS)
54, Pervomaiskaya str., Syktывkar 167982, Russia
e-mail: izo@geo.komisc.ru

²Federal State Budgetary Institution
«A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute» (FGBU «VSEGEI»)
74, Sredny prospect, St. Petersburg 199106, Russia
e-mail: Sergey_Sergeev@vsegei.ru

The Kanin Peninsula is an elevated block of the Timan Ridge where Precambrian sedimentary-metamorphic sequences and magmatic rocks, intruding them, form the Kanin Kamen Ridge. In the northwestern part of the Peninsula on the coast of the Barents Sea, there is a unique outcrop of two-mica granites, monzonitoids and lamprophyres cutting metaterrigenous rocks of the Upper Riphean Tabuyev series and overlain by Lower Permian limestones. To establish the age of magmatic rocks, U-Pb dating of zircons has been carried out by secondary ion mass spectrometry (SIMS) method. In zircons from granites, an age of 883 ± 16 Ma has been obtained, which corresponds to the beginning of the Late Riphean, and the subsynchronous formation of subalkaline rocks occurred in the Late Cambrian. The age of monzogabbro is 505 ± 7 Ma, and lamprophyres — 504 ± 7 Ma.

Keywords: zircon; granites; monzonitoids; lamprophyres; Kanin Peninsula; Timan; Late Riphean; Late Cambrian; U-Pb isotopic age.

Тиман и п-ов Канин образуют вытянутую в северо-западном направлении от Полудова Камня до мыса Канин Нос крупную орографически выраженную структуру (Тиманскую гряду) протяженностью более 1000 км при ширине 80–160 км. Она ограничивает с юго-запада Печорскую плиту, включается в её состав и состоит из отдельных кулисообразно расположенных, горстообразных удлиненных поднятий, в сводовых частях которых локально обнажены верхнедокембрийские струк-

турно-вещественные комплексы, сложенные преимущественно терригенными и в меньшей степени карбонатными образованиями, и прорывающие их позднедокембрийские и кембрийские интрузивы. Для их обозначения Н.С. Шатский [14] применил термин «тиманиды», который впоследствии нередко заменялся на «байкалиды», но в последнее время вновь более распространенным стал термин «тиманиды» [6, 11, 12, 23], отражающий связь складчатых сооружений фундамента Печорской плиты с

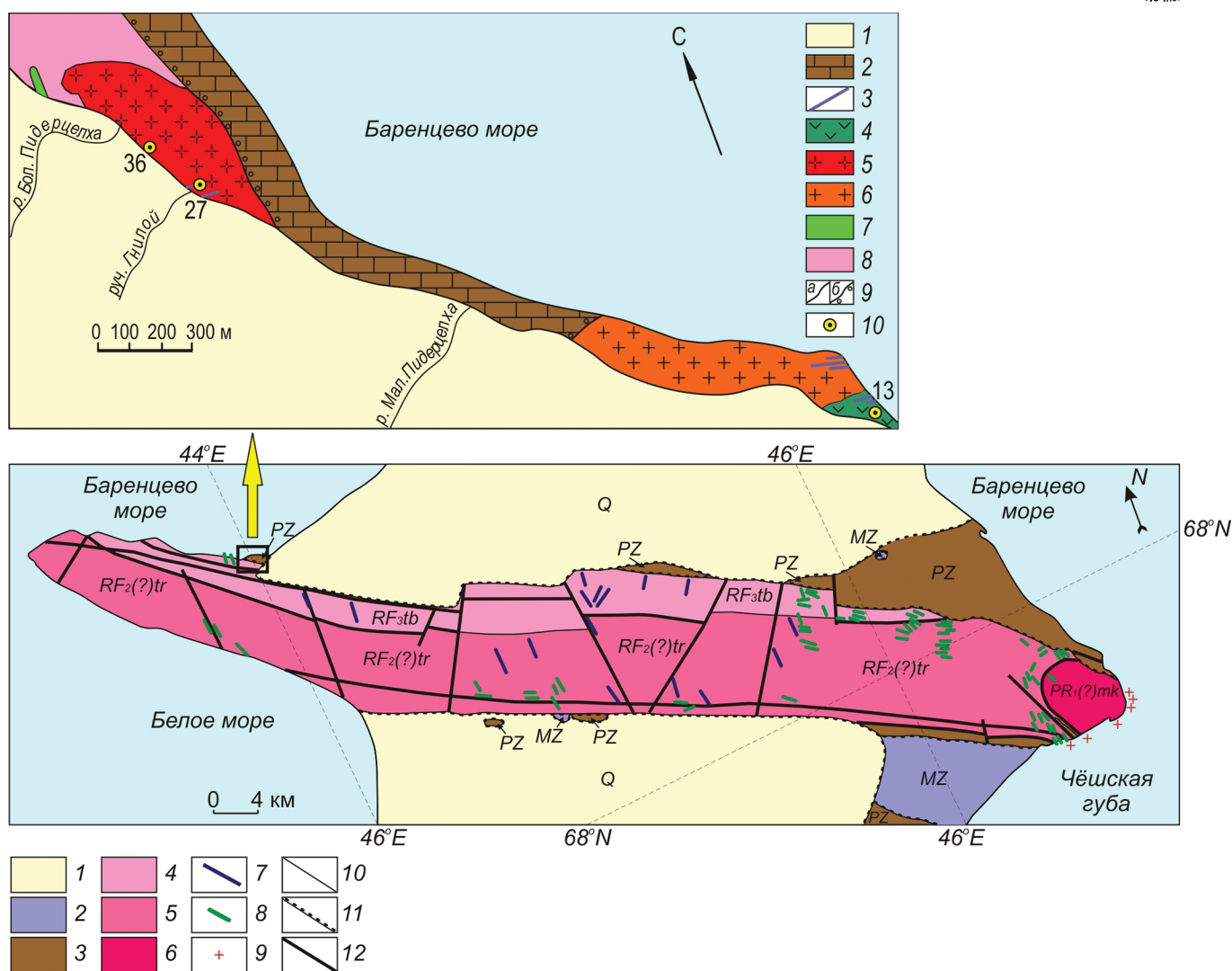


Рис. 1. Геологическая схема хребта Канин Камень (по [10] с изменениями): 1–6 – стратифицированные образования: 1 – четвертичные (Q); 2 – мезозойские (MZ – нижний триас–верхняя юра); 3 – палеозойские (PZ – нижний силур–верхняя пермь); протерозойские: 4 – табуевская серия (R_{3tb}) – кварцитопесчаники, сланцы; 5 – тархановская серия ($R_2(?)tr$) – кварцитопесчаники, сланцы; 6 – микулкинская серия ($PR_1(?)mk$) – гнейсы, кристаллические сланцы, кварциты, амфиболиты; 7–9 – интрузивные тела: 7 – дайки девонских долеритов; 8 – дайки докембрийских метадолеритов; 9 – жилы пегматитов; 10 – геологические границы; 11 – стратиграфические несогласия; 12 – разломы

На врезке. Схема геологического строения участка распространения интрузивных пород в северо-западной части п-ова Канин (по [5]): 1 – четвертичные отложения; 2 – известняки ассельского яруса нижней перми; 3 – дайки лампрофиров; 4 – монцонаббро и монцитониты; 5 – серые мелко- и среднезернистые граниты; 6 – розовые крупно- и среднезернистые граниты; 7 – метадолериты; 8 – ставролит-гранат-кварц-биотитовые сланцы табуевской серии; 9 – геологические границы (a – интрузивные, б – трансгрессивное налегание); 10 – точки отбора проб

позднедокембрийским [12] или кембрийским [18] тиманским тектогенезом. П-ов Канин представляет собой северо-западный приподнятый блок Тиманской гряды, где докембрийские осадочно-метаморфические толщи и прорывающие их магматические породы слагают хребет Канин Камень (рис. 1).

Магматические образования представлены долеритами, двуслюдяными гранитами, монцитонитами, лампрофирами и пегматитами. Долериты достаточно широко распространены по площади, другие породы развиты ограниченно. Пегматиты наблюдаются в поле распространения глубоком-

таморфизованных пород микулкинской серии в юго-восточной части полуострова на западном побережье Чёшской губы в районе мыса Микулкин. Граниты, с которыми связывается генезис пегматитов, не вскрыты ни эрозией, ни скважинами, они лишь предполагаются по геофизическим данным [3]. Единственный выход интрузивных пород различного состава находится в северо-западной части полуострова на побережье Баренцева моря, где в отливно-приливной зоне доступны непосредственному наблюдению биотит-мусковитовые граниты и их жильная фация, монцитониты и дайки лампрофиров.

Геолого-петрографическая характеристика интрузивных пород п-ова Канин

Граниты образуют вытянутое в северо-западном направлении, частично обнаженное в двух изолированных выходах в приустьевых частях рек Большая и Малая Пидерцелха тело протяженностью около 2,5 км (рис. 1). Породы локализованы в зоне разлома северо-западного простирания. Вмещающими являются ставролит-гранат-кварц-биотитовые сланцы и кварциты верхнерифейской табуевской серии, метаморфизованные совместно с долеритами в условиях амфиболитовой фации, что не характерно для пород серии. За исключением этого участка породы табуевской серии практически повсеместно испытали лишь зеленосланцевые изменения. Кроме того, на граниты и породы рамы наложены процессы диафтореза, ответственные за образование поздних биотит-мусковитовых и мусковит-хлоритовых парагенезисов. Сланцы и граниты с юга перекрыты четвертичными отложениями, а с северо-востока — толщей известняков ассельского яруса нижней перми, в базальном слое которой отмечается галька гранитного материала. Продольный контакт гранитов с вмещающими породами не наблюдается, «торцевой» контакт резкий, интрузивный. В зоне экзоконтакта кварциты, сланцы и ортоамфиболиты, образующие в них дайкообразное тело в 250 м к западу от гранитов, содержат многочисленные согласные и секущие гранитные жилы мощностью 0,1—1 м и протяженностью до 70 м, которые подвергались складчатым деформациям. Граниты и вмещающие их породы пересечены многочисленными пегматитовыми и аплитовыми жилами различной ориентировки мощностью 0,1—0,3 м, иногда до 0,5—0,7 м, и протяженностью от первых до 10—15 м. Контакты с гранитами четкие, неровные. Очертания большинства тел прямолинейные, но наблюдаются и ветвящиеся жилы.

Граниты представлены серыми и розовыми средне- и крупнозернистыми разновидностями, что давало исследователям основание относить серые граниты к первой фазе внедрения, а розовые — ко второй [7] или же связывать серую окраску гранитов с грейзенизацией [4]. Однако полевые наблюдения показали, что между этими разновидностями существуют постепенные переходы через серовато-розовые граниты, причем розовый цвет отмечается там, где они прорываются монцонитами и лампрофитами, т. е. розовая окраска является приобретённой. Различий между розовыми и серыми гранитами нет ни по текстурно-структурным особенностям, ни по составу [5].

Структура гранитов гипидиоморфнозернистая, зачастую осложнённая катаклазом. Главными породообразующими минералами гранитов являются щелочной полевой шпат, плагиоклаз (олигоклаз) и

кварц. Второстепенные минералы — биотит и мусковит, в качестве аксессуаров постоянно встречаются гранат, циркон, апатит, часто ильменит и турмалин. Пирит, вероятно, имеет более позднее происхождение. Вторичные минералы, характерные для катаклазированных гранитов, представлены альбитом, замещающим щелочной полевой шпат, серицитом, развивающимся по плагиоклазу, хлоритом — по слюдам, а также кальцитом, титанитом и эпидотом. Минеральный состав аплитовых и пегматитовых жил близок к составу гранитов.

По петрохимической классификации рассматриваемые породы относятся преимущественно к семействам умеренно-щелочных гранитов и лейкогранитов и характеризуются калиево-натриевым и натриевым типом щелочности. Содержание SiO_2 колеблется от 72,30 до 75,02 мас.%, щелочей — от 7,33 до 8,46 мас.%, отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ — 0,57—2,28.

Граниты имеют достаточно однородный состав, и лишь в альбитизированных жильных гранитах возрастает количество Na_2O и понижается K_2O , за счёт этого отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ достигает 8,28. По геохимическим характеристикам граниты занимают промежуточное положение между палингенными известково-щелочными и плюмазитовыми редкометалльными гранитоидами. Граниты п-ова Канин по геологическим признакам, внешнему облику, вещественному составу отличаются от гранитов, выходящих на поверхность на Северном Тимане и вскрытых скважинами в фундаменте Печорской плиты.

Монцонитоиды наблюдаются в единственном выходе размерами около 120×40 м, обнаруженном Ю.П. Ивенсенем [4] в 1,2 км к юго-востоку от устья р. Малая Пидерцелха. Впоследствии их детальное структурно-петрографическое изучение было проведено М.Н. Костюхиным [5]. Контакты с вмещающими породами скрыты под отложениями пляжа и лишь на микроучастке протяженностью около 2 м наблюдается контакт монцонитов с гранитами. Структура пород варьирует от офитовой до монцонитовой, а состав пород — от монцонаббро до сиенита. Преобладают массивные среднезернистые породы, цвет которых варьирует от зеленовато-серого на меланократовых участках до мясо-красного на лейкократовых. Главными минералами являются плагиоклаз, клинопироксен и щелочной полевой шпат, во второстепенных количествах присутствует биотит, к аксессуарным относятся ильменит, апатит, титанит, циркон, гранат и рутил. Пирит и гематит, вероятно, имеют гидротермальное происхождение. Вторичные минералы представлены актинолитом, хлоритом, эпидотом, клиноцоизитом, серицитом, карбонатом. По петрохимической классификации породы относятся к семействам монцонаббро, монцонитов и сиенитов и характеризуются калиево-натриевым типом ще-

лочки. Содержание SiO_2 изменяется от 49,36 до 58,34 мас.%, щелочей — от 6,02 до 9,14 мас.%, отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ — 1,07—1,67.

Граниты и монцонитоиды прорваны дайками умеренно-щелочных основных пород мощностью 1—2,5 м и протяжённостью до 100 м. Они имеют субширотную ориентировку с крутым падением на север. Б.А. Мальков [8] считает эти породы эссекситовыми долеритами. Мы, вслед за Ю.П. Ивенсеном [4], относим их к лампрофирам. Для датирования цирконов отобрана порода из дайки, прорывающей граниты. Она имеет тёмно-коричневый цвет, массивная, порфировая, с мелкозернистой основной массой. Порфиновые вкрапления представлены единичными крупными, до 1,5 см, зёрнами ксерсита с вытянутыми скругленными сечениями. В них по трещинам и по периферии отмечается слабая хлоритизация. Основная масса имеет гипидиоморфнозернистую структуру и сложена сильно удлиненными призмами нацело замещенного титанитом и хлоритом пироксена или амфибола (около 30% объёма основной массы), зональными лейстами плагиоклаза с сосюритизированным ядром и чистыми альбитовыми краями, ксеноморфными зёрнами кислого плагиоклаза, идиоморфными чешуйками биотита (около 10%), рудным минералом — предположительно магнетитом (около 10%). Кроме того, в породе наблюдаются ксеноморфные участки, сложенные пелитизированным, с подтёками гидроксидов железа, цеолитом(?), развивающимся по плагиоклазу и/или фельдшпатоидам. В сумме лейкократовые минералы составляют около 50% породы. Акцессорные минералы представлены большим количеством удлиненно-призматического и игольчатого апатита и цирконом. Вторичными являются минералы группы эпидота, хлорит, кальцит, цеолит(?) и гидроксиды железа. По химическому составу порода соответствует наиболее щелочным разновидностям эссекситов. Содержание SiO_2 составляет 47,66 мас.%, ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) — 8,06 мас.%, отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ — 0,93.

Таким образом, геологические наблюдения свидетельствуют, что самыми поздними из рассматриваемых авторами интрузивных пород являются лампрофиры. Возрастные соотношения гранитов и монцонитоидов неоднозначны. Отсутствие в последних аплит-пегматитовых жил, пронизывающих граниты и породы рамы, говорит в пользу более молодого возраста монцонитоидов, но это может быть связано с их малой площадью выхода. Сведения об изотопном возрасте канинских магматитов практически отсутствуют. Из литературы известна единственная K-Ar датировка мусковита из пегматита, равная 640 млн. лет [9], которую можно условно рассматривать как указание на довендский возраст гранитов. По современным представлениям возраст нижней границы венда составляет 640 млн. лет [13]. Для восполнения имеющегося изотоп-

но-геохронологического пробела и выяснения последовательности формирования магматических пород нами было проведено U-Pb датирование цирконов из гранита, монцогаббро и лампрофира.

Аналитические методики

U-Pb датирование цирконов проведено методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS). Цирконы из гранита и лампрофира проанализированы в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) на ионном микрозонде SHRIMP-II, а их внутренняя структура изучена на сканирующем электронном микроскопе CamScan MX 2500 с катодолюминесцентной системой CLI/QUA2 с целью выбора участка для локального изотопного анализа. Цирконы из монцогаббро исследованы на ионном микрозонде SHRIMP-RG, принадлежащем Стэнфордскому университету и Геологической службе США. Изображения цирконов были получены на сканирующем электронном микроскопе JEOL LV 5600, оснащённом катодолюминесцентным детектором.

Изотопные отношения на ионных микрозондах измерены согласно стандартным процедурам: SHRIMP-II [19], SHRIMP-RG [16]. Обработка полученных аналитических данных произведена с использованием программы SQUID [21]. Нормализация Pb/U отношений осуществлена относительно величины $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 0,0668 в стандартном цирконе TEMORA, эквивалентной возрасту 416,75 млн. лет [17]. Содержания U и Th в цирконах из гранита и лампрофира рассчитаны относительно циркона 91500 [24]. Концентрации элементов-примесей (Ti, Fe, Y, REE, Hf, U, Th) в цирконах из монцогаббро рассчитаны относительно циркона Madagascar Green (MAD) [15]. При построении графиков с конкордией в координатах $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ использована программа ISOPLOT/Ex [22].

Результаты и их обсуждение

Датирование гранитов осуществлено по цирконам из серого (первичного) гранита (обр. 36). Цирконы представлены мутными и полупрозрачными коричневыми идиоморфными кристаллами призматического облика размером 120—200 мкм, коэффициент удлинения K_u 1,0—3,0. В катодолюминесцентном изображении (рис. 2) в цирконах наблюдается сложное строение. Большая часть зёрен состоит из тонкозональных ядер округлой и призматической форм и тёмных оболочек. Ядра часто представлены обломками, возможно, окатанными.

Проанализировано шесть зёрен (таблица). Минимальный $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст, равный 423 ± 7 млн. лет, установлен в ядре зерна 3.1 с высоким содержанием урана и низким Th/U отношением, характерным для цирконов метасоматического проис-

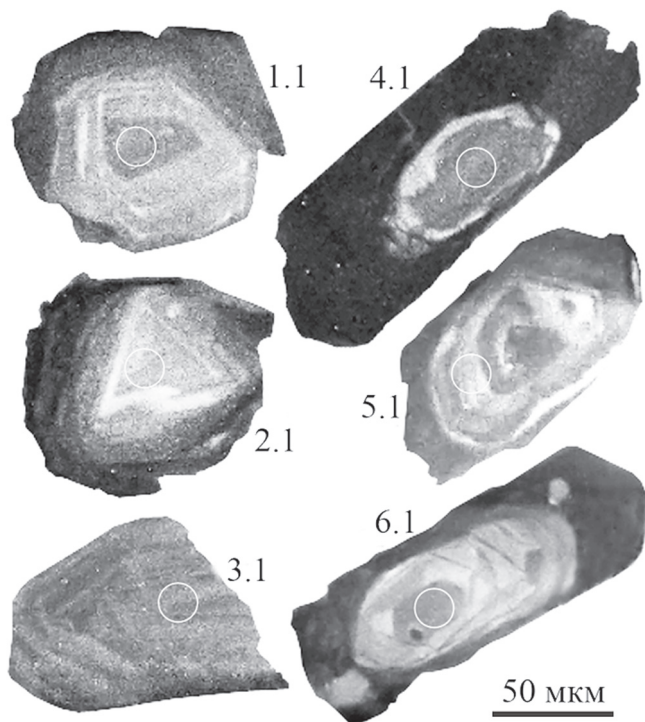


Рис. 2. Катодолуминесцентное изображение цирконов из гранита (обр. 36) с номерами датированных зёрен и аналитических кратеров

хождения. По трём зёрнам (точки 5.1, 1.1, 2.1) получен средневзвешенный конкордантный возраст 882 ± 16 млн лет (рис. 3). В ядрах зёрен 6.1 и 4.1 зафиксированы конкордантные возрасты 1500 ± 25 и 1706 ± 28 млн. лет соответственно. Судя по полученным результатам, времени образования гранитов отвечает возраст 883 ± 16 млн. лет, а древние датировки отражают возраст протолита гранитоидов.

Возраст монцонитоидов определялся по цирконам из монцогаббро (обр. 13). Кристаллы идиоморфные со слабо сглаженными вершинами, светло-желтовато-розовые до оранжевых за счёт большого числа мелких оранжевых включений. Слабо удлинённые (Ku 1,5–2), бипирамидально-призматические. Более светлые — прозрачные и полупрозрачные, с блестящими, слегка шероховатыми гранями. Более тёмные, оранжевые — непрозрачные, с матовыми шероховатыми гранями. Размер зёрен 100–200 мкм. На катодолуминесцентных изображениях (рис. 4) зёрна очень тёмные, практически незональные, лишь в некоторых из них отмечается еще более тёмная кайма. Во внутренних частях некоторых зёрен отмечены почти чёрные участки повреждений.

Проанализированные 12 цирконов (таблица) характеризуются большими содержаниями U и Th,

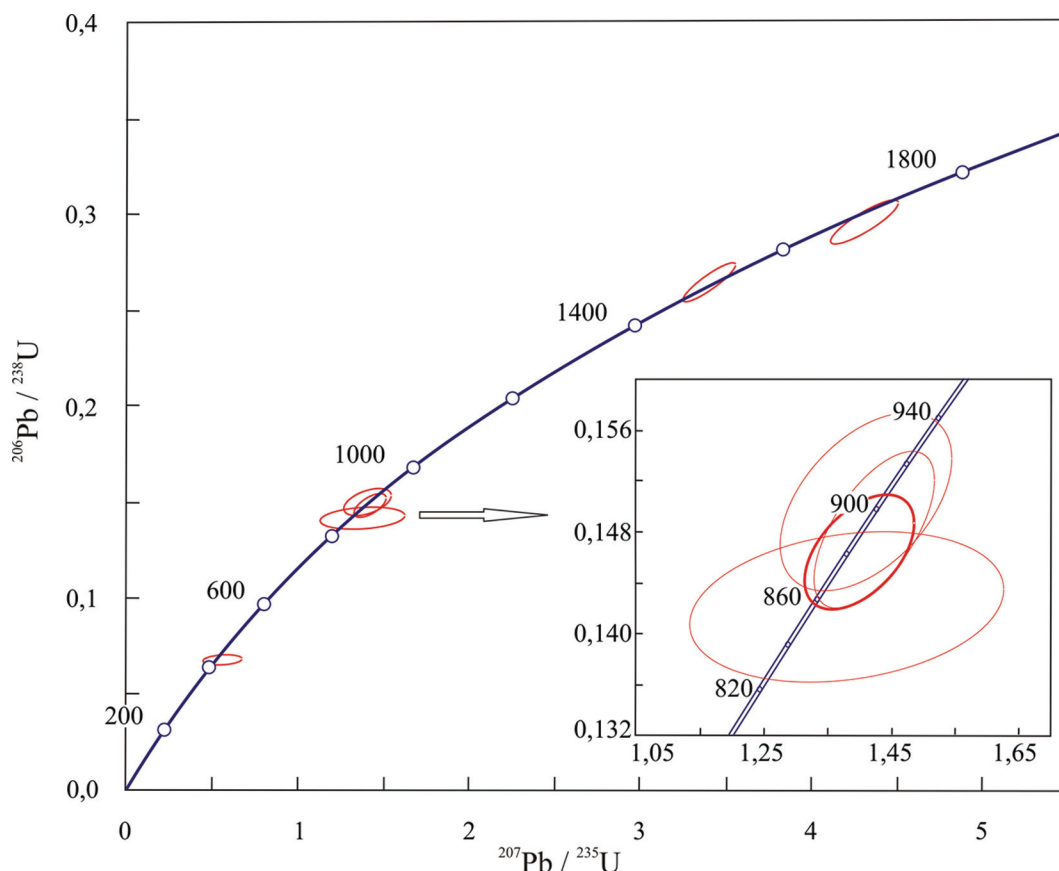


Рис. 3. Диаграмма с конкордией для цирконов из гранита (обр. 36); координаты точек — центры эллипсов погрешностей (2σ). На вставке жирным выделен эллипс, по которому рассчитан конкордантный возраст 882 ± 16 млн. лет (2σ , $n = 3$, $СКВО = 0,46$)

Результаты U–Pb локальных изотопных исследований цирконов из интрузивных пород п-ова Канин

Зерно, кратер	²⁰⁶ Pbс, %	Содержания, мкг/г			²³² Th/ ²³⁸ U	Изотопные отношения ± % (1σ)			Rho	Возраст, млн лет ± 1σ		D,%
		²⁰⁶ Pb*	U	Th		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	
Гранит, обр. 36												
3.1	2,57	149,0	2496	46	0,02	0,0679 ± 1,7	0,562 ± 8,4	0,0600 ± 8,3	0.20	423 ± 7	605 ± 180	43
5.1	5,88	78,0	599	448	0,77	0,1421 ± 1,7	1,380 ± 7,3	0,0705 ± 7,1	0.23	856 ± 14	942 ± 150	10
1.1	0,26	44,8	351	242	0,71	0,1482 ± 1,7	1,423 ± 2,7	0,0696 ± 2,1	0.63	891 ± 14	917 ± 42	3
2.1	0,46	24,6	190	55	0,30	0,1504 ± 1,9	1,410 ± 3,9	0,0680 ± 3,4	0.49	903 ± 16	868 ± 70	−4
6.1	0,14	176,0	774	479	0,64	0,2649 ± 1,6	3,406 ± 1,8	0,0932 ± 0,8	0.90	1515 ± 22	1493 ± 15	−1
4.1	0,15	96,2	377	278	0,76	0,2964 ± 1,6	4,310 ± 1,9	0,1054 ± 0,9	0.87	1674 ± 24	1722 ± 17	3
Монцонаббро, обр. 13												
9.1	0,91	263	3914	4367	1,15	0,0783 ± 3,0	0,638 ± 3,4	0,0591 ± 1,6	0,9	486 ± 14	571 ± 36	17
2.1	н.п.о.	85	1256	930	0,76	0,0785 ± 1,5	0,636 ± 1,7	0,0587 ± 0,8	0,9	487 ± 7	556 ± 18	14
10.1	0,14	71	1036	702	0,70	0,0798 ± 1,0	0,634 ± 1,4	0,0576 ± 1,1	0,7	495 ± 5	515 ± 23	4
12.1	1,74	514	7439	7319	1,02	0,0805 ± 3,3	0,631 ± 4,0	0,0569 ± 2,3	0,8	499 ± 16	486 ± 50	−3
6.1	0,14	209	2958	2242	0,78	0,0822 ± 0,9	0,656 ± 1,1	0,0579 ± 0,6	0,8	509 ± 4	526 ± 13	3
1.1	н.п.о.	143	2030	1388	0,71	0,0823 ± 1,6	0,652 ± 1,7	0,0575 ± 0,6	0,9	510 ± 8	509 ± 14	0
11.1	9,77	687	9700	15181	1,62	0,0825 ± 3,7	0,759 ± 8,4	0,0667 ± 7,6	0,4	511 ± 18	828 ± 159	62
7.1	0,08	108	1521	618	0,42	0,0825 ± 0,8	0,673 ± 1,1	0,0591 ± 0,8	0,7	511 ± 4	572 ± 17	12
5.1	0,05	307	4316	4427	1,06	0,0829 ± 1,2	0,671 ± 1,4	0,0587 ± 0,8	0,8	513 ± 6	555 ± 17	8
8.1	0,23	289	3869	4865	1,30	0,0869 ± 1,1	0,710 ± 1,4	0,0592 ± 0,9	0,8	537 ± 5	576 ± 20	7
3.1	н.п.о.	924	11511	15153	1,36	0,0934 ± 1,1	0,755 ± 1,4	0,0586 ± 0,7	0,8	576 ± 6	552 ± 16	−4
4.1	0,14	687	8360	8471	1,05	0,0957 ± 1,5	0,771 ± 1,5	0,0584 ± 0,3	1,0	589 ± 8	546 ± 7	−7
Лампрофир, обр. 27												
1.1	н.п.о.	33,6	479	561	1,21	0,0816 ± 2,2	0,653 ± 2,8	0,0580 ± 1,7	0,79	505 ± 11	530 ± 37	5
2.1	0,35	10,1	144	120	0,86	0,0810 ± 2,4	0,635 ± 5,0	0,0568 ± 4,3	0,48	502 ± 12	484 ± 96	−4
3.1	0,93	8,5	121	83	0,71	0,0815 ± 2,7	0,591 ± 12	0,0526 ± 12	0,22	505 ± 13	310 ± 270	−39
4.1	0,09	44,7	640	1272	2,06	0,0813 ± 2,2	0,628 ± 2,8	0,0560 ± 1,7	0,79	504 ± 11	452 ± 38	−10
4.2	0,10	36,4	518	855	1,71	0,0818 ± 2,2	0,642 ± 3,0	0,0569 ± 2,0	0,75	507 ± 11	488 ± 43	−4
4.3	0,11	32,1	450	624	1,43	0,0829 ± 2,2	0,643 ± 3,0	0,0563 ± 2,0	0,74	513 ± 11	463 ± 44	−10
5.1	0,49	13,6	195	149	0,79	0,0809 ± 2,3	0,609 ± 5,6	0,0546 ± 5,1	0,41	502 ± 11	396 ± 120	−21
5.2	0,25	16,2	228	184	0,83	0,0826 ± 2,3	0,632 ± 4,1	0,0555 ± 3,3	0,57	512 ± 11	430 ± 75	−16
6.1	н.п.о.	34,9	502	635	1,31	0,0809 ± 2,2	0,647 ± 2,9	0,0581 ± 1,8	0,77	502 ± 11	532 ± 40	6
6.2	0,18	32,9	476	736	1,60	0,0803 ± 2,2	0,624 ± 3,3	0,0564 ± 2,5	0,66	498 ± 11	468 ± 56	−6

Примечание. Ошибка в калибровке стандарта составляет 0,59% (обр. 36), 0,28% (обр. 13) и 0,73% (обр. 27). ^{206}Pb и $^{206}\text{Pb}^*$ — обыкновенный и радиогенный свинец, н.п.о. — ниже предела определения ($\leq 0,04$). Изотопные отношения и содержания ^{206}Pb скорректированы по измеренному ^{204}Pb . D — дискордантность: $D = 100 \times [\text{возраст } (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / \text{возраст } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rho — коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

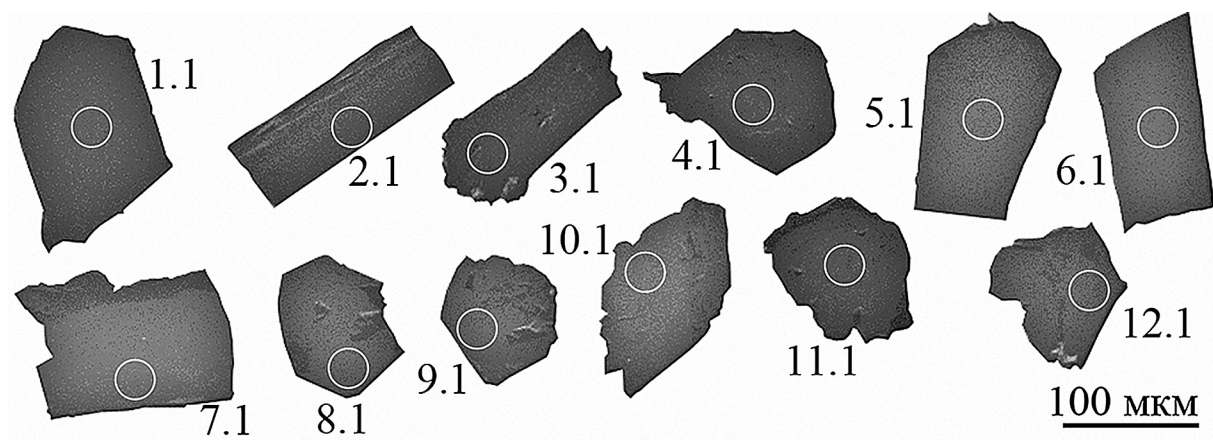


Рис. 4. Катодоллюминесцентное изображение цирконов из монцонаббро (обр. 13)

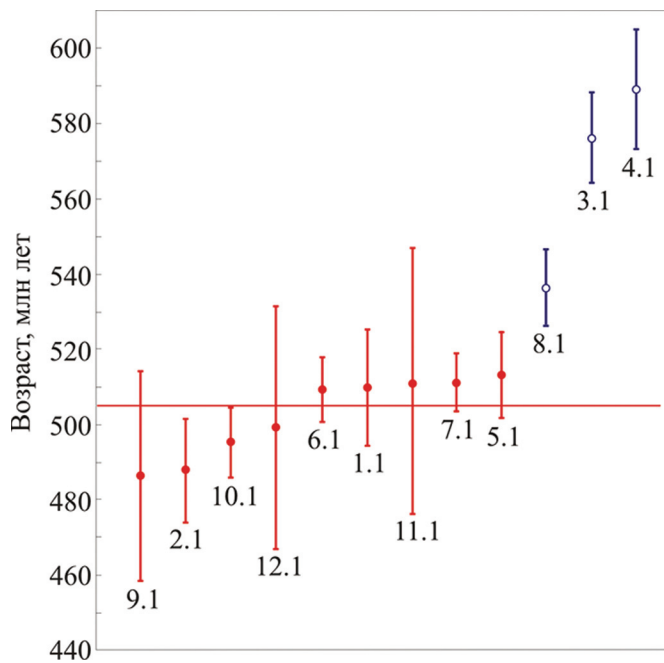


Рис. 5. Значение средневзвешенного $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраста цирконов из монцогаббро (обр. 13) – 505 ± 7 млн. лет (95%, СКВО = 2,3, $n = 9$); бары ошибок для 2σ

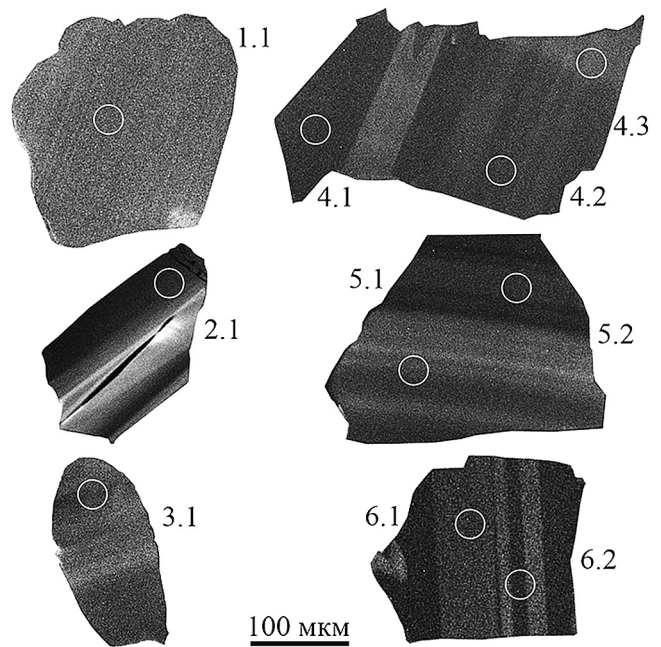


Рис. 6. Католюминесцентное изображение цирконов из лампрофира (обр. 27)

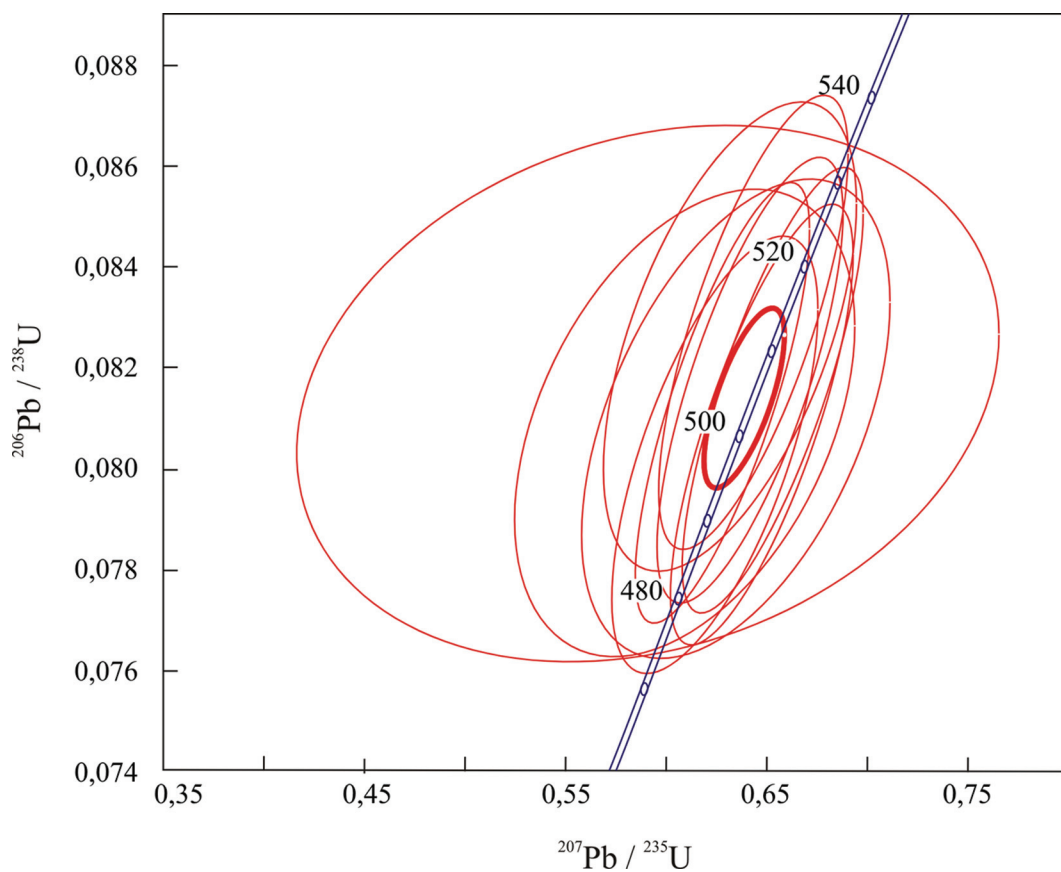


Рис. 7. Диаграмма с конкордией для цирконов из лампрофира (обр. 27); возраст 504 ± 7 млн. лет (2σ , $n = 10$, СКВО = 1,3)

превышающими в некоторых зёрнах 10000 мкг/г. Несмотря на это негативное для датирования обстоятельство, средневзвешенный $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст по девяти зёрнам составляет 505 ± 7 млн. лет (рис. 5).

Возраст лампрофиров определён по цирконам из обр. 27. Они представлены полупрозрачными бесцветными и розоватыми обломками призматических зёрен размером 220—400 мкм, K_u 1,4—2,2. В катодолюминесцентном изображении (рис. 6) цирконы имеют весьма слабое свечение, до тёмного в зёрнах 4 и 6. Для всех зёрен характерны элементы грубой магматической зональности. Признаков постмагматических изменений не наблюдается, границы обломков чёткие, не окатанные.

U-Pb измерения проведены в десяти точках шести зёрен (таблица). Независимо от локализации аналитических кратеров индивидуальные значения $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраста находятся в узком интервале 498—513 млн. лет, средневзвешенный конкордантный возраст составляет 504 ± 7 млн. лет (рис. 7).

Таким образом, в результате проведённых исследований по U-Pb датированию единичных кристаллов циркона из магматических пород п-ова Каннин установлена возрастная последовательность их формирования. Возраст гранитов 883 ± 16 млн. лет, что соответствует началу позднего рифея, а субсинхронное образование пород повышенной щелочности происходило в позднем кембрии. Возраст монцогаббро составляет 505 ± 7 млн. лет, лампрофиров — 504 ± 7 млн. лет.

Полученные значения возрастов отличаются от таковых однотипных пород Северного Тимана, отделённого от юго-восточной оконечности п-ова Каннин горловиной Чёской губы шириной 55 км. Так, U-Pb (SIMS) возраст цирконов из сиенитов массива Большой Румяничный составляет 613 ± 7 млн. лет [19], массива Крайний Камешек — 602 ± 5 млн. лет, массива Малый Камешек — 599 ± 16 млн. лет [2]. Сопоставимыми значениями возраста характеризуются цирконы из жильных гранитов (609 ± 13 млн. лет) в пределах сиенитового массива Большой Румяничный и из субщелочных гранитов массива Большой Камешек 618 ± 5 млн. лет [1]. На Северном Тимане имеются и более древние границы массива Сопки Каменные с возрастом 727 ± 6 млн. лет [1], но они также не могут быть скоррелированы по возрасту с каннинскими гранитами. Все это свидетельствует об автономном развитии тектонических блоков Тиманской гряды в позднем рифее—кембрии, на что указывает и то, что на Северном Тимане граниты перекрыты нижнесилурийскими, а на п-ове Каннин — нижнепермскими известняками.

Авторы выражают благодарность М.А. Коблу за помощь при проведении исследований цирконов на ионном зонде SHRIMP-RG.

Работа выполнена по теме госзадания ГР № АААА-А17-117121270035-0 ИГ Коми НЦ УрО РАН, при частичной финансовой поддержке Комплексной программы УрО РАН, проект 18-5-5-46.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреичев В.Л., Соболева А.А., Удоратина О.В., Кобл М.А., Миллер Э.Л. Rb-Sr и U-Pb изотопно-геохронометрические системы в гранитоидах Северного Тимана // Граниты и эволюция Земли: мантия и кора в гранитообразовании. Материалы III международной геологической конференции. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. С. 19—21.
2. Андреичев В.Л., Соболева А.А., Удоратина О.В. Изотопно-геохронометрические системы в сиенитах Северного Тимана // Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород. Материалы VII Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ИГЕМ РАН, 2018. С. 20—22.
3. Гецен В.Г., Андреичев В.Л., Беляев В.В., Костюхин М.Н. Геологическая эволюция и минералогия Тимана. Сыктывкар: Коми фил. АН СССР, 1985. 24 с.
4. Ивенсен Ю.П. Магматизм Тимана и полуострова Каннин. М.-Л.: Наука, 1964. 126 с.
5. Костюхин М.Н., Степаненко В.И. Байкальский магматизм Канино-Тиманского региона. Л.: Наука, 1987. 232 с.
6. Кузнецов Н.Б. Комплексы протоуралид-тиманид и позднекембрийско-раннепалеозойская эволюция восточного и северо-восточного обрамления Восточно-Европейской платформы. Автореферат дис. ... док. геол.-мин. наук. М.: ИФЗ РАН, 2009. 49 с.
7. Люткиевич Е.М. Геология Канина полуострова. М.-Л.: Гостехиздат, 1953. 95с.
8. Мальков Б.А. Эссекитовые долериты полуострова Каннин // Геохимия, минералогия и петрография севера Урала и Тимана. Сыктывкар: Ин-т геологии Коми фил. АН СССР, 1968. С. 29—34.
9. Мальков Б.А., Пучков В.Н. Стратиграфия и структура метаморфических толщ полуострова Каннин и Северного Тимана // Вопросы геологии северо-востока Русской платформы, Печорского Урала и полуострова Каннин. Сыктывкар: Коми книжное изд-во, 1964. С. 46—56.
10. Оловянишников В.Г. Геологическое развитие Северного Тимана и п-ова Каннин. Сыктывкар: Геопринт, 2004. 80 с.
11. Пучков В.Н. Уралиты и тиманиды, их структурные связи и место в геологической истории Урало-Монгольского складчатого пояса // Геология и геофизика. 2003. № 1/2. С. 28—39.
12. Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
13. Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Чумаков Н.М. Изотопный возраст общих стратиграфических подразделений верхнего протерозоя (рифей и венда) России: эволюция взглядов и современная оценка // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23. № 6. С. 16—27.
14. Шатский Н.С. О тектонике Восточно-Европейской платформы // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1937. Т. 15. Вып. 1. С. 4—27.
15. Barth A.P., Wooden J.L. Coupled elemental and isotopic analyses of polygenetic zircons from granitic rocks by ion microprobe, with implications for melt evolution and the sources of granitic magmas. Chem. Geol. 2010. V. 277. P. 149—159.
16. Barth A.P., Tani K., Meffre S., Wooden J.L., Coble M.A., Arculus R.J., Ishizuka O., Shukle J.T. Generation of silicic melts in the early Izu-Bonin arc recorded by detrital zircons in proximal arc volcanoclastic rocks from the Philippine Sea. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2017. V. 18. P. 3576—3591.
17. Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Aleinikoff J.N., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology // Chem. Geol. 2003. V. 200. P. 155—170.
18. Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Alekseev A.S., Romanyuk T.V. New data on detrital zircons from the sandstones of Lower Cambrian Brusov Formation (White-Sea region, East-European craton): unraveling the timing of the onset of the Arctida-Baltica collision // International Geology Review. 2014. V. 56. № 16. P. 1945—1963. DOI: 10.1080/00206814.2014.977968.

19. Larionov A.N., Andreichev V.L., Gee D.G. The Vendian alkaline igneous suite of northern Timan: ion microprobe U–Pb zircon ages of gabbros and syenite // *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica* / D.G. Gee, V. Pease (eds). Geol. Soc. Memoir. N 30. London, 2004. P. 69–74.
 20. Ludwig K.R. ISOPLLOT for MS-DOS: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data, for IBM-PC compatible computers, version 2.00 // USGS Open-File Report 88–557. 1990. 38 p.
 21. Ludwig K.R. SQUID 1.02 – A User's manual // Berkeley Geochronology Center, Special Publication. N. 4. 2001. 19 p.
 22. Ludwig K.R. User's Manual for Isoplot 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronology Center, Special Publication. N 4. 2003. 74 p.
 23. The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica / D.G. Gee & V. Pease (eds) // Geological Society, London, Memoirs. 2004. N 30. 252 p.
 24. Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses // *Geostandards Newsletter*. 1995. V. 19. P. 1–23.
 25. Williams I.S. U–Th–Pb geochronology by Ion Microprobe. In: McKibben M.A., Shanks III W.C. and Ridley W.I. (eds.) *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes* // *Reviews in Economic Geology*. 1998. V. 7. P. 1–35.
- ### REFERENCES
1. Andreichev V.L., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Coble M.A., Miller E.L. Rb–Sr i U–Pb izotopno-geohronometricheskie sistemy v granitoidah Severnogo Timana [Rb–Sr and U–Pb isotope-geochronometric systems in the granitoids of the Northern Timan]. *Materialy III mezhdunarodnoj geologicheskoy konferencii «Granity i jevoljucija Zemli: mantija i kora v granitobrazovanii»* [Proc. III Int. Geological Conference «Granites and evolution of the Earth: mantle and crust in granite formation»]. Ekaterinburg, IGG UB RAS Publ., 2017, pp. 19–21. (In Russian).
 2. Andreichev V.L., Soboleva A.A., Udoratina O.V. Izotopno-geohronometricheskie sistemy v sienitah Severnogo Timana [Isotope-geochronometric systems in syenites of the Northern Timan]. *Materialy VII Rossijskoj konferencii po izotopnoj geohronologii «Metody i geologicheskie rezul'taty izucheniya izotopnyh geohronometricheskikh sistem mineralov i porod»* [Proc. VII Russian Conference on isotope geochronology «Methods and geological results of studying isotope geochronometric systems of minerals and rocks»]. Moscow, IGG UB RAS Publ., 2018, pp. 20–22. (In Russian).
 3. Gecen V.G., Andreichev V.L., Beljaev V.V., Kostjulin M.N. *Geologicheskaja jevoljucija i mineragenija Timana* [Geological evolution and minerageny of Timan]. Syktyvkar, Komi branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1985, 24 c. (In Russian).
 4. Ivensen Ju.P. *Magmatizm Timana i poluostrova Kanin* [Magmatism of Timan and Kanin Peninsula]. Moscow, St. Petersburg, Nauka Publ., 1964, 126 p. (In Russian).
 5. Kostjulin M.N., Stepanenko V.I. *Bajkal'skij magmatizm Kanino-Timanskogo regiona* [Baikalian magmatism of the Kanin-Timan region]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1987, 232 p. (In Russian).
 6. Kuznetsov N.B. *Kompleksy protouralid-timanid i pozdnedokembrijsko-rannepaleozojskaja jevoljucija vostochnogo i severo-vostochnogo obramlenija Vostochno-Evropejskoj platformy. Diss. dokt. geol.-miner. nauk* [Complexes of Protouralides-Timanides and Late Precambrian to Early Paleozoic evolution of the eastern and northeastern framing of the East European Platform. Dr. geol. and miner. sci. diss.]. Moscow, IPE RAS Publ., 2009, 49 p. (In Russian).
 7. Ljutkevich E.M. *Geologija Kanina poluostrova* [Geology of the Kanin Peninsula]. Moscow, St. Petersburg, State Scientific and Technical Publ. of Petroleum and Mining Fuel Literature, 1953, 95 p. (In Russian).
 8. Mal'kov B.A. Jesseksitovyje dolerity poluostrova Kanin [Essexite dolerites of the Kanin peninsula]. *Trudy IG Komi filiala akademii nauk SSSR «Geohimija, mineralogija i petrografija severa Urala i Timana»* [Proc. of the IG Komi Branch USSR Academy of Sciences «Geochemistry, mineralogy and petrography of the north of the Urals and Timan»]. Syktyvkar, pp. 125–130. (In Russian).
 9. Mal'kov B.A., Puchkov V.N. Stratigrafija i struktura metamorficheskikh tolshh poluostrova Kanin i Severnogo Timana [Stratigraphy and the structure of the metamorphic sequences of the Kanin Peninsula and Northern Timan]. *Trudy Komi filiala akademii nauk SSSR «Voprosy geologii severo-vostoka Russkoj platformy, Pechorskogo Urala i poluostrova Kanin»* [Proc. of the Komi Branch USSR Academy of Sciences «Questions of the geology of the northeast of the Russian Platform, the Pechora Urals and the Kanin Peninsula»]. Syktyvkar, Komi Publ., 1964, pp. 46–56. (In Russian).
 10. Olovyanshnikov V.G. *Geologicheskoe razvitiye Severnogo Timana i p-ova Kanin* [The geological evolution of the Northern Timan and Kanin Peninsula]. Syktyvkar, Geoprint Publ., 2004, 80 p. (In Russian).
 11. Puchkov V.N. Uralidy i timanidy, ikh strukturnye svyazi i mesto v geologicheskoy istorii Uralo-Mongol'skogo skladchatogo poyasa [Uralides and Tymanides, their structural links and place in the geological history of the Ural-Mongolian fold belt]. *Geologiya i geofizika* [Geology and geophysics], 2003, no. 1/2, pp. 28–39. (In Russian).
 12. Puchkov V.N. *Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii)* [Geology of the Urals and the Cis-Urals (actual issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa, DizaynPoligrafServis Publ., 2010, 280 p. (in Russian).
 13. Semikhatov M.A., Kuznetsov A.B., Chumakov N.M. Izotopnyy vozrast obshchikh stratigraficheskikh podrazdeleniy verkhnego proterozoya (rifeya i venda) Rossii: evolyutsiya vzglyadov i sovremennaya otsenka [The isotopic age of the general stratigraphic subdivisions of the Upper Proterozoic (Riphean and Vendian) of Russia: the evolution of views and the modern assessment], *Stratigrafiya. Geol. korrelyatsiya* [Stratigraphy. Geol. correlation], 2015, vol. 23, no. 6, pp. 16–27. (In Russian).
 14. Shatskiy N.S. O tektonike Vostochno-Evropeyskoy platformy [On the tectonics of the East European Platform]. *Byull. MOIP. Otd. geol.* [Bull. MOIP. Otd. geol.], 1937, vol. 15, no. 1, pp. 4–27.
 15. Barth A.P., Wooden J.L. Coupled elemental and isotopic analyses of polygenetic zircons from granitic rocks by ion microprobe, with implications for melt evolution and the sources of granitic magmas. *Chem. Geol.*, 2010, vol. 277, pp. 149–159.
 16. Barth A.P., Tani K., Meffre S., Wooden J.L., Coble M.A., Arculus R.J., Ishizuka O., Shukle J.T. Generation of silicic melts in the early Izu-Bonin arc recorded by detrital zircons in proximal arc volcanoclastic rocks from the Philippine Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, vol. 18, pp. 3576–3591.
 17. Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Aleinikoff J.N., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U–Pb geochronology. *Chem. Geol.*, 2003, vol. 200, pp. 155–170.
 18. Kuznetsov N.B., Belousova E.A., Alekseev A.S., Romanyuk T.V. New data on detrital zircons from the sandstones of Lower Cambrian Brusov Formation (White-Sea region, East-European craton): unraveling the timing of the onset of the Arctida-Baltica collision. *International Geology Review*, 2014, vol. 56, no. 16, pp. 1945–1963, DOI: 10.1080/00206814.2014.977968.
 19. Larionov A.N., Andreichev V.L., Gee D.G. The Vendian alkaline igneous suite of northern Timan: ion microprobe U–Pb zircon ages of gabbros and syenite. *Geol. Soc. Memoirs «The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica»*. D.G. Gee, V. Pease (eds). London, 2004, no 30, pp. 69–74.
 20. Ludwig K.R. ISOPLLOT for MS-DOS: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data, for IBM-PC compatible computers, version 2.00. *USGS Open-File Report 88–557*, 1990, 38 p. Available at: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr88557> (Accessed 2 February 2012).
 21. Ludwig K.R. SQUID 1.02 – A User's manual. *Berkeley Geochronology Center*, Special Publication, no. 4, 2001, 19 p.
 22. Ludwig K.R. User's Manual for Isoplot 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center*, Special Publication, no 4, 2003, 74 p.
 23. The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica. D. G. Gee & V. Pease (eds). *Geological Society Memoirs*. London, 2004, no. 30, 252 p.
 24. Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 1995, vol. 19, pp. 1–23.
 25. Williams I.S. U–Th–Pb geochronology by Ion Microprobe. *Reviews in Economic Geology «Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes»*. McKibben M.A., Shanks III W.C. and Ridley W.I. (eds.), 1998, vol. 7, pp. 1–35.

ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ,
МЕТОДИКА ИХ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 553.32

О ПРИРОДЕ ОКСИДНЫХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ РУД ОКЕАНА

В.В. АВДОНИН¹, Е.А. ЖЕГАЛЛО², Н.Е. СЕРГЕЕВА¹

*¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
1, Ленинские горы, Москва 119991, Россия
e-mail: avdonin@geol.msu.ru, nat@geol.msu.ru*

*²Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН
123, Профсоюзная ул., Москва 117647, Россия
e-mail: ezheg@paleo.ru*

Оксидные руды океана — кобальтоносные корки (КМК) и железомарганцевые конкреции (ЖМК) имеют бактериальную природу и идентифицируются как строматолиты и онколиты. Столбчатые структуры железомарганцевых строматолитов и фестончатые онколитов представляют собой бактериальные маты, образованные чередованием фоссилизированных бактериальных пленок. Возникновение рудообразующих видов прокариотного семейства и их эволюция определяются крупными биосферными событиями. На примере КМК Магеллановых гор и ЖМК провинции Клариян-Клиппертон выявлены основные этапы эволюции структурных форм бактериальных сообществ. Показано, что смена этапов обусловлена влиянием крупных тектонических, вулканических и других геологических событий.

Ключевые слова: оксидные руды; строматолиты; онколиты; бактериальные маты; биопленки.

ON THE NATURE OF OXIDE FERROMANGANESE ORES OCEAN

V.V. AVDONIN¹, E.A. ZHEGALLO², N.E. SERGEEVA¹

*¹Lomonosov Moscow State University
GSP-1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russian Federation
e-mail: avdonin@geol.msu.ru, nat@geol.msu.ru*

*²Borissiak Paleontological Institute of Russian Academy of Sciences
123, Profsoyuznaya street, Moscow 117647, Russia
e-mail: ezheg@paleo.ru*

Oxide ores of the global ocean — cobalt-rich crusts and ferromanganese nodules are of bacterial origin and identified as stromatolites and onkolites. Pillar structure of ferromanganese stromatolites and festoon-shaped structures of onkolites represent the bacterial mats, formed by interbedding of fossilized bacterial biofilms. The appearance of ore-forming types of procaryotic family and their evolution are defined by major biosphere events. On the case study of the ferromanganese nodules of Magellanic mountains and cobalt-rich crusts of the province of the Clarion-Clipperton, the main stages of the evolution of structural forms of bacterial communities have been revealed. It has been shown that the change of phases happened due to the influence of major tectonic, volcanic and other geological events.

Keywords: oxide ores; stromatolites; onkolites; bacterial mats; biofilms.

Оксидные железомарганцевые руды океанского дна представлены двумя самостоятельными формациями. Одна из них — это кобальтоносные корки подводных поднятий, другая — железомарганцевые конкреции абиссальных котловин. Руды обеих формаций близки по химическому и минеральному составам и технологическим характеристикам. Однако существенные различия в особенностях размещения и локализации месторождений и рудных залежей, определяющих условия будущей разработки, технические средства и технологии добычи рудных масс, являются достаточным основанием для выделения рудных объектов каждой формации в отдельный геолого-промышленный тип. Ресурсный потенциал каждого типа огромен [1].

С момента первого обнаружения конкреций и до настоящего времени природа оксидных руд остается загадочной. И это несмотря на то, что и конкреции, и корки чрезвычайно широко распространены на океанском дне и повсюду легко доступны для изучения. А изучением руд более 50 лет (с тех пор, как выяснилась их промышленная значимость) занимаются научные коллективы многих стран мира.

Длительный процесс исследования оксидных руд можно условно разделить на три этапа. В первый этап были получены сведения о пространственном размещении руд, произведена предварительная минералого-геохимическая и технологическая оценки главным образом на макроскопическом уровне. Основным содержанием второго этапа можно считать выделение промышленных объектов — месторождений, рудных залежей, перспективная оценка ресурсов. Изучение состава и строения руд проводилось главным образом на микроскопическом уровне и ограничивалось вниманием к пяти главным компонентам — Mn, Co, Ni, Cu, Mo. На третьем (современном) этапе проводится выделение эксплуатационных участков и блоков, детальная промышленная оценка их. Круг потенциально извлекаемых элементов расширился и охватывает цветные, редкие, благородные металлы.

Методика изучения оксидных руд базируется на использовании современных технических средств. Благодаря этому детальность изучения состава и строения руд поднялась до субмикроскопического уровня.

Детальность изучения оксидных руд прямо отразилась на эволюции представлений об их природе.

На первом этапе господствовали гипотетические предположения, основанные на известных данных о процессах седиментогенеза. Обсуждались возможные источники рудного вещества, предполагаемые механизмы его концентрации.

Второй этап ознаменовался накоплением более детальных сведений о минеральном составе, взаимоотношении минералов, концентрациях и формах вхождения многочисленных примесных ком-

понентов. На микроскопическом уровне конкреции предстали в виде тонкослоистых образований концентрического строения. В этих структурах отчетливо проявлено ритмическое чередование микрослоёв различного состава. Среди микрослоёв толщиной от 10 до 50 мкм были выделены «кристаллические» марганцовистые и «аморфные» железистые [16]. Среднее содержание в марганцовистых слоях Mn более 35, Fe 1,28%; в железистых слоях содержание Mn 19, Fe 17%. Полученные впоследствии результаты микроанализа близки к приведённым данным. Эти обстоятельства послужили поводом использовать механизм автоколебательных реакций для объяснения ритмичного строения руд [11].

Однако известно, что прямое осаждение оксидов железа и марганца из придонных вод невозможно, вследствие низкой концентрации этих компонентов [12].

На современном этапе благодаря использованию микроанализаторов открылась принципиально новая картина строения руд: они предстали в виде совокупности фоссилизированных биоформ различной степени сохранности. Целенаправленное изучение биоформ позволило обосновать бактериальную природу руд. Наиболее убедительные данные о биологической природе оксидных руд (в основном конкреций) впервые были получены китайскими исследователями [14, 15].

Постепенно стало очевидным, что корки и конкреции являются продуктами жизнедеятельности бактериальных сообществ.

В последние годы постепенно сформировалась и успешно развивается биологическая концепция, согласно которой кобальтоносные корки представляют собой железомарганцевые строматолиты, а конкреции — онколиты [4, 14, 15].

Детальное изучение субмикроскопических текстур и структур этих руд, сопоставление наблюдаемых форм с материалами микробиологических и бактериальных палеонтологических исследований позволило обосновать вывод о том, что основой их строения являются бактериальные маты [5, 7—9].

Структурная основа строматолитов КМК — столбчатые образования; основной структурный элемент ЖМК — фестоны. Столбцы корок и фестоны конкреций — это разновидности бактериальных матов. Бактериальные маты сложены закономерно чередующимися горизонтально ориентированными (КМК) или концентрическими (ЖМК) бактериальными плёнками, которые в процессе эволюции приобрели способность окислять двухвалентные соединения железа и марганца и осаждал оксиды металлов в кристаллической или аморфной форме на поверхности клеток и в межклеточном матриксе, в гликокаликсе.

Чередующиеся фоссилизированные биоплёнки бактериальных матов часто сохраняют многие при-

знаки, позволяющие сопоставлять первые с современными биоплёнками. Толщина биоплёнок колеблется в пределах от 0,5 до 1,5 мкм. Биоплёнки представляют собой совокупность микробных клеток, окружённых, а иногда погружённых, в массу внеклеточного полимерного органического вещества — гликокаликса [3]. В них обнаруживается переплетение нитевидных и коккоидных форм бактерий.

Биоплёнки, слагающие строматолитовые бактериальные маты, как и подобные им биоплёнки других видов, в процессе жизнедеятельности представляли собой целостное образование — сообщество микроорганизмов. Экспериментальными исследованиями установлено, что клетки и их структуры в биоплёнках способны получать информацию о пространстве, обмениваться ею с основной массой сообщества и, следовательно, проявлять «согласованное» поведение. Синхронный рост столбцов, образование упорядоченных дендритоподобных построек, скорее всего, является следствием именно этих функций биоплёнок [6, 10, 13].

Упомянутые выше микрослойки это бактериальные маты или их фрагменты, поэтому биоплёнки, слагающие их, тоже подразделяются на марганцовистые и железистые. На современном предельно достигнутом уровне детальности можно попытаться установить природу этого явления. В результате многочисленных наблюдений было установлено, что биоплёнки с более высоким содержанием железа отчетливо выделяются в разрезах бактериальных матов обилием округлых, овальных пор (рис. 1). Именно эти биоплёнки содержат многочисленные скопления нитчатых бактерий. Отверстия — это следы «выхода» бактерий. Кроме того, среди чередующихся биоплёнок часто наблюдаются скопления трихом нитчатых бактерий (рис. 2). Микроаналитические исследования

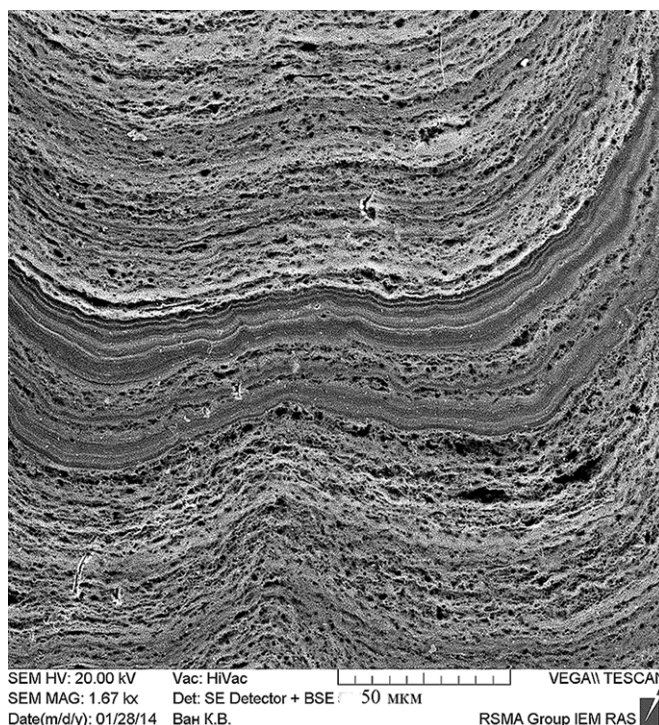


Рис. 1. Бактериальный мат железомарганцевого строматолита, поперечный разрез: чередование однородных «марганцовистых» микрослоев и пористых «железистых»

этих остатков свидетельствуют о том, что они отличаются повышенными концентрациями железа. Несмотря на сравнительно небольшое число микроанализов, закономерности достаточно очевидны. На диаграмме чётко выделяется группа нитчатых бактерий повышенной железистости и вторая группа плотных марганцовистых биоплёнок (рис. 3).

Таким образом, можно констатировать, что «железистость» биоплёнок обусловлена обилием

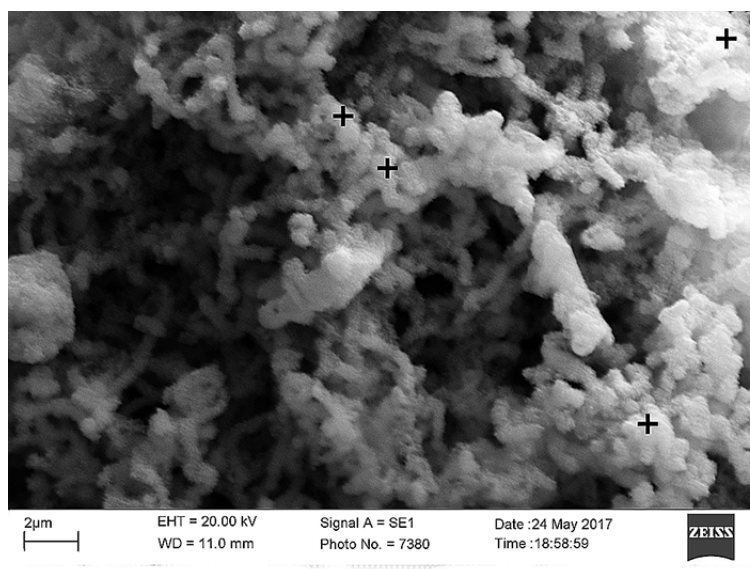


Рис. 2. Трихомы нитчатых бактерий: крестики — точки анализов, отображённых на рис. 3

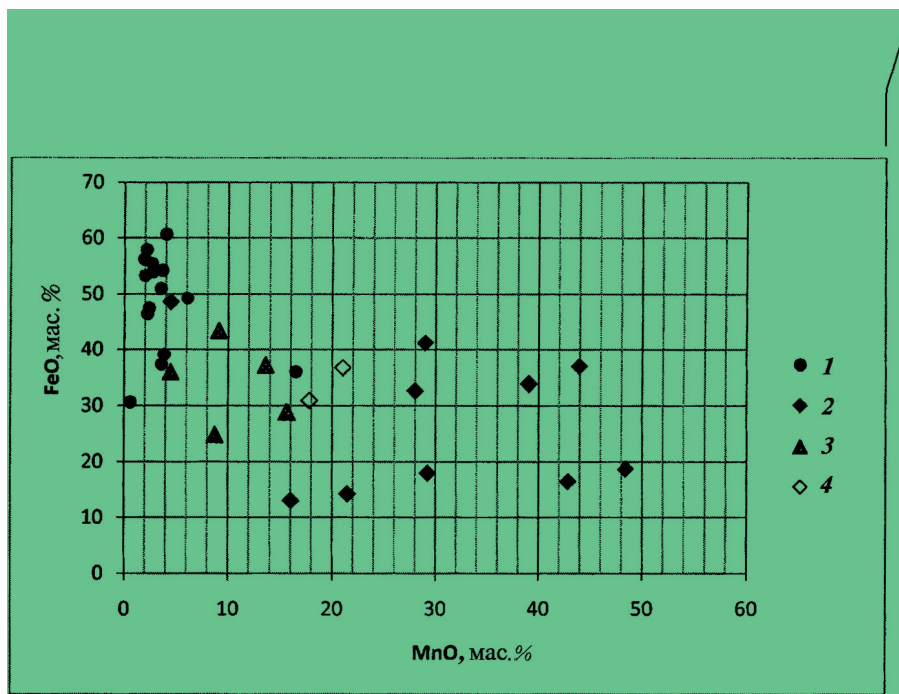


Рис. 3. Диаграмма содержаний марганца и железа в различных биоформах бактериального мата: 1 — нитчатые бактерии, кокки; 2 — плотные участки, 3 — рыхлые участки, содержащие бактерии; 4 — гликокаликс

нитчатых бактерий, а однородные марганцовистые биоплёнки помимо гликокаликса содержат бактерии, усваивающие главным образом марганец.

Нитчатые бактерии в биоплёнках строматолитов выполняют особую роль. Биоплёнки, как основной элемент строения бактериальных матов, обеспечивают взаимодействие бактерий, рост бактериального мата и т. д. Как показано в экспериментах [13], в плёнках нити объединяются в полигональную сеть. Вероятно, подобные явления были свойственны биоплёнкам — строителям строматолитов. Возникавшая в них сеть с центрами роста столбцов определяла полигональную (в плоскости роста) структуру столбцов (рис. 4).

Бактериальные маты конкреций имеют фестончатую форму вследствие того, что конкреции свободно растут в радиальных направлениях от центра. Фестоны часто представлены тесным чередованием фоссилизированных биоплёнок, т. е. матами, подобными матам корок. В отличие от последних в них обычно наблюдаются биоплёнки относительно большой толщины, содержащие помимо бактерий минеральное вещество осадка.

По нашим наблюдениям, зарождение онколитов имело место позднее, чем корок. Согласно геологическим данным они возникли после крупного олигоценового вымирания. Более того, вероятно, онколиты произошли от строматолитов вследствие того, что в критических условиях растущие бактериальные маты приобрели свойства активного взаимодействия с окружающими осадками [1]. Эти процессы сыграли определяющую роль в возник-

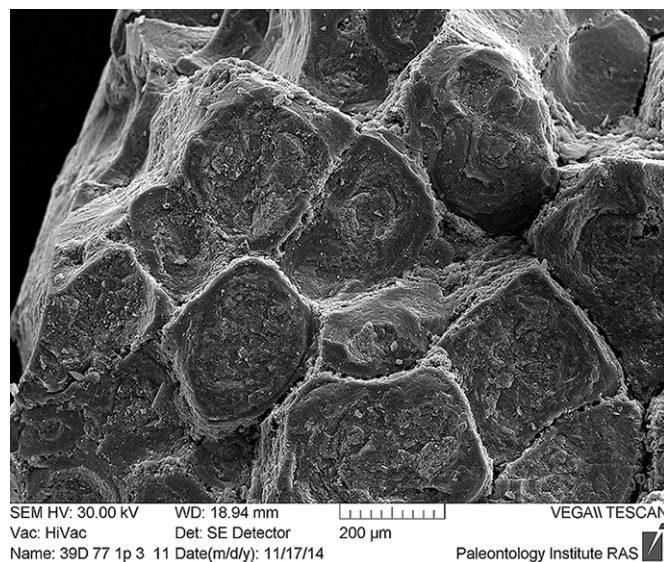


Рис. 4. Полигональная форма поперечных сечений тесно сомкнутых столбцов строматолита

новении онколитов из биоплёнок коркового типа [2].

Итак, эволюция структурных форм железомарганцевых строматолитов проявлена в двух направлениях. Одно зафиксировано последовательной сменой морфологических типов столбчатых образований в разрезах корок, второе связано с возникновением на определённой стадии онколитов, выработавших свойство постоянного активного взаимодействия с окружающим осадком.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдонин В.В., Кругляков В.В., Лыгина Т.И., Мельников М.Е., Сергеева Н.Е. Оксидные железомарганцевые руды океана: генетическая интерпретация текстур и структур. М.: ГЕОС, 2014. 163 с.
2. Авдонин В.В., Еремин Н.И., Мельников М.Е., Сергеева Н.Е. Мезокайнозойский железомарганцевый рудогеenez Мирового океана // Докл. РАН. 2013. Т. 456. № 6. С. 1–3.
3. Авдонин В.В., Жегалло Е.А., Сергеева Н.Е. Микро-строение железомарганцевых строматолитов и онколитов океанского дна // Известия вузов. Геология и разведка. 2016. № 2. С. 27–32.
4. Авдонин В.В., Сергеева Н.Е., Ван К.В. Закономерности роста железомарганцевых конкреций провинции Кларин-Клиппертон (Тихий океан) // Известия вузов. Геология и разведка. 2013. № 4. С. 17–20.
5. Бактериальная палеонтология / Под ред. А.Ю. Розанова. М.: Изд-во ПИН РАН, 2002. 188 с.
6. Грузина В.Д. Коммуникативные сигналы бактерий // Антибиотики и химиотерап. 2003. Т. 48 (10). С. 32–39.
7. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2003. 348 с.
8. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / Научные редакторы А.Ю. Розанов, Г.Т. Ушатинская. М.: Изд-во ПИН РАН, 2011. 172 с.
9. Исследования марганцевой и железомарганцевой минерализации в разных природных обстановках методами сканирующей электронной микроскопии / Научный редактор Г.Н. Батурин, М.: Эслан, 2012. 472 с.
10. Мальцев С.В., Мансурова Г.Ш. Что такое биопленка? // Природная медицина. 2013. №1 (13). С. 86–89.
11. Пунин Ю.О., Сметанникова О.Г., Демидова Г.Е., Смольская Е.С. О динамике формирования океанических железомарганцевых конкреций // Литология и полезные ископаемые. 1995. № 1. С. 40–50.
12. Савенко В.С. Физико-химический анализ процессов формирования железомарганцевых конкреций в океане. М.: ГЕОС, 2004. 156 с.
13. Сумина Е.Л., Сумин Д.Л. Морфогенез в сообществе нитчатых цианобактерий // Онтогенез. 2013. Т. 44. № 3. С. 203–220.
14. Hu Wenxuan, Zhou Huayang, Gu Lianxing at al. New evidence of microbe origin for ferromanganese nodules from the East Pacific deep sea floor // Scie. in China. (Ser. D. 2000. Vol. 43, N 2. P. 187–193.
15. Qi, Pan Jianming & Zhang Haisheng. 2000. New evidence of microbe origin for ferromanganese nodules from the East Pacific deep sea floor // Scie. in China (Series D). Vol. 43. No.2. April. P. 187–193.
16. Sore m R.K., Fewkes R.H. Manganese nodules, Research data and methods of Investigation. N.Y.: Plenum, 1979. 723 p.

REFERENCES

1. Avdonin V.V., Krugljakov V.V., Lygina T.I., Mel'nikov M.E., Sergeeva N.E. *Ocean iron-manganese oxide ores: genetic interpretation of textures and structures*. M., GEOS Publ, 2014, 163 p. (In Russian)
2. Avdonin V.V., Eremin N.I., Mel'nikov M.E., Sergeeva N.E. Meso-Cenozoic Ferromanganese Ore-Genesis in the World Ocean. *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 456, no. 6, pp. 1–3. (In Russian)
3. Avdonin V.V., Zhegallo E.A., Sergeeva N.E. Microstructure of iron-manganese stromatolites and ocean floor oncoliths. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration]*, 2016, no. 2, pp. 27–32. (In Russian)
4. Avdonin V.V., Sergeeva N.E. Van K.V. Regularities of growth of iron-manganese nodules in the province of Clarion-Clipperton (Pacific ocean). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration]*. 2013, no. 4, pp. 17–20. (In Russian)
5. Bacterial paleontology. Ed. by A. Rozanov. M., Publishing house of PIN RAS, 2002, 188 p. (In Russian)
6. Gruzina V.D. Communication signals of bacteria. *Antibiotics and chemotherapy*. 2003, vol. 48 (10), pp. 32–39. (In Russian)
7. Zavarzin A.G. *Lectures on natural history of Microbiology*. M., Nauka Publ., 2003, 348 p. (In Russian)
8. *Fossil bacteria and other microorganisms in earth rocks and astromaterials*. Ed. A. Rozanov, G.T. Ushatinskaya. M., Publishing house of PIN RAS, 2011, 172 p. (In Russian)
9. *Research of manganese and iron-manganese mineralization in different natural environments by scanning electron microscopy*. Ed. G.N. Baturin, M., Eslan Publ., 2012, 472 p. (In Russian)
10. Mal'cev S.V., Mansurova G.Sh. What is biofilm? *Natural medicine*, 2013, no. 1 (13), pp. 86–89. (In Russian)
11. Punin Ju.O., Smetannikova O.G., Demidova G.E. On the dynamics of formation of oceanic iron-manganese nodules. *Lithology and minerals*. 1995, no. 1, pp. 40–50. (In Russian)
12. Savenko V.S. *Physical and chemical analysis of the processes of formation of iron-manganese nodules in the ocean*. M., GEOS Publ., 2004, 156 p. (In Russian)
13. Sumina E. L., Sumin D. L. Morphogenesis in the community of filamentous cyanobacteria. *Ontogenesis*, 2013, vol. 44, no. 3, pp. 203–220. (In Russian)
14. Hu Wenxuan, Zhou Huayang, Gu Lianxing at al. New evidence of microbe origin for ferromanganese nodules from the East Pacific deep sea floor. *Scie. in China*. (Ser. D.), 2000. vol. 43, no. 2. pp. 187–193.
15. Qi, Pan Jianming & Zhang Haisheng. 2000. New evidence of microbe origin for ferromanganese nodules from the East Pacific deep sea floor. *Scie. in China* (Series D), vol. 43. no. 2, April. pp. 187–193.
16. Sorem R.K., Fewkes R.H. *Manganese nodules, Research data and methods of Investigation*. N.Y.: Plenum, 1979, 723 p.

О ДРЕВНИХ ИСТОЧНИКАХ АЛМАЗОВ В РОССЫПЯХ

Н.Н. ЗИНЧУК

*Западно-Якутский научный центр АН РС (Я)
16, Чернышевское шоссе, г. Мирный 678175, Россия
e-mail: nnzinchuk@ramber.ru*

Обобщение фактического материала по комплексному изучению алмаза позволило получить новые данные по особенностям его состава и распространения в современных и древних отложениях основных алмазоносных районов Лено-Анабарской, Центрально-Сибирской и Тунгусской субпровинций. На северо-востоке Сибирской платформы наиболее интересен район Кютюнгинского грабена и прилегающих к нему территорий, перспективных на открытие богатых кимберлитовых тел со специфическими алмазами. Особое внимание уделено Центрально-Сибирской субпровинции, где показано, что область развития отдельных макроассоциаций алмаза ограничивается конкретным алмазоносным районом, в пределах которого развиты комплексы разновозрастных терригенных и прибрежно-морских верхнепалеозойских и мезозойских отложений. Комплекс особенностей алмазов из россыпей описываемой платформы по морфологии, окраске, твёрдым включениям, внутреннему строению, фотолюминесценции и примесному составу свидетельствует о множественности первоисточников и наличии в пределах многих алмазоносных районов ещё не открытых кимберлитовых тел. Важное значение имеет использование типоморфных особенностей кристаллов для восстановления экзогенной истории алмазов на пути от коренных источников до мест современного нахождения в россыпях, для палеогеографических реконструкций распространения древних продуктивных толщ и выяснений направлений сноса алмазоносного материала. Установленная в отдельных алмазоносных районах близость типоморфных особенностей алмазов в осадочных толщах этих возрастов свидетельствует о формировании вторичных коллекторов за счет размыва более древних (в том числе докембрийских) продуктивных толщ или среднепалеозойских коренных источников. Отмечена полигенность минералогических ассоциаций алмазов из разновозрастных россыпей в пределах отдельных алмазоносных районов, что можно использовать при прогнозировании и поисках коренных источников минерала.

Ключевые слова: верхнепалеозойские и мезозойские отложения; Сибирская платформа; алмаз; алмазоносные россыпи.

ABOUT ANCIENT SOURCES OF DIAMONDS PLACERS

N.N. ZINCHUK

*West-Yakutian Scientific Centre of RS (Y) AS
16, Chernischevski highway, Mirny 678175, Yakutiya, Russia
nnzinchuk@rambler.ru*

Basing on generalization of large actual material on complex investigation of diamond, its characteristic in Upper Paleozoic and Mesozoic sedimentary thick layers of the Siberian platform has been provided. It has allowed receiving new data on composition features and distribution of diamond in recent sediments of main diamondiferous regions of Lena-Anabar, Central-Siberian and Tunguskaya sub-provinces. On the north-east of Siberian platform, the region of Kutyungdinsky graben and nearby territories, perspective for the discovery of rich kimberlite bodies with specific diamonds, are of the most interest. Special attention has been paid to the Central-Siberian sub-province, where it has been convincingly shown that the area of development of individual diamond macro-associations is limited by a specific diamondiferous region, within which complexes of different in age terrigenous and coastal Upper Paleozoic and Mesozoic sediments are developed. The complex of features of diamonds from placers of the described platform testifies by morphology, coloration, hard inclusions, internal structure, photoluminescence and admixture composition about plurality of primary sources and availability of still undiscovered kimberlite bodies within many diamondiferous regions. Application of typomorphic features of crystals for restoration of exogenous history of diamonds on the path from primary sources to the sites of modern allocation in placers, as well as for paleogeographical reconstructions of distribution of ancient productive thick layers and clarification of diamondiferous material drift direction, has a significant importance. Proximity of typomorphic features of diamonds in sedimentary thick layers of these ages, identified in some diamondiferous regions, testifies about formation of these collectors due to washout of more ancient productive layers or Middle Paleozoic primary sources. Polygeny of mineralogical associations of diamonds from different in age placers within some diamondiferous regions has been noted, which may be successfully used when forecasting and prospecting primary sources of the mineral.

Keywords: Upper Paleozoic and Mesozoic sediments; Siberian platform; diamond and diamondiferous placers.

При изучении алмазных россыпей очень важно наряду с оценкой полезного компонента определять генетические характеристики кристаллов, разделяя их поставщики и по возрастным признакам. Проявления докембрийской продуктивности установлены для многих алмазоносных регионов мира [1, 6—13, 16, 17]. При этом число известных коренных источников алмазов докембрийского возраста достаточно ограничено [15]. Это связано с рядом причин: перекрытием древних коренных источников более молодыми отложениями; возможной большой величиной эрозионного среза, из-за которой на уровне верхней эрозии тел могут обнажаться лишь незначительные по площади корневые части; возможной сильной измененностью первичных пород либо их необычным составом и т. д. Более широко представлены докембрийские россыпи алмазов [1, 12]. Во многих случаях алмазы этих россыпей имеют высокое качество, благодаря чему такие алмазопоявления являются рентабельными даже при невысоком содержании алмазов. Докембрийские алмазоносные формации мира обоснованы по комплексу «признаков древности» алмазов, включающих: а) своеобразный морфологический спектр алмазов, характеризующийся преобладанием округлых ромбододекаэдров, а также повышенное по сравнению с фанерозойскими источниками количество кубоидов; б) наличие скрытокристаллических разновидностей алмаза — карбонадо и балласов, присущих только месторождениям докембрийского возраста; в) зелёная окраска поверхностного слоя кристаллов и присутствие зелёных и бурых пятен пигментации, причиной появления которых является радиационное облучение алмазов в природных условиях и нагрев, вследствие которого зеленые пятна пигментации становятся коричневыми; г) наличие алмазов, инкрустированных кварцем или заключённых в оболочку из мелкокристаллического кварца, претерпевших метаморфизм вмещающих пород; д) значительный механический износ, выраженный в появлении выколов, серповидных и кольцевых трещин, ромбической сеточки трещин на поверхности кристаллов; е) повышенная крупность и высокое качество алмазов как результат сортировки при формировании древних прибрежно-морских россыпей; ж) ожелезнение кристаллов по поверхностным микротрещинам, вплоть до образования гематитовых оболочек и примазок оксидов марганца, свидетельствующее о пребывании алмазов в условиях корообразования [5—9]. Комплекс «признаков древности» сыграл большую роль в двух отношениях: а) им впервые была показана специфика докембрийской алмазоносности; б) он дал возможность выделять среди алмазов фанерозойских (в том числе современных) россыпей алмазы, перетолженные из докембрийских россыпей. К числу важнейших признаков происхождения алмазов

из докембрийских источников указано тяготение повышенных концентраций алмазов с «признаками древности» к выступам докембрийского фундамента древних платформ — на Сибирской платформе (СП) это Алданский и Анабарский щиты (рис. 1), Оленекское и Уджинское поднятия в Якутской алмазоносной провинции (ЯАП), а также Енисейский кряж.

Исследованиями показана полезность данных критериев для выделения алмазов, потенциально связанных с докембрийскими источниками, хотя все они относятся к категории косвенных [8]. По отдельности большинство из них свойственно и алмазам из россыпей, сформированным за счёт фанерозойских источников [9]. За последнее время существенно расширился феноменологический и концептуальный базис для оценки перспектив докембрийской алмазоносности. По результатам изучения россыпей северо-востока СП обосновано [1, 8, 11—13] наличие в них групп алмазов (рис. 2 и 3), полностью отсутствующих в фанерозойских кимберлитах, V и VII разновидности по классификации Ю.Л. Орлова [14] или содержащихся в кимберлитах в несопоставимо меньших количествах, чем в россыпях (II разновидность, скрытоламинарные округлые ромбододекаэдровиды бразильского или уральского типа). Эти обстоятельства, а также необычность некоторых особенностей (изотопически легкий состав углерода алмазов V и VII разновидностей, преобладание кристаллов эклогитовых парагенезисов, высокая степень механического износа, недостижимая в фанерозойских условиях россыпеобразования и ряд других) позволили предполагать [3, 8] происхождение алмазов из докембрийских источников двух типов: а) тип кимберлитов или лампроитов, из которых могут происходить округлые ромбододекаэдровиды; б) неизвестные типы источников, из которых происходят алмазы V, VII и II разновидностей [9—10]. Алмазы V и VII разновидностей распространены только в россыпях северо-востока СП, что даёт основание предполагать эндемичность их источников. Все потенциально докембрийские алмазы могли пройти через протерозойские прибрежно-морские россыпи. Это обстоятельство, а также более поздние физико-химические изменения, обусловили уменьшение или полное уничтожение индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) коренных источников алмазов. Достоверно не выделены минералы — парагенетические или парастерические спутники этих алмазов, а кимберлитовые минералы (гранаты, пикроильмениты и хромшпинелиды) происходят из молодых кимберлитов и являются лишь гидравлическими попутчиками потенциально докембрийских алмазов [1, 15]. Несмотря на гипотетический характер указанных предпосылок докембрийской алмазоносности, они позволяют непротиворечиво соединить данные по алмазонос-

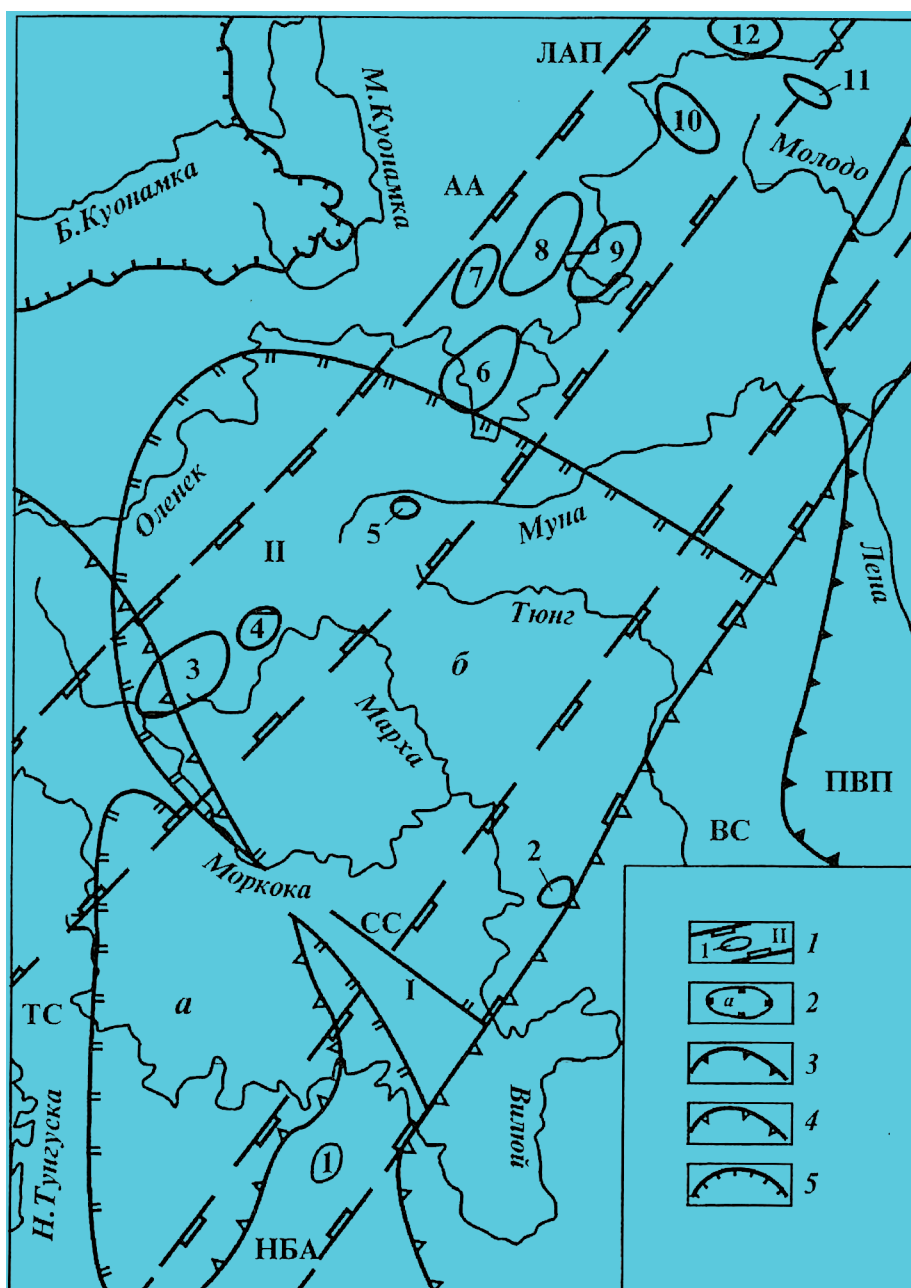


Рис. 1. Структурно-тектоническая схема Якутской кимберлитовой провинции (по Ф.Ф. Брахогелю [8] с дополнениями автора): I – минерогенические зоны: I – Вилуйско-Мархинская, II – Далдыно-Оленекская; кимберлитовые поля: 1 – Мирнинское, 2 – Накынское, 3 – Алакит-Мархинское, 4 – Далдынское, 5 – Мунское, 6 – Чомурдахское, 7 – Западно-Укукитское, 8 – Восточно-Укукитское, Огонер-Юряхское, 10 – Мерчимденское, 11 – Толуопское, 12 – Куойское; 2 – архей кратоны: а – Ботуобинский, б – Тюнгский; 3 – границы прогибов (ПВП – Предверхоанский, ЛАП – Лено-Анабарский); 4 – границы синеклиз (ВС – Вилуйская, ТС – Тунгуская); антеклиз (НБА – Непско-Ботуобинская, АА – Анабарская) и Сюгджерской седловины; 5 – граница выходов кристаллических пород фундамента на поверхность

ности СП, не находящие объяснения в концепции исключительно фанерозойской или только кимберлитовой продуктивности, и расширить представления о структурно-тектонической позиции россыпей и россыпепроявлений потенциально докембрийских алмазов.

Распределение алмазов из предполагаемых типов докембрийских коренных источников СП различается весьма значительно. Алмазы V и VII раз-

новидностей распространены только в россыпях северо-востока платформы, причем их суммарное число может достигать [1, 8, 15] половины продукции россыпи (россыпи р. Эбелях). Однако на более южных участках их доля быстро уменьшается и южнее р. Мун алмазы этих разновидностей практически не встречаются. Не обнаружены они и на западном — юго-западном обрамлении Анабар-

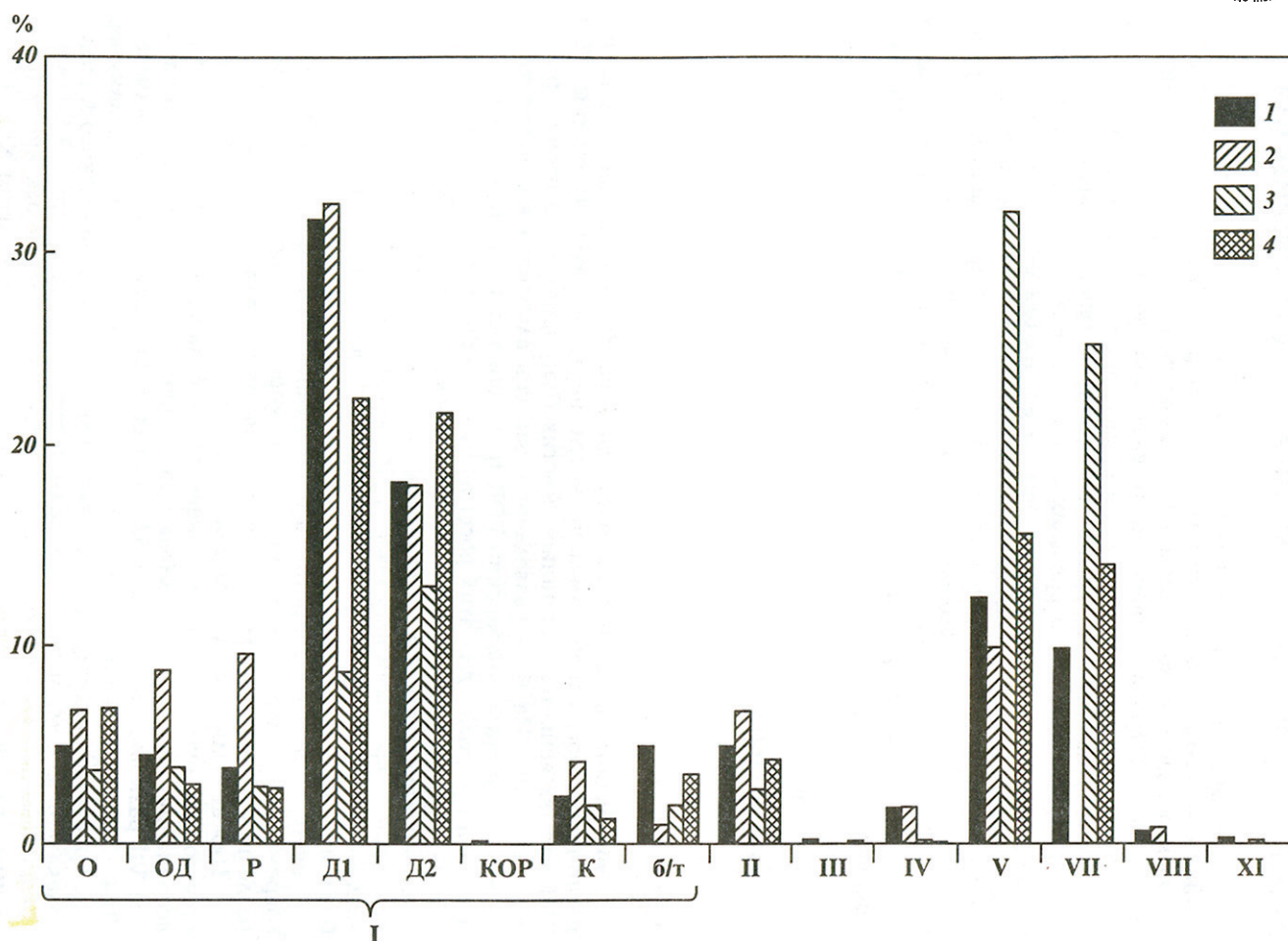


Рис. 2. Типоморфные особенности алмазов из современных россыпей Анабарского алмазоносного района: I–V, VII, VIII, XI — разновидности алмазов, по Ю.Л. Орлову [14] (О — октаэдры, OD — переходные формы, P — ламинарные ромбододекаэдры, D1 — додекаэдры скрытослоистые, D2 — додекаэдры с шагренью, KOP — куборомбододекаэдры, K — кубы, б/т — осколки), 1–4 — поля: 1 — Майат-Уджинское, 2 — Куонапское, 3 — Нижнеэбеляхское (участок Ырас-Юрэх), 4 — Верхнеэбеляхское (участок Исток)



Рис. 3. Алмазы из неоген-современной россыпи Верхний Биллях (Эбеляхское поле)

юге платформы в Иркутской области (рис. 4). В литературе не описаны подобные алмазы в других алмазоносных регионах мира. Имеются описания алмазов V разновидности из различных районов и источников [5–6], однако эти алмазы диагностированы только по физиографическим признакам [3–5], а по комплексу типоморфных особенностей

(изотопный состав углерода, структура, физические особенности) отличаются от аналогичной группы алмазов из россыпей северо-востока СП [8–9]. Это позволяет полагать, что распространённые на северо-востоке СП алмазы V и VII разновидностей принадлежат к одному генетическому типу и являются эндемичными [1, 8].



Рис. 4. Алмазы из современных отложений р. Нижняя Тунгусска



Рис. 5. Алмазы р. Тюнг (Муно-Тюнгский алмазоносный район)

Алмазы II разновидности более распространены и в незначительных количествах их можно обнаружить как в россыпях, так и в фанерозойских кимберлитах в разных частях платформы, однако максимальные концентрации этих алмазов (до 50% от общего количества) также характерны для северо-восточной части платформы, где тяготеют к выступам докембрия. Наиболее широко распространены округлые ромбододекаэдрониды I разновидности, по классификации Ю.Л. Орлова [14]. В переменных количествах они встречаются в россыпях по всей территории платформы, тяготея к выступам докембрия [1, 5, 8]. При этом практически всегда округлые алмазы имеют повышенный размер (крупнее 1 мм), что связано [10–13] с гидравлической сортировкой при формировании протерозойских прибрежно-морских коллекторов, из которых они переотлагались в более молодые отложения. Если в россыпях преобладают мелкие кристаллы (менее 1 мм), шансы встретить среди них округлые потенциально докембрийские алмазы невелики. Нередко в россыпях встречается смесь кристаллов различных разновидностей (рис. 5). В россыпи р. Тычан (Тычанский алмазоносный район, Красноярский край), характеризующейся повышенной крупностью минералов, округлые потенциально докембрийские алмазы составляют 30–40%, тогда как в россыпи Тарыдакская того же района, содержащей мелкие образования, таких кристаллов не обнаружено [6–8]. Не встречены такие кристаллы и в россыпи Дьюкунахская в верховьях р. Аламджа (приток р. Вилуй). Все эти россыпи формировались в прибрежно-морских условиях [1, 6] и имеют хорошую гидравлическую сортировку ИМК, которая и обеспечила накопление потенциально докембрийских алмазов вместе с фанерозойскими кимберлитовыми кристаллами в россыпях с крупными гранулометрическими классами и отсутствие на перспективных участках с мелкими зёрнами минерала. Есть все основания констатировать, что округлые потенциально докембрийские алмазы распространены в качестве минералогического фона по всей СП. Именно такие алмазы содержатся [7–9] в лампроитовых жилах Ингашинского поля в Восточном Саяне, имеющих протерозойский возраст (1268 ± 12 млн. лет). Округлые алмазы распространены в мире повсеместно, причем во многих случаях они достоверно связаны [8, 11, 15] с докембрийскими коренными источниками и россыпями (трубка Маджгаван и протерозойские россыпи в Индии; дайковый кимберлитовый комплекс с возрастом 1200–1400 млн. лет и россыпепроявления в докембрийских формациях Тортья, Лекор, Бирим в Западной Африке; алмазоносные филлиты и докембрийские россыпи в Бразилии).

Различия в распределении алмазов указанных групп на СП подчеркиваются коэффициентами

корреляции, характеризующими их связь в россыпях между собой. Коэффициент корреляции распределения V и VII разновидностей составляет +0,67, что дополнительно свидетельствует [8–9] об их генетическом родстве и происхождении из общего источника (источников). Коэффициент корреляции между V+VII и II разновидностями составляет +0,05, т. е. эти группы полностью независимы и происходят из разных источников. Коэффициент корреляции между V+VII разновидностями и округлыми алмазами составляет –0,55. Высокая отрицательная корреляция отражает локальность распределения V+VII групп на фоне повсеместного по СП нахождения округлых алмазов: по мере снижения доли первых растёт доля округлых алмазов, что свидетельствует о независимости источников последних. Из этого следует, что все три указанные группы алмазов имеют свои типы коренных источников (наиболее вероятно, докембрийского возраста) и различаются по характеру распределения.

Тяготение максимумов распределения алмазов V, VII и II разновидностей к выступам докембрия на северо-востоке СП достаточно очевидно. Вместе с ними здесь присутствуют округлые ромбододекаэдрониды, распространённые и в Красноярском крае (Тычанский район), где их появление можно соотнести с размывом протерозойских отложений на Енисейском кряже [7–9], связанные с размывом выступов докембрия в Восточном Саяне, где предполагаются также пока единственные известные на платформе докембрийские алмазоносные лампроиты Ингашинского поля [12–13]. Менее известны алмазы в отложениях Алданского кристаллического щита (АКЩ), где в начале 50-х гг. XX в. были найдены [1–3] два алмаза в устье руч. Трудовой (приток р. Джеконда) при обогащении 14000 м³ образований золотой россыпи и целика аллювия. Оба алмаза имеют признаки механического износа в форме «леденцовых скульптур» (механогенная полировка рёбер и вершин) и по комплексу «признаков древности» соответствуют докембрийским алмазам. В устье руч. Трудовой дренируются прибрежно-морские отложения юдомской свиты (венд), которые возможно и служат коллектором алмазов, в котором отсутствуют ИМК и свидетельствует о потенциальной алмазоносности АКЩ. При этом ИМК на территории щита не обнаружены, а изучение многочисленных трубчатых и дайковых тел основного и ультраосновного составов мезозойского возраста на данной территории не выявило алмазоносность таких тел. Предполагается [1, 8, 13, 15], что находки алмазов на территории АКЩ связаны с докембрийскими коренными источниками (типа кимберлитов или лампроитов), алмазы которых попадают в современный аллювий через протерозойские (вендские) прибрежно-морские коллекторы.

Более сложно интерпретировать появление повышенной доли округлых ромбододекаэдридов в тех случаях, когда выступы докембрия не картируются на дневной поверхности. Так, к районам, для которых характерно повышенное число округлых ромбододекаэдридов, относится Приленский район [5, 8, 11–13]. В небольших количествах на этой территории встречены (до 10 %) алмазы V, VII и кристаллы II (до 11 %) разновидностей. Доля округлых алмазов здесь повышается до 70% и наиболее характерны они для россыпей Среднего Молодо и Моторчуны ЯАП, где они имеют «признаки древности», заключающиеся, помимо габитуса, в форме повышенного механического износа, зеленой пигментации, матировки, связанной с термическим воздействием, повышенной крупности и высокого качества [8, 12]. Выступов докембрия, с которыми можно было бы связать данные алмазы, здесь не закартировано. Однако имеются сведения [11–13, 15], что к началу накопления образований мезозоя, в течение которого сформировался современный структурный план территории, граница платформы пролегла восточнее современной, а на месте Ленского отрезка Приверхоанского краевого прогиба располагался крупный выступ докембрийского фундамента, долгое время служивший областью сноса терригенного материала (в том числе ал-

мазов) на запад в сторону платформы и на восток в Верхоянскую геосинклиналь [5, 13]. В настоящее время выступ погружен под мезозойские отложения, хотя до формирования прогиба он в значительной мере определял минерогению Приленской области СП.

Повышенная доля округлых алмазов обнаруживается в некоторых россыпях центральной части ЯАП. Так, их доля в аллювии р. Вилюй выше устья р. Малая Ботуобия составляет 20,4%. Алмазы здесь были обнаружены в 50-е гг. XX в. при использовании больших объемов опробования (аналогично Алданскому району). Ниже устья р. Малая Ботуобия концентрация алмазов в аллювии резко возрастает, а их морфологический спектр соответствует (рис. 6) кимберлитам Малоботуобинского алмазоносного района (МБАР). Алмазы р. Вилюй выше устья Малой Ботуобии представляют собой фон, который можно обнаружить лишь большими объемами опробования, тогда как ниже устья этой реки характер ассоциации алмазов полностью определяется кимберлитами Мирнинского кимберлитового поля (МКП), имеющими алмазы преимущественно октаэдрического габитуса; фоновые округлые алмазы выявлены и здесь, но играют незначительную роль по сравнению с алмазами из местных кимберлитов. Промышленные кимберли-

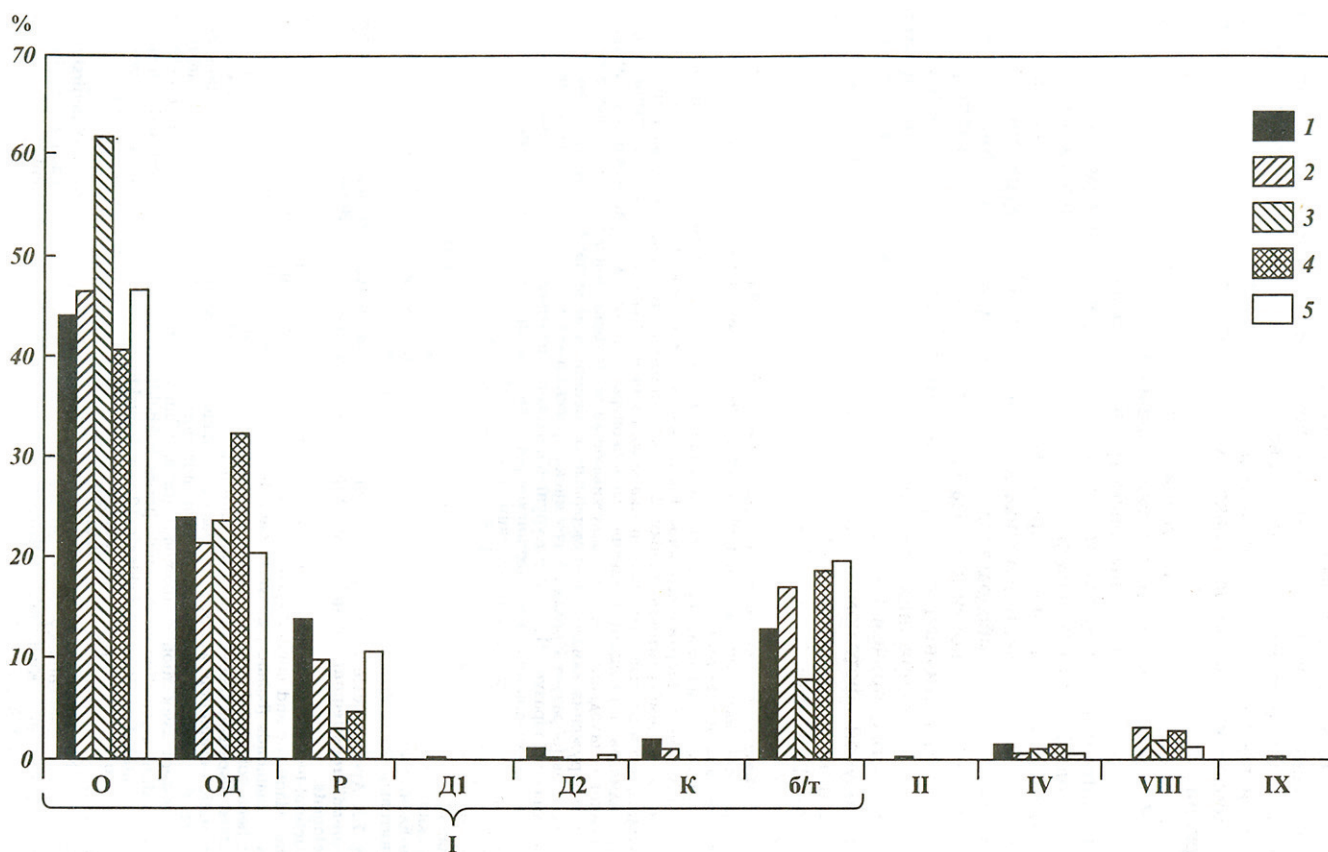


Рис. 6. Типоморфные особенности алмазов из россыпей МБАР: I, II, IV, VIII, IX — разновидности алмазов, по Ю.Л. Орлову [14]; усл. обозн. см. рис. 2; 1–5 — участки: 1 — Улахан-Еленгский, 2 — Глубокий, 3 — Солур, 4 — Куранахский, 5 — Таборный

ты МКП, в значительной мере определяющие россыпную алмазонасность региона, не могли служить источником округлых алмазов. Однако не исключена связь последних с Сунтарским выступом докембрийских пород, в настоящее время перекрытых мезозойскими отложениями незначительной мощности. Поэтому помимо выступов докембрия, экспонированных в настоящее время на дневной поверхности, необходимо учитывать и выступы, перекрытые мезозойскими или верхнепалеозойскими отложениями, поскольку они могли служить источниками докембрийских алмазов, впоследствии неоднократно переотлагавшихся во все более молодые отложения. Практически со всеми выступами фундамента связаны потенциально докембрийские алмазы, что позволяет предполагать распространенность таких кристаллов под палеозойским осадочным чехлом.

Кроме древних платформ, где находки алмазов не вызывают сомнения, минерал встречается в складчатых областях, где его поверхность обычно имеет мелкобугорчатый рельеф, обусловленный взаимодействием с магматическим расплавом (протомагматический рельеф). Более поздним элементом рельефа в таких случаях являются бесчисленные мелкие каналы травления, развитые по всей поверхности кристалла. Эти морфологические особенности характерны для глубинного этапа морфогенеза алмаза. Кристаллы подобной формы не являются необычными и встречаются даже среди именных камней, добытых из кимберлитов. Следующий этап морфогенеза, который можно выделить [8] при изучении алмаза, связан с экзогенными условиями его существования. Основной его формой является механический износ, выраженный в приполировке поверхности, сглаживании контрастных элементов рельефа, округлении и завальцовке устьев каналов травления. Степень износа может быть оценена как средняя. Износ такого типа не образуется на алмазах в аллювиальных условиях, но характерен для прибрежно-морских условий формирования россыпей как для докембрийских, так и фанерозойских [8, 12]. Местами на поверхности кристалла наблюдается ромбическая сеточка мелких трещинок по спайности. По поверхности алмаза развиты мелкие зелёные пятна пигментации с размытыми контурами. Из наблюдаемых кристалло-морфологических особенностей наиболее важное значение для установления происхождения алмазов в таких россыпях можно отметить следующие [1, 15]: а) повышенная степень механического износа; износ такой степени характерен для алмазов из прибрежно-морских россыпей и не мог осуществиться в аллювиальных условиях; б) ромбическая сеточка трещин, являющихся «признаком древности» и встречающихся на алмазах из докембрийских или потенциально докембрийских россыпей северо-востока СП, Урала, Китая, Индии, Бра-

зилии и других регионов. Возникновение трещинок объясняется хрупкой релаксацией поверхностных напряжений, обусловленных соударениями с твёрдыми частицами в процессе формирования древней россыпи, под действием более поздних физико-химических факторов; в) пятна пигментации, входящие в комплекс «признаков древности» и наиболее характерны для алмазов из докембрийских россыпей. Каждый из указанных морфологических признаков сам по себе может встречаться на алмазах из россыпей разного возраста. Однако в комплексе они с высокой степенью вероятности свидетельствуют о докембрийском возрасте россыпей. Поэтому можно предполагать [1, 8] происхождение таких алмазов из докембрийских алмазонасных прибрежно-морских россыпей.

Имеются сведения [1, 12] о находке в верховьях р. Мома (правый приток р. Индигирка) «алмазной породы». Данный район представляет собой мезозойское складчатое обрамление Колымского платформенного блока. Наиболее вероятно такая порода представляет собой осадочный алмазонасный коллектор, который может иметь как докембрийский (протерозойский) возраст, так и более молодой, если алмазы были переотложены из древнего осадочного коллектора. Подобная ситуация известна [1, 12] в Китае в провинции Хунань, где алмазы найдены в середине XIX в. в русловых отложениях реки Юаньцзян, а в настоящее время здесь эксплуатируется россыпное месторождение Чандэ. Изучено 112 алмазов из аллювиальных отложений бассейна этой реки [1]. Китайские геологи делят алмазонасные участки на «ореолы» (где алмазы встречаются в сопровождении ИМК — пиропов и хромитов) и «россыпи» (где алмазы не сопровождаются кимберлитовыми или лампроитовыми минералами, а их основным гидравлическим спутником является диаспор, происходящий из пермской латеритной коры выветривания (КВ)). И в ореолах, и в россыпях выделяются алмазы с «признаками древности», выраженными в габитусе (округлые додекаэдрониды и октаэдрониды), механическом износе, разнообразных следах удара в форме ромбической сеточки трещин, кольцевых и серпообразных трещинок поперёк псевдорёбер додекаэдронидов и октаэдронидов, многие кристаллы имеют радиационную окраску (сплошную зеленоватую либо пятнистую пигментацию). В «ореолах» к ним добавляются (преимущественно в мелких гранулометрических классах) кристаллы октаэдрического габитуса, не обладающие характерными «признаками древности» и связанные, возможно, с фанерозойскими источниками (здесь известны 25 жильных и трубчатых тел лампроитов среднепалеозойского возраста, однако алмазонасных тел пока не найдено). Россыпные алмазы китайские крестьяне добывают на своих рисовых полях в долинах рек, выкапывая глубокие ямы. Происхождение россы-

пи Чандэ связано [1, 13] с размывом докембрийского осадочного коллектора, выведенного на поверхность в мезозойских складчатых сооружениях на территории провинции и вторичного обогащения в современных русловых отложениях.

Россыпи алмазов обнаружены [1, 12] в последние годы в Мьянме (Бирма) в пределах мезозойской Бирмано-Малайской складчатой системы. Среди алмазов преобладают округлые ромбододекаэдрониды, средний вес кристаллов около 0,3 карата, но есть и крупные; более чем 50% кристаллов имеют на поверхности зелёные и бурые пятна пигментации, характерен механический износ. В районе находок алмазов обнажается широкий возраст-ной спектр пород, начиная с архейских. Сделано предположение [1, 13] о магматическом первоисточнике алмазов (скорее лампроитовом, чем кимберлитовом), но отмечается, что кристаллы попали в современные отложения через промежуточный коллектор. Возраст промежуточного коллектора не уточняется, отмечается лишь длительная аллювиальная история алмазов. Однако по описаниям алмазов и фотографиям видно [12], что они в максимальной степени соответствуют «признакам древности», и в соответствии с развиваемой нами [1] концепцией, происходят из докембрийской прибрежно-морской россыпи, возраст коренных источников которой также докембрийский. Поддерживая имеющуюся точку зрения о лампроитовом характере этих источников, можно сослаться как на миоценовые лампроиты поля Эллендейл в Австралии, так и на кимберлит-лампроитовую трубку Маджгаван в Индии, алмазы которой очень похожи на аналогичные кристаллы Мьянмы. Важно отметить, что алмазы Мьянмы сопровождаются в россыпях рубинами и сапфирами. Алмазы, представляющие собой крупные ромбододекаэдрониды, добываются как попутный продукт вместе с касситеритом со дна моря в районе о. Пхукет в Таиланде на продолжении той же Бирмано-Малайской складчатой системы к югу от Мьянмы [15–17]. И здесь наиболее вероятным источником алмазов является древний коллектор, выведенный на дневную поверхность. Древние алмазы могут пройти через несколько периодов переотложения, в результате чего их источником в складчатых областях могут быть не докембрийские, а более молодые отложения. Вероятно, такая ситуация имеет место [15, 17] на о. Калимантан (Борнео). Здесь развита мезозойская складчатость, характерная для всей юго-восточной Азии. В западной и юго-западной частях острова уже несколько веков известны аллювиальные россыпи алмазов, коренные источники которых неясны. Среди алмазов доминируют октаэдры (вероятно, октаэдрониды) и ромбододекаэдры (округлые ромбододекаэдрониды). Значительная часть из них (особенно в западной части острова) имеет признаки механического износа. Глав-

ным гидравлическим спутником алмазов является диаспор и корунд, а также корундо-диаспоровые породы «леборштейны». Для суждения об источниках алмазов важны два обстоятельства: а) механический износ алмазов; б) характер гидравлических спутников. По поводу первого можно утверждать, что в аллювиальных условиях небольших рек, развитых на острове, износ алмазов осуществляться не может. Следовательно, алмазы попадали в современный русловой аллювий при дренировании более древних коллекторов, которыми могут быть позднемеловые конгломераты с редкими алмазами. Следует отметить, что диаспор является [1] гидравлическим спутником алмазов в упоминавшихся выше россыпях реки Юаньцзян в провинции Хунань (Китай) и связан с пермской КВ. Корунд в большом количестве встречается в пределах выступа докембрийских метаморфических пород на территории плато Контум в Центральном Вьетнаме.

Аналогичным образом можно анализировать алмазоносность мезозойской складчатости о. Суматра, запада США (Калифорния, Орегон), а также горной системы Аппалачей [12]. Алмазы Урала также являются [1, 8, 15] докембрийскими, поскольку, по данным [5, 10, 12], они имеют типичные «признаки древности» и весьма похожи на кристаллы из протерозойских россыпей района Панна или Вайджаракарур (Индия). Так называемые туффизиты Урала, объявленные коренными источниками алмазов [13], не могут быть таковыми хотя бы потому, что их кристаллы имеют признаки механического износа в виде «леденцовых поверхностей», являющихся результатом механической полировки алмазов в процессе формирования древних россыпей [1, 8].

Перечисленных примеров достаточно для того, чтобы показать высокую реальность появления алмазов с «признаками древности» в складчатых областях за счёт размыва древних промежуточных коллекторов. Разумеется, россыпная гипотеза не может рассматриваться безальтернативно. Алмазы могут поступать и из коренных источников разного возраста как фанерозойских, так и докембрийских, как лампроиты Ингашинского поля в Восточном Саяне. Однако знание минералогии алмазов и их экзогенных изменений позволяет даже по единичным кристаллам во многих случаях сделать выбор [8, 11] в рамках альтернативы «коренной источник — древняя россыпь». Имеются сведения о находках крупных алмазов ювелирного качества (два потенциальных «признака древности») на территории Казахстана, а также в горах Тянь-Шаня. По проблеме алмазоносности Казахстана в основном рассматриваются только гипотезы относительно возможных коренных источников алмазов. Наряду с известным месторождением метаморфогенных алмазов Кумдыколь (Кокчетавский массив) в

качестве источников предполагаются пермские базальты, разнообразные магматиты, содержащие ксенолиты предположительно алмазоносных мантийных пород, блоки «алмазного слоя» мантии, выброшенные на поверхность в связи с формированием гигантских астроблем (гиаблем), докембрийские полиметаморфиты, кимберлиты и лампроиты без указания возраста. Некоторые из этих источников действительно алмазоносны (в частности нижнетриасовые субщелочные оливиновые базальты Кастекского хребта), однако их алмазы мелкие (0,02—0,2 мм) с разнообразной морфологией, жёлтого и желтовато-зелёного цвета. Реальным источником ювелирных алмазов могут быть [8, 15] древние осадочные коллекторы, дренируемые в горах. Их алмазы могут иметь разный генезис (наиболее вероятно кимберлитовый или лампроитовый), но в данном случае важен не только тип коренного источника, а и особенности поисковой обстановки, определяющие геологическую позицию этих кристаллов, возможности и ограничения поисков их коренных источников. При этом сами алмазы могут ответить [1, 8] на вопрос, из коренного источника или из древней россыпи они появились на дневной поверхности.

Таким образом, проведённые исследования и анализ опубликованного по данной проблеме материала позволяют утверждать, что алмазы в россыпях из докембрийских источников могут занимать различную геологическую позицию: а) находиться в докембрийских отложениях как на древних платформах, так и в более молодых складчатых системах, сформированных на древнем платформенном основании; б) присутствовать в фанерозойских и современных россыпях, сформированных за счёт размыва докембрийских пород в пределах выступов докембрия на платформах; в) находиться в современных россыпях, сформированных за счёт размыва выходов докембрийских коллекторов в фанерозойских складчатых системах, сформированных на древнем платформенном основании; г) появляться в фанерозойских отложениях как результат переотложения из докембрийских коллекторов; д) встречаться либо самостоятельно, сопровождаясь лишь гидравлическими спутниками, либо в сопровождении алмазов и индикаторных минералов из фанерозойских кимберлитов. Поэтому находки алмазов в древних и современных россыпях необходимо рассматривать с двух позиций: попадание их в россыпи либо за счёт размыва непосредственно коренных источников, либо за счёт размыва осадочных коллекторов (в том числе докембрийских). Идентификация алмазов в данной альтернативе осуществляется по ком-

плексу типоморфных особенностей, связанных с экзогенными изменениями алмазов, при этом докембрийские алмазы характеризуются комплексом «признаков древности». Во втором случае поисковая обстановка может накладывать серьезные ограничения на возможность прогнозирования и поисков коренных алмазных месторождений, одновременно давая возможность прогнозировать россыпную алмазоносность, связанную с докембрийскими источниками.

Очень важно обращать внимание на психологический аспект проблемы прогноза алмазоносности на территориях возможного присутствия докембрийских алмазов. Обычно при находке алмазов в россыпях в первую очередь выдвигаются гипотезы о коренных источниках, их структурно-тектонической позиции исходя из аналогий с известными типами коренных источников, при этом в качестве потенциальных источников алмазов рассматриваются главным образом кимберлиты (лампроиты), ультрабазиты, реже базиты, однако обычно возраст источников специально не обсуждается. Происхождение алмазов из древних россыпей рассматривается как второстепенный вариант, а возможность поступления кристаллов из докембрийских источников практически не принимается во внимание. Такая ситуация характерна для прогноза алмазоносности как по СП, так и по другим платформам мира, хотя геологам известны находки докембрийских алмазоносных лампроитов, которые обычно не обсуждаются. Без анализа возможной докембрийской алмазоносности можно долго и бесплодно решать проблему источников алмазов на северо-востоке СП, искать фанерозойские источники россыпей р. Юаньцзян и т. д. В то же время с позиций докембрийской алмазоносности можно прогнозировать россыпи алмазов в районах выходов докембрия, как это сделано для плато Контум во Вьетнаме [1]. Есть основание предполагать наличие докембрийских алмазов (наряду с кристаллами из фанерозойских кимберлитов) в провинциях Ляонин и Шаньдун (Китай), поскольку на их территории выявлены выходы докембрия и не все проявления россыпной алмазоносности можно объяснить через известные в данном регионе кимберлиты. Алмазы здесь установлены как в современных аллювиальных отложениях, так в синийских и кембрийских отложениях. Приведённые материалы позволяют сделать вывод о широком развитии докембрийской алмазоносности на Земле и этот факт необходимо учитывать при идентификации тех или иных находок алмазов в россыпях и алмазопоявлениях в различных регионах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П. Поисковая минералогия алмаза. Новосибирск: Гео, 2010. 650 с.
2. Бартошинский З.В. Сравнительная характеристика алмазов из различных алмазоносных районов Западной Якутии // Геология и геофизика. 1961. № 6. С. 40—50.
3. Бартошинский З.В. Минералогическая классификация природных алмазов // Минералогич. журнал. 1983. Т. 5. № 5. С. 84—93.
4. Галимов Э.М. Вариации изотопного состава алмазов и связь их с условиями алмазообразования // Геохимия. 1984. № 8. С. 1091—1117.
5. Гневушев М.А., Бартошинский З.В. К морфологии якутских алмазов // Тр. ЯФ СО АН СССР. Сер. геол. 1959. Вып. 4. С. 74—92.
6. Граханов С.А., Коптиль В.И. Триасовые палеороссыпи алмазов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 11. С. 1191—1201.
7. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Алмазы Тунгусской алмазоносной субпровинции Сибирской платформы. Статья 1. Алмазы Байкинской области // Бюлл. МОИП. Сер. геол. 2002. Т. 77. Вып. 6. С. 63—77.
8. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра, 2003. 603 с.
9. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Характеристика алмазов Тунгусской алмазоносной субпровинции Сибирской платформы. Статья 2. Южно-Тунгусская область // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2003. Т. 78. Вып. 1. С. 54—65.
10. Кухаренко А.А. Алмазы Урала. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 515 с.
11. Леонов Б.Н., Прокопчук Б.И., Орлов Ю.Л. Алмазы Приленской области. М.: Наука, 1966. 277 с.
12. Метелкина М.П., Прокопчук Б.И., Суходольская О.В., Францессон Е.В. Докембрийские алмазоносные формации Мира. М.: Недра, 1976. 134 с.
13. Прокопчук Б.И. Зональность размещения алмазных россыпей на древних платформах // Минеральные месторождения. М.: Наука, 1976. С. 186—196.
14. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. 2-е изд. М.: Наука, 1984. 264 с.
15. Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Геолого-генетические основы шлихо-минералогического метода поисков алмазных месторождений. М.: Недра, 1998. 555 с.
16. Mitchell R.H. Kimberlite and related rocks — a critical reappraisal // J.Geol. 1970. V. 78. P. 686—704.
17. Nixon P.H. Kimberlitic volcanoes in East Africa // Overseas geol. Mineral. Res. 1973. N 41. P. 119—130.

REFERENCES

1. Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Pokhilenco N.P. *Prospecting mineralogy of diamond*. Novosibirsk, Geo Publ, 2010. 650 p. (In Russian).
2. Bartoshinsky Z.V. Comparative characteristics of diamonds from various diamondiferous regions of Western Yakutia. *Geology and geophysics*, 1961, no. 6, pp. 40—50. (In Russian).
3. Bartoshinsky Z.V. Mineralogical classification of natural diamonds. *Mineral. Journal*, 1983, v. 5, no. 5, pp. 84—93. (In Russian).
4. Galimov E.M. Variations of isotopic composition of diamonds and their relationship with conditions of diamond formation. *Geochemistry*, 1984, no. 8, pp. 1091—1117. (In Russian).
5. Gnevushev M.A., Bartoshinsky Z.V. To morphology of Yakutian diamonds. *Proceedings of SB YS of the USSR AS, Geol. series* 1959, no. 4, pp. 74—92. (In Russian).
6. Grakhanov S.A., Koptil V.I. Triassic paleoplacers of diamonds of the Siberian platform north-east. *Geology and geophysics*, 2003, v. 44, no. 11, pp. 1191—1201. (In Russian).
7. Zinchuk N.N., Koptil V.I. Diamonds of Tunguskaya diamondiferous sub-province of the Siberian platform. Article 1. Diamonds of Baikitskaya area. *Bull. MOIP. Geol. Series*, 2002, v. 77, no. 6, pp. 63—77. (In Russian).
8. Zinchuk N.N., Koptil V.I. *Typomorphism of diamonds of the Siberian platform*, 2003, 603 p. (In Russian).
9. Zinchuk N.N., Koptil V.I. Characteristics of diamonds of Tunguskaya diamondiferous sub-province of the Siberian platform. Article 2. South-Tunguskaya area. *Bull. MOIP. Geol. dep.*, 2003, v. 78, no. 1, pp. 54—65. (In Russian).
10. Kukharensky A.A. *Diamonds of the Urals*, M., 1955, 515 p. (In Russian).
11. Leonov B.N., Prokopchuk B.I., Orlov Y.L. *Diamonds of Trans-Lena area*, 1966, 277 p. (In Russian).
12. Metelkina M.P., Prokopchuk B.I., Sukhodolskaya O.V., Frantsesson E.V. *Precambrian diamondiferous formations of the World*. M., Nedra Publ, 1976, 134 p. (In Russian).
13. Prokopchuk B.I. Zoning of diamond placers allocation on ancient platforms. *Mineral deposits*, 1976, pp. 186—196. (In Russian).
14. Orlov Y.L. *Mineralogy of diamond*. 2nd ed. M., Nedra Publ, 1984, 264 p. (In Russian).
15. Kharkiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I. *Geological-genetic fundamentals of heavy-concentrate mineralogical method of diamond deposits prospecting*. M., Nedra Publ, 1998, 555 p. (In Russian).
16. Mitchell R.H. Kimberlite and related rocks — a critical reappraisal. *J. Geol.*, 1970, V. 78. pp. 686—704.
17. Nixon P.H. Kimberlitic volcanoes in East Africa. *Overseas geol. Mineral. Res.*, 1973, no 41, pp. 119—130.

УДК 553.411:499

ЗОЛОТО И РТУТЬ В ПРОЦЕССАХ РУДООБРАЗОВАНИЯ НА КАМЧАТКЕ

В.А. СТЕПАНОВ

Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН
30, Северо-Восточное шоссе, г. Петропавловск-Камчатский 683002, Россия,
e-mail: vitstepanov@yandex.ru

Приведены основные черты различия и сходства физических и химических свойств золота и ртути, определяющие их поведение в природных процессах формирования месторождений обоих металлов на Камчатке. Показано, что различие свойств золота и ртути привело к появлению самостоятельных монометалльных месторождений, отличающихся по связи с интрузивными образованиями, глубине и температуре формирования руд. Сходство свойств указанных элементов определило появление минералов ртути на золоторудных и золота на ртутных месторождениях, а также к формированию комплексных золотортутных месторождений. Выделены четыре геолого-промышленных типа золотортутных месторождений: ноксвиллский, карлинский, кюсюский и хемлоский, включающих месторождения с крупными запасами золота как за рубежом, так и в России. Выявление золотортутных месторождений, в том числе за счёт ревизии ртутных рудопроявлений и месторождений Камчатки на золото, приведёт к укреплению минерально-сырьевой базы золота этого региона.

Ключевые слова: золото; ртуть; месторождение; рудная формация.

GOLD AND MERCURY IN THE PROCESSES OF ORE FORMATION IN KAMCHATKA

V.A. STEPANOV

*Geotechnological Scientific Research Center, FEB RAS
30, Severo-Vostochnoye Shosse, Petropavlovsk-Kamchatsky 683002, Russia
e-mail: vitstepanov@yandex.ru*

The main features of the difference and similarity of the physical and chemical properties of gold and mercury have been given, which determine their behavior in the natural processes of formation of deposits of both metals in Kamchatka. It has been shown that the difference in the properties of gold and mercury led to the emergence of independent monometallic deposits, differing in connection with intrusive formations, in depth and temperature of ore formation. The similarity of the properties of these elements determined the appearance of mercury minerals on gold ore deposits and gold in mercury deposits, as well as the formation of complex gold-mercury deposits. Four geological-industrial types of gold-mercury deposits have been distinguished: the Knoxville, the Carlin, the Kyuchus and the Chemlian ones, which include deposits with large gold reserves both abroad and in Russia. The identification of gold deposits, including through the revision of mercury ore occurrences and deposits of Kamchatka for gold presence, will strengthen the mineral resources base of gold in this region.

Keywords: gold; mercury; deposit; ore formation.

На Камчатке присутствуют наиболее многочисленные месторождения золота и ртути (рисунок). Наибольший промышленный интерес представляют золоторудные месторождения вулканогенной золотосеребряной формации (Сергеевское, Аметистовое, Озерновское, Агинское, Бараньевское, Сухариковские Гребни, Золотое, Родниковое, Мутновское и Асачинское). Гораздо меньшее значение имеют небольшие россыпи золота. Из ртутных месторождений преобладают представители телетермальной кварц-диккитовой формации (Ясное, Озерное, Ляпнагай, Нептун, Тавена, Красная Горка и Олюторское).

К вулканогенной алунит-опалитовой формации относится ртутное Чемпуринское месторождение. Лиственитовый тип представлен оруденением горы Туманной на о. Карагинском. Ртутная и в меньшей степени золотая минерализации отмечаются и в отложениях термальных источников (Апальские источники, Долина Гейзеров, источники кратера Узон и др.).

На золотосеребряных месторождениях (Оганчинское, Бараньевское, Агинское и др.) нередко отмечается примесь ртути, достигающая на отдельных месторождениях промышленных величин. В свою очередь в рудах ртутных месторождений отмечается присутствие золота, достигающее на Чемпуринском месторождении промышленных величин. Кроме того, имеются месторождения (Гитко-юлин) и проявления комплексных золотортутных руд, относящихся к золотортутной формации. Это вызывает интерес к физико-химическим свойствам золота и ртути, определяющим их участие в процессе рудообразования.

Строение атомов соседних по шестому периоду таблицы Д.И. Менделеева элементов № 79 (золото) и 80 (ртуть) сходное. Электронная конфигурация ртути отличается от золота наличием одного лиш-

него протона в ядре и электрона на внешней s -орбитали. Как нечетный элемент золото имеет один стабильный природный изотоп ^{197}Au , искусственно полученных радиоактивных изотопов около 30 [6]. В отличие от золота природная ртуть состоит из семи стабильных и небольшого числа радиоактивных изотопов. Стабильными являются семь изотопов (встречаемость в %): ^{196}Hg (0,146), ^{198}Hg (10,02), ^{199}Hg (16,84), ^{200}Hg (23,13), ^{201}Hg (13,22), ^{202}Hg (29,80), ^{204}Hg (6,85) [21]. Из радиоактивных наиболее интересен изотоп ^{197}Hg , хотя содержание его в природной смеси невелико — 0,1% [2], по другим данным 0,0037% [12]. Он нестабилен и по реакции электронного захвата превращается в стабильный изотоп ^{197}Au . Реакция происходит изомерически и сравнительно быстро с двумя периодами полураспада — 24 и 65 ч [8]. Это позволяет предположить, что в природе золото или часть его является продуктом эволюции ртути как элемента [15]. Такое превращение элементов не является уникальным. Например, подобная реакция электронного захвата привела к образованию всего аргона в воздухе за счёт радиоактивного изотопа ^{40}K .

По физическим и химическим свойствам рассматриваемые элементы имеют как общие черты, так и существенные различия. Общеизвестно, что золото — это тугоплавкий, чрезвычайно пластичный и ковкий металл желтого цвета. В отличие от него серебристого цвета ртуть — это необычный жидкий при нормальной температуре металл. Твёрдым, пластичным и ковким он становится только при температуре -39°C и ниже. Подвижность ртути и её паров общеизвестны. А.А. Сауков писал, что если бы в природе не было наряду с процессами образования самородной ртути также и процессов её испарения, то самородное состояние ртути в природе было бы более обычным, чем для золота и серебра [11].

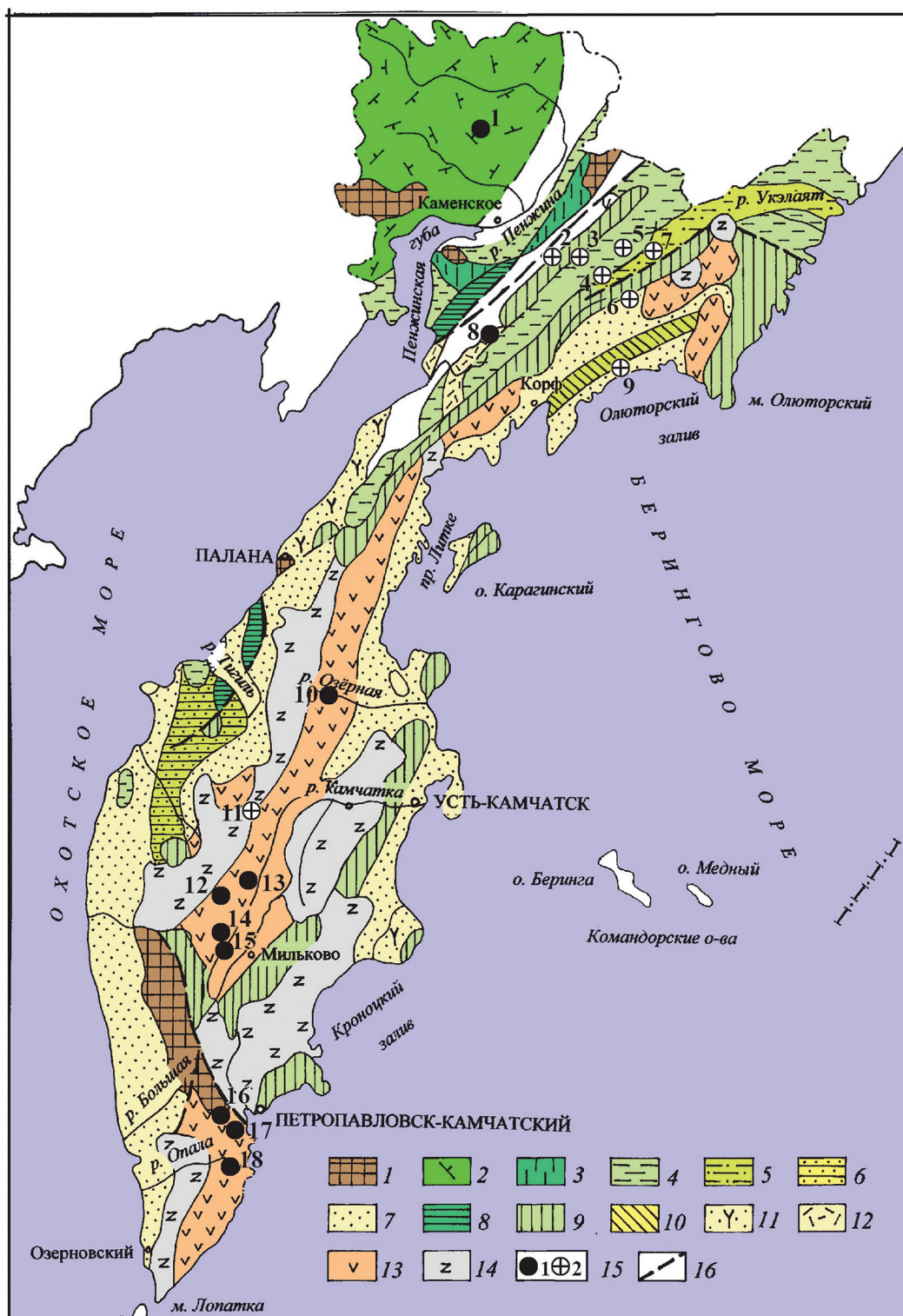


Схема размещения золотого и ртутного оруднения Камчатки: 1 – метаморфические образования докембрия и палеозоя; 2 – меловые вулканиды и интрузии Охотско-Чукотского пояса; 3–7 – терригенные отложения, 3 – нижнемеловые, 4 – верхнемеловые, 5 – верхнемеловые-палеогеновые, 6 – палеогеновые, 7 – олигоцен-миоценовые, 8–11 – подводно-вулканогенные отложения, 8 – нижнемеловые, 9 – верхнемеловые, 10 – палеогеновые, 11 – олигоцен-нижнемиоценовые, 12–14 – наземные вулканиды: 12 – олигоцен-нижнемиоценовые риолит-дацитового состава, 13 – неогеновые андезиты, 14 – четвертичные базальты, 15 – рудные месторождения и их номера: 1 – золоторудные (1 – Сергеевское, 8 – Аметистовое, 10 – Озерновское, 12 – Агинское, 13 – Сухопариковские Гребни, 14 – Бараньевское, 15 – Золотое), 2 – ртутные (2 – Ясное, 3 – Озёрное, 4 – Ляпнагайское, 5 – Нептун, 6 – Тавена, 7 – Красная Горка, 9 – Олюторское, 11 – Чемпуринское), 16 – разломы

При всём различии свойств золото и ртуть легко соединяются, образуя амальгамы и ртутистое золото. Амальгамами называют ртуть с растворённым золотом, соединения обоих металлов, а также суспензию захваченных ртутью целиком (за счёт смачивания или взаимной диффузии) частиц золота. Согласно работам И.Н. Плассина, растворимость золота в ртути, незначительна при 24 °С (0,13 ат. %). С увеличением температуры она быстро увеличивается и при 250 °С достигает 17,6%. В свою очередь максимальная растворимость ртути в золоте в твёрдом состоянии составляет 19,8% (при температуре 419 °С). При снижении температуры до 24 °С она уменьшается до 16,7%. Соединения этих металлов отвечают формулам AuHg_2 , Au_2Hg и Au_3Hg [10].

Различия свойств золота и ртути приводят к формированию эндогенных месторождений этих металлов в неодинаковых геологических обстановках. Большой части эндогенных золоторудных месторождений свойственен гидротермальный генезис. Образование их связано с отложением минерального вещества горячими газодонными растворами. Золоторудные месторождения часто имеют определённую связь с интрузивными или вулканическими комплексами и были сформированы в широком интервале глубин — от значительных и средних до близповерхностных. Парагенетическая связь месторождений с магматическими образованиями позволила выделить три класса гидротермальных месторождений: плутоногенный, вулканоногенный и амагматоногенный или телетермальный [13]. Золоторудные месторождения принадлежат главным образом к первым двум классам. Некоторые преимущественно небольшие месторождения золота имеют скарновое происхождение и возникают в процессе метасоматоза в области контакта остывающих массивов магматических пород с карбонатными толщами.

По устойчивым минеральным ассоциациям и близким геологическим условиям рудообразования гидротермальные золоторудные месторождения объединены в ряд формаций. Среди них наиболее выделяются золотокварцевая, золотосульфидно-кварцевая и золотосульфидная формации плутононогенного класса. В вулканоногенном классе преобладает близповерхностная золотосеребряная формация. На Камчатке присутствуют преимущественно вулканоногенные золотосеребряные месторождения, редко встречаются проявления золотокварцевой и золотосульфидно-кварцевой формаций.

Возраст формирования золоторудных месторождений достаточно широк от архея и протерозоя до мезозоя и кайнозоя. Отмечается дискретность в формировании золоторудных месторождений в архее и фанерозое [3]. Наиболее древним является позднеархейский цикл формирования золотосульфидно-кварцевых месторождений в зеленокамен-

ных поясах в интервале 2700—2600 млн. лет. К этому же циклу относится образование самого крупного месторождения золота Витватерсранд, залегающего в конгломератах. Для протерозойского этапа рудообразования наиболее характерно месторождение Хоумстейк (1600 млн. лет). Раннегерцинский этап представлен месторождениями Бендига (Австралия), а также Васильковское (Казахстан). К позднегерцинскому циклу отнесены золотокварцевые (Мурунтау и др.), а также золотосульфидные (Кумтор, Кокпатас) и золотосеребряные (Кочбулак, Кубака) месторождения. Позднеюрский-позднемеловой цикл широко проявлен на Востоке России (золотокварцевое месторождение Наталка, золотосульфидно-кварцевое Пионер, золотосульфидные Майское и Маломыр, золотосеребряные Покровское и Балей). В кайнозойском цикле, захватывающем и антропоносовый период, наиболее широко проявлены близповерхностные золотосеребряные месторождения, особенно на Камчатке. Возраст камчатских вулканоногенных золото-серебряных месторождений колеблется от 0,7 до 41,4 млн. лет [9].

Ртутные месторождения по геологическим условиям, в том числе по отношению к магматизму и глубинности формирования руд, отнесены к двум классам гидротермальной группы: вулканоногенному и амагматоногенному или телетермальному [7, 13]. Скарновые месторождения ртути отсутствуют. Преобладающее число ртутных месторождений принадлежит телетермальному классу, главным отличием которого является слабая связь или отсутствие связи с магматическими образованиями, близповерхностный уровень и низкая температура рудообразования. Среди промышленных типов ртутных месторождений в вулканоногенном классе выделяются карбонатно-полиаргилитовый, алуни-опалитовый и травертиновый типы, а в телетермальном — кварц-диккитовый, джаспероидный, карбонатный и листовенитовый [7]. Месторождения и проявления ртути Камчатки в большинстве своём относятся к телетермальному кварц-диккитовому типу, в меньшей степени — к листовенитовому. Чемпуринское месторождение относится к алуни-опалитовому типу вулканоногенного класса.

По возрасту ртутные месторождения значительно моложе золоторудных. Некоторые из них были сформированы в позднегерцинскую эпоху, каледонских и более древних месторождений ртути не установлено. Но подавляющее число ртутных месторождений размещается в пределах мезокайнозойских складчатых областей и вулканических поясов и имеет мезокайнозойский, главным образом третичный и четвертичный, возраст. Месторождения ртути Камчатки относятся к третичным и четвертичным. Ртутная минерализация отмечается и в травертинах современных геотермальных источников Камчатки.

Некоторые общие особенности рассматриваемых элементов привели к появлению минералов ртути на золоторудных, золота на ртутных месторождениях, а также к формированию комплексных золотортутных месторождений.

Появление основного минерала ртути — киновари фиксируется на многих золоторудных месторождениях. Чаще всего она отмечается на месторождениях вулканогенной, реже плутогенной группы. Часто ртуть концентрируется в самородном золоте. Содержания её в золоте обычно составляют десятые доли процента, но иногда достигают нескольких процентов. Встречаются и амальгамы золота [19].

В значительных количествах ртуть содержится в самородном золоте самого крупного в мире месторождения золота Витватерсранд. Содержание её в золоте месторождения Карбон-Лидер-Рифт и других рудниках Витватерсранда меняется в пределах 1,2—5,9% [25]. Поскольку из этого месторождения добыто порядка 50 тыс. т золота, то попутное количество ртути, заключенной в золоте, можно оценить в 1,5—2,0 тыс. т.

Примесь ртути в золоторудных месторождениях нередко встречается даже на уровне промышленных величин (более 0,03%). Но высокие содержания её в рудах иногда замалчиваются ввиду токсичности паров ртути, что требует усложнения процесса извлечения золота. Например, на месторождениях карлинского типа или на Олимпиадинском месторождении [1].

В свою очередь золото также нередко отмечается в рудах ртутных месторождений. Главным образом это самородное золото, реже повышенное содержание золота присутствует в киновари, совсем редко — примесь золота в самородной ртути. Например, содержание золота в ряде ртутных месторождений Северо-Востока России достигает 1,3 г/т [4]. Содержание золота в киновари и самородной ртути изучалось на Ланском ртутном месторождении Хабаровского края. В киновари содержание золота составляет 1,27—13 г/т, а в самородной ртути 335 г/т [16]. Необходимо отметить, что наличие даже промышленных содержаний золота в ртутных рудах не всегда положительно воспринимается рудничными геологами, нередко оно игнорируется ими или относится к вредным примесям [19].

Но наиболее яркими примерами совместного нахождения промышленных содержаний золота и ртути являются комплексные золото-ртутные месторождения. К ним отнесены месторождения, из которых добывают как золото, так и ртуть.

Наиболее известны месторождения джаспероидного (карлинского) типа, присутствующие в США, многие из них являются крупными по запасам золота. Попутная добыча ртути из этих месторождений в 90-х гг. XX в. закрывала всю потребность США в этом металле [21].

Другим примером месторождений этой группы служит месторождение листовитового типа Нью-Идрия (США). Оно было отработано на ртуть с 1953 по 1972 г. Добыто 17250 т ртути при среднем ее содержании 0,3%. Через несколько лет выяснилось, что в хвостах переработанной руды (7 млн. т) содержится 36 т золота с содержанием 5,1 г/т. В 1981 г. компания «Идрия Ленд Девелопмент» приступила к добыче золота из хвостов этого месторождения, что подтверждает его принадлежность к золотортутному [24].

Об успешной ревизии ртутных месторождений на золото свидетельствуют данные по хорошо известному месторождению листовитового типа Ноксвилл (США). Оно отрабатывалось на ртуть более 100 лет (добыто около 4250 т). Однако золото в нём ранее не добывалось, так как его невозможно было выявить промывкой лотком или увидеть невооруженным глазом. Но в марте 1985 г. при отработке на золото этого считавшегося ртутным месторождении получены первые слитки золота, а общие запасы благородного металла оцениваются в 100 т [22].

Эти и другие примеры привели к необходимости ревизии ряда ртутных месторождений, в том числе и на Камчатке, на золото [18]. В России выявлены и разведаны золотортутные и ртутьсодержащие золоторудные месторождения Кючюс (Якутия), Воронцовское (Урал), Олимпиадинское (Красноярский край). Попутная добыча ртути зачастую носит вынужденный характер и редко афишируется ввиду токсичности паров ртути [1].

Золотортутные месторождения занимают вполне определённую нишу между собственно золоторудными с одной стороны и ртутными с другой. Они обладают сходными по составу устойчивыми ассоциациями минералов золота, ртути, сурьмы, мышьяка и таллия и располагаются в близповерхностных, часто амагматических геологических обстановках. Это позволило нам выделить золотортутную рудную формацию [14]. Ранее этот термин употреблялся И.Г. Магакьяном в отношении существенно других комплексных золотосеребромедно-ртутных месторождений вулканогенной группы в Чили [5].

В зависимости от геологического строения золотортутных месторождений, морфологии рудных тел, состава руд и окорудных метасоматитов в пределах формации выделены четыре геолого-промышленных типа: ноксвиллский (месторождения Ноксвилл, Нью-Идрия — США), карлинский (Карлин, Кортес, Меркур — США, Куранах, Воронцовское, Тас-Юрх — Россия), кючюсский (Кючюс — Россия, Голд-Кворри — США) и хемлоский (Хемло — Канада, Олимпиадинское — Россия).

В состав устойчивой входит минеральная ассоциация высокопробного ртутистого золота с минералами ртути, мышьяка, сурьмы и таллия. Геохи-

мический спектр руд составляют золото, ртуть, мышьяк, сурьма и таллий при положительной связи золота с ртутью и высоким золото-серебряном отношении. Рудные тела представлены преимущественно зонами и залежами вкрапленных руд, состоящих из рудоносных метасоматитов аргиллизитовой и лиственитовой формаций, доля жильной кварцевой или карбонатной составляющей невелика. Месторождения золотортутной формации возникали в близповерхностной части зон глубинных или региональных разломов, часто без явного участия потенциально рудоносных магматических систем. Генезис месторождений гидротермальный, с глубинным источником основных рудных компонентов и температурой формирования руд в интервале 250—150 °С. Уровень глубины рудообразования оценивается в 500—1500 м. В группе гидротермальных рудных месторождений золотортутные обычно являются представителями телетермального класса [19].

На Камчатке наибольший интерес на выявление комплексных золотортутных руд имеют ртутные месторождения кварц-диккитового типа и рудопроявления лиственитового типа. Среди них выделяются объекты, содержащие золото или

минералы-спутники золотого оруденения в близповерхностных условиях — антимонит, реальгар, аурипигмент и др. К ним относятся ртутные кварц-диккитовые месторождения Олюторское, Ляпнагай, Нептун и Тавена. На выявление золотортутного месторождения лиственитового типа перспективно рудопроявление горы Туманная на о. Карагинском.

Заключение

Особенности физико-химических свойств золота и ртути привели к формированию не только ртутьсодержащих золоторудных и золотосодержащих ртутных, но и комплексных золотортутных месторождений. В пределах золотортутной формации выделены четыре геолого-промышленных типа: ноксвиллский, карлинский, кючюсский и хемлоский, включающие месторождения с крупными запасами золота как за рубежом, так и в России. Выявление золотортутных месторождений, в том числе и за счёт ревизии ртутных рудопроявлений и месторождений Камчатки на золото, приведёт к укреплению минерально-сырьевой базы золота этого региона России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернатонис П.В. Зона окисления Олимпиадинского прожилково-вкрапленного золото-сульфидного месторождения. Автореф. канд. дис. ... геол. мин. наук. Томск, 1999. 19 с.
2. Гладышев В.П., Левицкая С.А., Филиппова Л.М. Аналитическая химия ртути. М.: Наука, 1974. 116 с.
3. Константинов М.М. Золоторудные провинции мира. М.: Научный мир, 2006. 358 с.
4. Копытин В.И., Степанов В.А., Берман Ю.С. Золотосодержащие ртутные месторождения Северо-Востока // Колыма. 1984, № 8. С. 31—34.
5. Магакьян И.Г. Рудные месторождения. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 335 с.
6. Малышев В.М., Румянцев Д.В. Золото. М.: Металлургия, 1979. 288 с.
7. Металлогения ртути / Под ред. В.И. Смирнова, В.А. Кузнецова, В.П. Федорчука. М.: Недра, 1976. 255 с.
8. Некрасов Б.В. Основы общей химии: в 2-х томах. М.: Химия, 1974. Т. 2. 688 с.
9. Округин В.М. Новые данные о возрасте и генезисе эпитептермальных месторождений зоны перехода континент-океан // Геодинамика, магматизм и минерализация континентальных окраин Севера Пацифики. Т. 3. Магадан, 2002. С. 36—40.
10. Пляксин И.Н. Система золото-ртуть // Изв. СФХА. 1938. № 10. С. 129—159.
11. Сауков А.А. Геохимия ртути // Труды ИГН АН СССР. 1946. Вып. 76. 128 с.
12. Селинов И.П. Изотопы. М.: Наука, 1970. Т. 1, 2. 1232 с.
13. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. М.: Недра, 1976. 688 с.
14. Степанов В.А. Золото-ртутные месторождения, основы их прогноза и поисков. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: ЦНИГРИ, 1992. 46 с.
15. Степанов В.А. Золото — побочный продукт эволюции ртути как элемента // Международный симпозиум по прикладной геохимии стран СНГ. М., 1997. С. 264—265.
16. Степанов В.А. Геология золота, серебра и ртути. Ч. 2. Золото и ртуть Приамурской провинции. Владивосток: Дальнаука, 2000. 161 с.
17. Степанов В.А., Берзон Р.О., Никольская С.Б. Золото-ртутные месторождения мира. М.: ВИЭМС, 1988. 52 с.
18. Степанов В.А., Берзон Р.О. Выявление золото-ртутных руд на ртутных месторождениях // Разведка и охрана недр. 1985. № 2. С. 27—29.
19. Степанов В.А., Моисеенко В.Г. Геология золота, серебра и ртути. Ч. 1. Золото-ртутные месторождения. Владивосток: Дальнаука, 1993. 228 с.
20. Степанов В.А., Моисеенко В.Г., Мельников А.В. Уникальный рудно-россыпной район Приамурья с высокортутным золотом // Докл. РАН. 2017. Т. 472, № 6. С. 681—685.
21. Bainbridge K.T., Nier A.O. Relative isotopic abundances of the elements // Prelim Report Nuclear Ser. Washington, 1950. P. 9—12.
22. Burnett J.L. A new type of lode gold deposit, the McLaughlin Mine, Napa, Yolo and Lake counties // Calif. Geol. 1986. V. 39. N 1. P. 15—16.
23. Lawrence Bruce J. Mercury historical low for 1990 // Eng. And Mining J. 1991. Vol. 192. N 3. P. 27—35.
24. New Idria becomes gold recovery operation // Skill. Mining Rev. 1982. V. 71. P. 17.
25. Oberthur T., Saager R. Silver and mercury in gold particles from proterozoic Witwatersrand placer deposits of South Africa: metallogenic and geochemical implication // Econ. Geol. 1986. V. 81. N 1. P. 20—31.

REFERENCES

1. Bernatonis P.V. *Oxidation zone of the Olimpiadninskogo vein-disseminated gold-sulphide deposit*. Avtoref. Doct. Diss. Tomsk, 1999, 19 p. (In Russian).
2. Gladyshev V.P., Levickaya S.A., Filippova L.M. *Analytical chemistry of mercury*. M., Nauka Publ., 1974, 116 p. (in Russian).
3. Konstantinov M.M. *Gold ore provinces of the world*. M., Scientific world Publ, 2006, 358 p. (In Russian).

4. Kopytin V.I., Stepanov V.A., Berman YU.S. Gold content of mercury deposits in the Northeast. *Kolyma*, 1984, no 8, pp. 31–34. (In Russian).
5. Magak'yan I.G. *Ore deposits*. M., Gosgeoltekhizdat Publ., 1955, 335 p. (In Russian).
6. Malyshev V.M., Rumyantsev D.V. *Gold*. M., Metallurgy Publ., 1979, 288 p. (In Russian).
7. *Metallogeny of mercury*. (Ed. by V.I. Smirnov, V.A. Kuznecov, V.P. Fedorchuk). M., Nedra Publ., 1976, 255 p. (In Russian).
8. Nekrasov B.V. *Fundamentals of General Chemistry: in 2 volumes*. M., Chemistry Publ, V. 2, 688 p. (In Russian).
9. Okrugin V.M. New data on the age and genesis of epithermal deposits of the continent-ocean transition zone. *Theses of the meeting. Geodynamics, magmatism and mineralogy of the continental margins of the North Pacific*, V. 3, Magadan Publ., 2002, pp. 36–40. (In Russian).
10. Plaksin I.N. Gold-mercury system. *Izvestiya, SFHA*, 1938, no 10, pp. 129–159. (In Russian).
11. Saukov A.A. *Geochemistry of mercury*. M., Publ. IGN AN SSSR, 1946, V. 76, 128 p. (In Russian).
12. Selinov I.P. *Isotopes*. M., Nauka Publ., 1970, V. 1–2, 1232 p. (In Russian).
13. Smirnov V.I. *Geology of deposits*. M., Nedra Publ., 1976, 688 p. (In Russian).
14. Stepanov V.A. *Gold-mercury deposits, the basics of their forecast and search*. Avtoref. Doct. Diss., M., Publ. CNIGRI, 1992, 46 p. (In Russian).
15. Stepanov V.A. Gold is a by-product of the evolution of mercury as an element. *Theses of International Symposium on Applied Geochemistry of CIS Countries*. M., 1997, pp. 264–265. (In Russian).
16. Stepanov V.A. *Geology of gold, silver and mercury*. P. 2. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2000, 161 p. (In Russian).
17. Stepanov V.A., Berzon R.O., Nikol'skaya S.B. *Gold and mercury deposits of the world*. M., VIEMS Publ., 1988, 52 p. (In Russian).
18. Stepanov V.A., Berzon R.O. Identification of gold-mercury ores in mercury deposits. *Exploration and protection of mineral resources*, 1985, no 2, pp. 27–29. (In Russian).
19. Stepanov V.A., Moiseenko V.G. *Geology of gold, silver and mercury*. P. 1. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 1993, 228 p. (In Russian).
20. Stepanov V.A., Moiseenko V.G., Mel'nikov A.V. A unique ore-placer region of the Priamurye region with high mercury gold. *Dokl. RAS*, 2017, V. 472, no 6, pp. 681–685. (In Russian).
21. Bainbridg K. T., Nier A.O. *Relative isotopic abundances of the elements. Prelim Report Nuclear Ser.* Washington, 1950, pp. 9–12.
22. Burnett J.L. A new tipe of lode gold deposit, the McLaughlin Mine, Napa, Yolo and Lake counties. *Calif. Geol.* 1986, v. 39, no 1, pp. 15–16.
23. Lawrence Bruce J. Mercury historical low for 1990. *Eng. And Mining J.* 1991, v. 192, no 3, pp. 27–35.
24. New Idria becomes gold recovery operation. *Skill. Mining Rev.* 1982, v. 71, p. 17.
25. Oberthur T., Saager R. Silver and mercury in gold particles from proterozoic Witwatersrand placer deposits of South Africa: metallogenic and geochemical implication, *Econ. Geol.*, 1986, v. 81, no 1, pp. 20–31.

ГЕОИНФОРМАТИКА

УДК 550.8.013 + 551.1

**ТРЕХМЕРНОЕ ГИС МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕХЛА СТРЕЛЬЦОВСКОЙ КАЛЬДЕРЫ
НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
И КРОВЛИ ФУНДАМЕНТА**

И.О. НАФИГИН, С.А. УСТИНОВ, В.А. ПЕТРОВ

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук (ИГЕМ РАН)
35, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия
e-mail: nafigin@igem.ru*

На основе рассмотрения и анализа различных подходов к получению данных для построения цифровой модели рельефа и типов трёхмерного представления поверхностей обоснован выбор наиболее оптимальной методики для построения и визуализации трёхмерной модели вулканогенно-осадочного чехла Стрельцовской кальдеры в Восточном Забайкалье. Создание подобной модели определяется необходимостью обнаружения, идентификации и мониторинга процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения на урановых месторождениях Стрельцовского рудного поля, обрабатываемых подземным способом в сложных горно-геологических условиях. Для решения поставленной задачи на основе данных дистанционного зондирования, геофизических исследований, результатов векторизации и обработки картографических материалов проводилось моделирование рельефа дневной поверхности и кровли фундамента. Пространство, заключённое между построенными поверхностями за счёт алгоритма создания замкнутого каркаса из поверхностей преобразовано в новый объект, представляющий собой трёхмерную объёмную модель вулканогенно-осадочного чехла кальдеры. Полученные результаты позволят создать прогнозную модель тектонодинамического состояния массивов горных пород Стрельцовского рудного поля при обработке месторождений и проектировании горных выработок.

Ключевые слова: географическая информационная система; трёхмерное моделирование; цифровая модель рельефа; Стрельцовская кальдера; Стрельцовское рудное поле.

**THREE-DIMENSIONAL GIS MODELING OF THE STRELTISOVSKAYA CALDERA'S
COVER ON THE BASIS OF SURFACE RELIEF AND THE BASEMENT'S TOP
DIGITAL MODELS**

I. O. NAFIGIN, S.A. USTINOV, V.A. PETROV

*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (IGEM RAS)
35, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia
e-mail: nafigin@igem.ru*

Based on the consideration and analysis of different approaches to obtaining data for constructing a digital elevation model and types of three-dimensional surface representation, the choice of the most optimum technique for construction and visualization of three-dimensional model of the volcano-sedimentary cover of the Streltsovskaya caldera in Eastern Transbaikalia has been substantiated. The creation of such model determines the need for detection, identification and monitoring of processes, phenomena and factors of natural and anthropogenic origin at uranium deposits of the same named ore field, which are developed by underground way in difficult mining and geological conditions. To solve this problem, modeling of the daylight surface relief and the basement roof has been carried out on the basis on remote sensing data, geophysical studies, cartographic materials vectorization and processing results. The space between the constructed surfaces due to the algorithm for creating closed framework of surfaces has been transformed into a new object representing three-dimensional volumetric model of the caldera volcano-sedimentary cover. The received results allow creating a predictive model of the tectonic and dynamic state of the Streltsovsky ore field rock massifs for the deposits development and mine workings design.

Keywords: geographic information system; three-dimensional modeling; digital elevation model; Streltsovskaya caldera; Streltsovsky ore field.

Стрельцовская кальдера, сформированная в процессе позднемезозойской тектоно-магматической активизации региона, является элементом Монголо-Охотского складчатого пояса и расположена в западной части Приаргунского тектонического блока. Она находится в районе сочленения двух мезозойских вулканических поясов — Большехинганского и Восточно-Монгольского. К кальдере приурочено крупнейшее в России стрельцовское рудное поле, включающее 19 урановых и молибден-урановых месторождений, которые обрабатываются ПАО «ППГХО» (Приаргунское производственное горно-химическое объединение) [2] (рис. 1).

Согласно федеральным нормам и правилам в области использования атомной энергии НП-064-05 (2005) [8], в связи с активной эксплуатацией месторождений, их обработкой, прежде всего подземным способом, в пределах рассматриваемой вулканотектонической структуры необходимо проведение исследований на обнаружение и идентификацию процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения. Для достижения данной цели должен быть решён це-

лый ряд задач, одной из которых является моделирование вулканогенно-осадочного чехла, в границах которого расположено большинство месторождений Стрельцовского рудного поля (СРП). Процесс построения цифровой модели чехла Стрельцовской кальдеры включает в себя сбор, организацию, анализ, сопоставление и визуализацию геологической и топографической информации. Полученные результаты моделирования, представленные в виде трёхмерного геоинформационного проекта, в дальнейшем составят основу для прогнозной модели тектонодинамического состояния массивов горных пород СРП при отработке месторождений и проектировании горных выработок.

Источники исходных данных для построения цифровой модели рельефа

Для создания трёхмерной модели чехла Стрельцовской кальдеры проводилось моделирование рельефа дневной поверхности и кровли фундамента на базе построения отдельных цифровых моделей. Цифровая модель рельефа (ЦМР) представля-

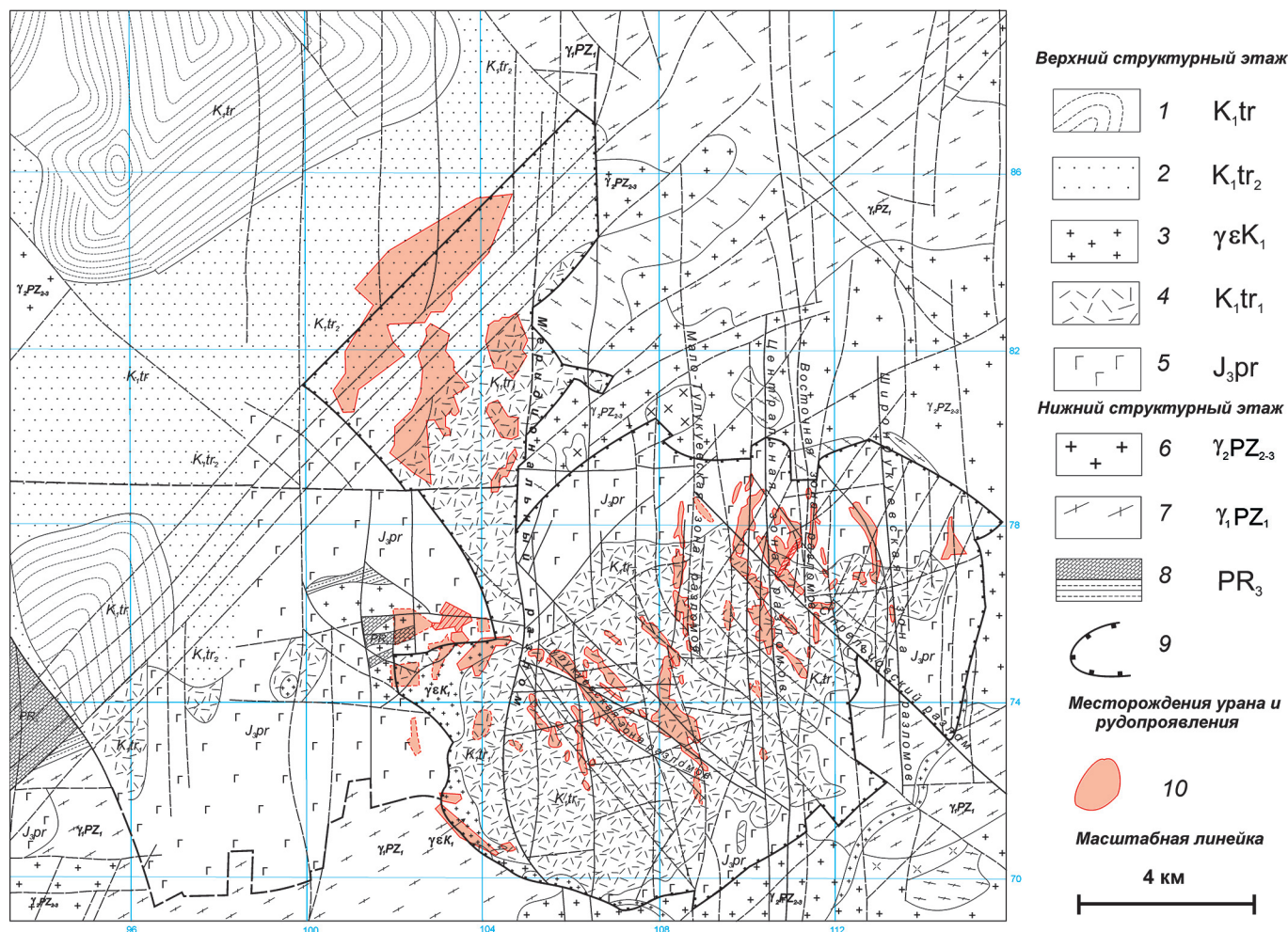


Рис. 1. Картограмма Стрельцовского рудного поля (по данным ПАО «ППГХО»): 1 — кутинская свита; 2 — тургинская свита (верхняя толща); 3 — породы субвулканической фации; 4 — тургинская свита (нижняя толща); 5 — приаргунская свита; 6 — граниты варийского интрузивного цикла; 7 — граниты каледонского интрузивного цикла; 8 — мрамора и кристаллические сланцы; 9 — контур Стрельцовской кальдеры; 10 — месторождения урана и рудопроявления

ет собой особый вид трёхмерных математических моделей, отражающий поверхность рельефа как реальных, так и абстрактных полей [9]. По мере развития спутниковой отрасли, информационных систем и технологий появляются новые более точные способы и методы построения ЦМР. В настоящее время существует два основных подхода получения данных для построения ЦМР, различающихся по механизмам сбора информации.

Первый подход включает в себя методы дистанционного зондирования (сбор данных) и фотограмметрии (обработка данных). Среди рассматриваемых методов наибольшее распространение получили радиолокационная интерферометрия, стереоскопическая обработка радиолокационных данных, воздушно-лазерное сканирование (ВЛС). На сегодняшний день технология ВЛС является наиболее быстрым и достоверным способом сбора пространственно-геометрической информации о рельефе местности, гидрографии, растительном покрове и всех наземных объектах, попавших в полюс съёмки [9].

Второй подход заключается в оцифровке изолиний или точек высот растровых топографических карт с последующей интерполяцией. Несмотря на трудоёмкость и порой недостаточную точность моделирования, этот метод в ближайшие годы будет оставаться единственным источником получения данных о рельефе некоторых территорий [4].

Помимо первичных способов получения информации о рельефе, включающих обработку и специальную подготовку растровых материалов, существуют общедоступные базы данных, созданные национальными топографо-картографическими службами США, Канады, Израиля, Дании и некоторых других стран, содержащие готовую информацию для создания и анализа ЦМР. Признанным лидером среди данных служб является Геологическая служба США, которая обеспечивает свободный доступ пользователей к пяти типам данных, позволяющим визуализировать ЦМР в трёхмерном пространстве. Доступные типы данных различаются по технологиям получения, графическому разрешению и пространственному охвату.

Основные типы цифровых моделей рельефа

Наиболее широко распространяемыми типами трехмерного представления поверхности в геоинформационных системах являются GRID и TIN модели (рис. 2).

В основе GRID модели лежит регулярная сеть высот, неделимым элементом которой является пиксель, содержащий значение высоты. При расчёте регулярной сети необходимо учитывать шаг сетки, который определяет её пространственное разрешение. К примеру, свободно распространяемая ЦМР Aster Global Dem, построенная по дан-

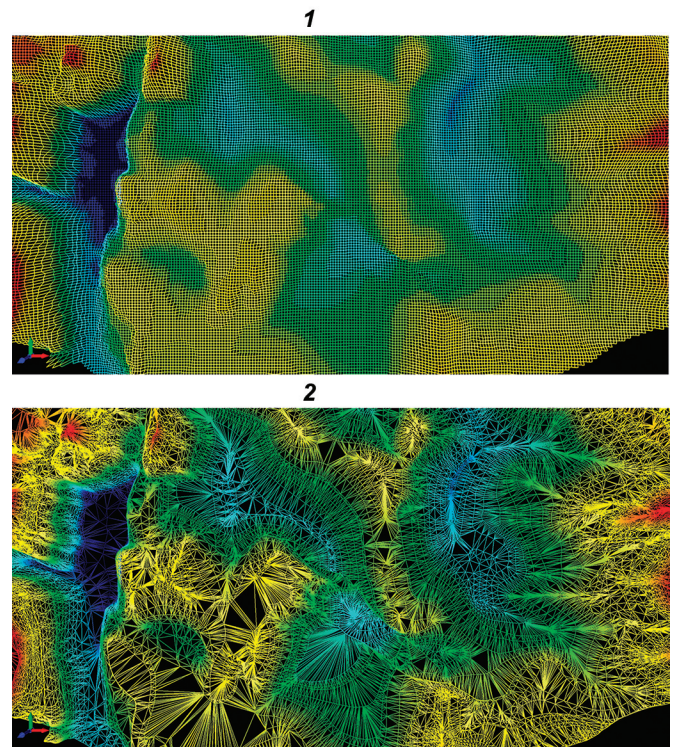


Рис. 2. Структура регулярной и нерегулярной цифровой модели поверхности фундамента Стрельцовой кальдеры: 1 – регулярная (GRID); 2 – нерегулярная (TIN)

ным стереоскопической оптической и интерферометрической радиолокационной космической съёмки, имеет пространственное разрешение в 30 м, а ЦМР на основе данных SRTM (Shuttle radar topographic mission), полученная посредством радарной топографической съёмки, имеет пространственное разрешение 90 м.

Среди нерегулярных сеток наибольшую популярность в моделировании цифрового рельефа завоевала треугольная сеть неправильной формы — модель TIN. В процессе построения данной модели обеспечивается непрерывность поверхности при нерегулярном расположении точек. Основным способом расчёта TIN модели является метод триангуляции Делоне [6]. По сравнению с другими методами он обладает наиболее подходящими для рассматриваемого типа ЦМР свойствами [5].

Обоснование выбора типа цифровой модели рельефа

TIN и GRID модели получили широкое распространение в географических информационных системах (ГИС) и повсеместно используются многими видами программного обеспечения. Каждый при этом имеет свои недостатки и достоинства, которые были учтены при планировании решения поставленной задачи.

Помимо скорости и простоты обработки, а также визуализации, несомненным достоинством GRID модели (рис. 2), благодаря растровой струк-

туре, является механизм сглаживания моделируемой поверхности, что позволяет избежать резких переходов в виде граней и выступов. С другой стороны, это свойство негативно сказывается на моделировании горных районов с обилием круглых склонов, обрывов и остроконечных вершин. В таком случае происходит размыв структурных линий, что искажает передачу «пластики» рельефа. Тем не менее эта проблема может быть решена путём увеличения пространственного разрешения модели до приемлемого качества [3].

TIN модель лишена подобных недостатков, так как при её построении используется нерегулярная сеть треугольников, позволяющих моделировать плоские участки небольшим числом больших треугольников, а на участках круглых склонов, оврагов, где необходимо детально показать все грани рельефа, поверхность отображается многочисленными маленькими треугольниками. Очень важным моментом является то, что узлы TIN модели строятся строго по опорным точкам (без использования интерполяции или аппроксимации), а их топологические связи представлены векторами, т. е. такая модель может быть математически обработана. К недостаткам TIN модели следует отнести большие затраты вычислительных ресурсов на обработку и визуализацию модели, а наиболее существенный недостаток проявляется в виде «эффекта террас», представленного «псевдотреугольниками» — плоскими участками в заведомо невозможной геоморфологической ситуации (например, по линии днища V-образных долин), снижающими точность и качество самой модели [3]. Подобный эффект образуется по причине малого числа точек цифровой записи горизонталей по сравнению с расстоянием между самими горизонталями, что характерно для большинства топографических карт [1]. Частичное решение данной проблемы состоит в дополнительном анализе и непосредственной ручной корректировке при построении TIN модели сети тальвегов, водоразделов, линий перегибов и разрывов горизонталей [9].

Построение цифровых моделей рельефа дневной поверхности и кровли фундамента

Опираясь на исходные данные, учитывая все достоинства и недостатки рассмотренных механизмов моделирования рельефа, было принято решение использовать для построения ЦМР нерегулярную сеть высот TIN [7]. Это вызвано тем, что дальнейшее построение трёхмерной модели вулканогенно-осадочного чехла связано с математическими операциями над построенными поверхностями, которые в виду специфических особенностей менее точны для GRID модели.

В качестве исходных для построения ЦМР дневной поверхности Стрельцовой кальдеры вы-

ступали данные комбинированной топографической съёмки масштаба 1 : 2000, проведённой ПАО «ППГХО», занимающегося отработкой месторождений СРП. Данные были представлены в табличном формате. Поля содержали информацию о координатах высотных отметок в локальной системе координат ПАО «ППГХО» и значения высот.

Данные по высотным отметкам кровли фундамента, полученные на основе геофизических исследований и глубинного бурения, были представлены в виде изогипс на геолого-структурной карте фундамента Тулукуевской впадины с шагом 20 м.

Методика проведённой работы включала в себя несколько этапов. Первый этап заключался в осуществлении географической привязки и оцифровки растровой информации о рельефе фундамента. Поскольку имеющийся графический материал в виду соображений секретности, которые позднее были сняты, привязан в особой системе координат ПАО «ППГХО», не совпадающей ни с одной из широко используемых глобальных систем координат, возникли затруднения с привязкой всех имеющихся графических материалов в общей системе, что крайне необходимо при создании единой модели. Решением данной проблемы стала схематическая геологическая карта СРП (рис. 1), на которой были нанесены как применяемая на объектах геодезическая, так и географическая координатные сетки. После географической привязки карты СРП (проекция Гаусса-Крюгера, датум Пулково 1942) она использовалась в качестве топографической основы и критерия точности для привязки геолого-структурной карты фундамента Тулукуевской вулканотектонической структуры, в состав которой входит Стрельцовская кальдера.

Векторизация привязанных растровых данных осуществлялась в программном продукте Easy Trace 7.99 (свободная версия) в полуавтоматическом режиме, который позволяет контролировать весь процесс, исключив при этом существенные ошибки. Перед началом трассировки с растровой картой были проведены основные подготовительные операции, включавшие уменьшение числа цветов в палитре изображения до 12, очистку изображения от лишних данных (неинформативные пиксели, шум), выделение оттенков изогипс посредством инструмента «Бинаризация» и вынесение их на отдельный слой.

Обычно программные продукты, предоставляющие возможность построения ЦМР требуют конкретного входного типа исходных данных. К примеру, для того, чтобы создать ЦМР в ГИС MapInfo или QuantumGIS по оцифрованным изолиниям топографической карты, изолинии необходимо разбить на множество точек. Программное обеспечение (ПО) типа Surfer и Global Mapper не требует такой подготовки и позволяет создавать поверхности как из изолиний, так и из точек, имеющих

атрибутную информацию о высотных отметках. При этом не все ГИС позволяют осуществлять полноценную работу (просмотр, редактирование, конвертация) с моделями в трёхмерной среде. Для создания модели в трёхмерном пространстве использовалась горно-геологическая информационная система (ГГИС) «Micromine», которая оперирует точечными данными при построении рассмотренных выше моделей. Поэтому ранее оцифрованные изогипсы кровли фундамента были конвертированы в набор точек с помощью модуля Vertical Mapper ГИС MapInfo. Набор данных был сохранён в табличном формате со структурой, идентичной набору данных для рельефа дневной поверхности.

На втором этапе в среде ГГИС «Micromine» были созданы две пустые оболочки файлов, содержащие утвержденную ранее структуру представления данных. Посредством встроенной функции импорта текстовой и табличной информации пустые оболочки файлов заполнялись исходными данными для дальнейшего построения рельефа дневной поверхности и кровли фундамента.

На третьем этапе производилось построение нерегулярной сети высот рельефа дневной поверхности и кровли фундамента посредством встроенного модуля «Построение цифровой модели поверхности из точек данных». Данная функция требует указать исходный файл с набором данных, а также поля (столбцы), отвечающие за значения

высотных отметок, положение на оси абсцисс и на оси ординат. Также рассматриваемая функция предоставляет возможность ограничить построение модели вводом граничного полигона или координат левого верхнего и правого нижнего углов граничной прямоугольной области.

На четвертом этапе полученные цифровые модели дневной поверхности и кровли фундамента были приведены к общим параметрам отображения в единой трёхмерной геоинформационной среде (рис. 3).

С целью оценки точности географической привязки на модель рельефа была нанесена геологическая и схематическая карты СРП. Благодаря визуальному сравнению полученных моделей поверхностей с привязанным картографическим материалом границы карьеров месторождений Тулукуевское и Красный камень точно совпадают с углублениями на цифровой модели рельефа. Также сопоставлялись зоны выступов фундамента на ЦМР с обнажениями массивов гранитов варисского интрузивного цикла и выходами пород приаргунской свиты, относящимися к выступам фундамента и обозначенными на картографическом материале.

Построение каркасной модели

Трёхмерная модель вулканогенно-осадочного чехла Стрельцовой кальдеры представляла собой каркасную модель, т. е. набор треугольников, окон-

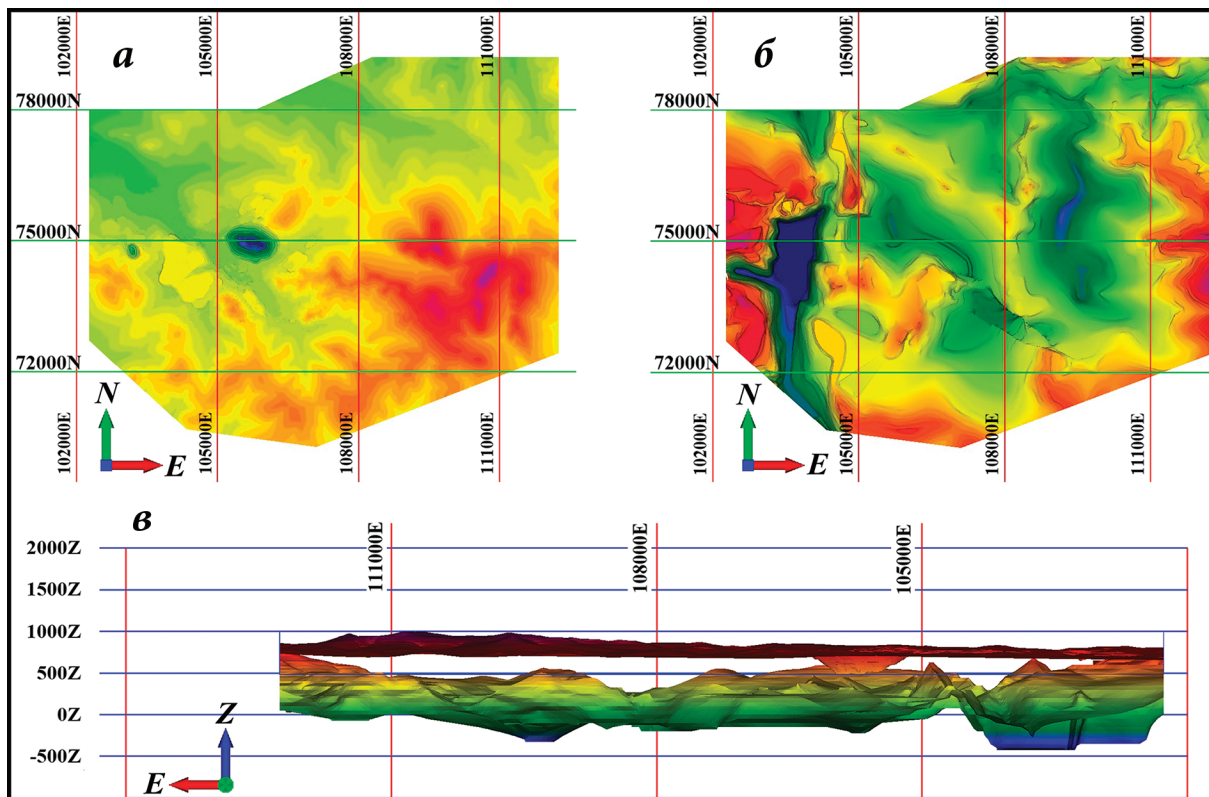


Рис. 3. Цифровая модель поверхности и кровли фундамента Стрельцовой кальдеры, представленные в прямоугольной системе координат ПАО «ППГХО»: а – цифровая модель рельефа дневной поверхности; б – цифровая модель рельефа кровли фундамента; в – совмещенные цифровые модели в единой геоинформационной среде

турирующих в трёхмерном пространстве геологический объект. Построенные ранее модели поверхностей (дневной и кровли фундамента) являются также кровлей и подошвой вулканогенно-осадочного чехла. Но если их отобразить совместно в ортогональном плане, то выявляется разность в зоне покрытия, которая объясняется разным площадным охватом исходных картографических материалов и использованных наборов данных для дневной поверхности и кровли фундамента. Чтобы решить эту проблему был создан прямоугольный полигон, вписанный в перекрываемое обеими плос-

костями пространство. Далее посредством функций булевой алгебры у каждой из поверхностей были выявлены внутренние и внешние части. Внешние части были удалены, так как при наличии информации только лишь об одной ограничивающей чехол поверхности не представляется возможным построить трёхмерную модель.

Имея две равноплощадные поверхности (если рассчитывать площадь без учёта рельефа) посредством функции «Создание замкнутого каркаса из поверхностей», была построена трёхмерная объёмная модель вулканогенно-осадочного чехла Стрель-

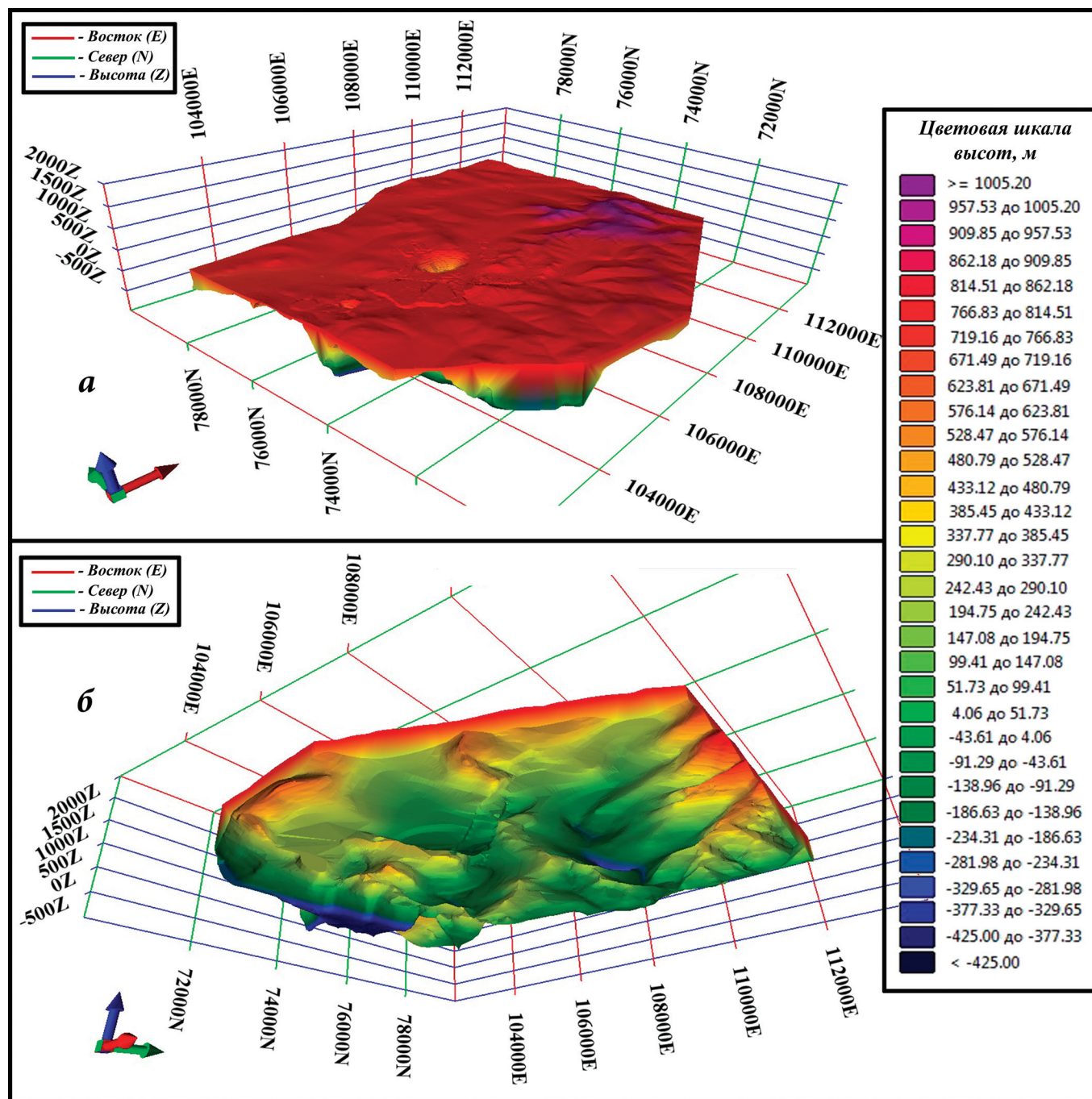


Рис. 4. Трёхмерная (объёмная) модель вулканогенно-осадочного чехла Стрельцовской кальдеры, представленная в прямоугольной системе координат ПАО «ППГХО»: а — вид на северо-восток (изометрический); б — вид на северо-запад (изометрический)

цовской кальдеры (рис. 4). Использованная функция заключается в построении новых наборов треугольников между границами двух поверхностей алгоритмом триангуляции Делоне.

Выводы

В результате проведённой работы, анализа и обработки исходных материалов были решены задачи, связанные со сбором, организацией и визуализацией данных. Кроме того, решены вопросы географической привязки геологических, топографических, тектонических, схематических и других видов карт в единой системе географических координат. Выполнена трудоёмкая работа по оцифровке растрового материала. Обоснован выбор метода интерполяции и построения сети высот. Осуществлено приведение цифровых моделей поверхнос-

тей рельефа и кровли фундамента к единой трёхмерной геоинформационной среде с последующим совместным отображением в совокупности с геологическими и схематическими картами для подтверждения точности географической привязки созданных моделей. Построена трёхмерная модель вулканогенно-осадочного чехла Стрельцовской кальдеры, которая будет в дальнейшем использоваться для прогноза тектонодинамического состояния массивов горных пород Стрельцовского рудного поля при отработке месторождений и проектировании горных выработок.

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания ИГЕМ РАН «Развитие интегрированной информационной системы для пространственно-временного моделирования рудообразующих систем месторождений стратегических металлов на основе ГИС технологий».

ЛИТЕРАТУРА

1. Арифупов Р.С. Перспективы создания цифровых моделей геологических карт с использованием персональных баз геоданных // *ArcReview*. 2010. Т. 53. № 2. С. 45–57.
2. Ишукова Л.П., Модников И.С., Сычев И.В., Наумов Г.Б., Мельников И.В., Кандинов М.Н. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Иркутск: Типография Глазовская, 2007. 260 с.
3. Капралов Е.Г., Кошкарёв А.В., Тикунов В.С. Основы геоинформатики. Книга 1. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 352 с.
4. Новаковский Б.А., Прасолов С.В., Прасолова А.И. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей. М.: Научный мир, 2003. 94 с.
5. Самардак А.С. Геоинформационные системы. Владивосток: ДВФУ, 2005. 124 с.
6. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. Томск: Изд-во Томского университета, 2002. 128 с.
7. Устинов С.А., Петров В.А. Использование детальных цифровых моделей рельефа для структурно-линеamentного анализа (на примере Уртуйского гранитного массива, ЮВ Забайкалье) // *Геоинформатика*. 2016. № 2. С. 51–60.
8. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии (ОИАЭ)» — НП-064-05. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. М., 2005. 48 с.
9. Хромых В.В., Хромых О.В. Цифровые модели рельефа. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. 178 с.

REFERENCES

1. Arifulov R.Ch. Perspektivy sozdaniya tsifrovyykh modelei geologicheskikh kart s ispol'zovaniem personal'nykh baz geodannykh [The prospects for creation of digital models of geological maps with the use of personal geodatabases]. *ArcReview*, 2010, vol. 53, no. 2, pp. 45–57. (In Russia)
2. Ishchukova L.P., Modnikov I.S., Sychev I.V., Naumov G.B., Mel'nikov I.V., Kandinov M.N. *Uranovye mestorozhdeniya Strel'tsovskogo rudnogo polya v Zabaikal'e* [Uranium deposits of the Strel'tsovsky ore field in Transbaikalia]. Irkutsk, Typography Glazovskaya, 2007, 260 p. (In Russia)
3. Kapralov E.G., Koshkarev A.V., *Osnovy Geoinformatiki. Kniga 1* [Geoinformatics Basics. Book 1]. M., Publishing center «Academy», 2004, 352 p. (In Russia)
4. Novakovskii B.A., Prasolov S.V., Prasolova A.I. *Tsifrovye modeli rel'efa real'nykh i abstraktnykh geopolei* [Digital elevation models of real and abstract geographic fields]. M., Scientific World Publ., 2003. 94 p. (In Russia)
5. Samardak A.S. *Geoinformatsionnye sistemy* [Geoinformation system]. Vladivostok, FEPU Publ., 2005, 124 p. (In Russia)
6. Skvortsov A.V. *Triangulyatsiya Delone i ee primeneniye* [Delaunay triangulation and its application]. Tomsk, Tomsk state University Publ., 2002, 128 p. (In Russia)
7. Ustinov S.A., Petrov V.A. Ispol'zovanie detal'nykh tsifrovyykh modelei rel'efa dlya strukturno-lineamentnogo analiza (na primere granitnogo massiva Urtu Yugo-Vostochnogo Zabaikal'ya). [Use of detailed digital elevation models for structural-lineament analysis (by the example of Urtu granite massif, South-Eastern TRANS-Baikal region)]. *Geoinformatics*, 2016, vol. 31, no. 2, pp. 51–60. (In Russia)
8. *Federal'nye norma i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi energetiki — 064-05. Uchet vneshnikh vozddeystvii prirodnogo i tekhnogennogo proiskhozhdeniya na ob'ekty ispol'zovaniya atomnoi energetiki.* [Federal rules and regulations in the field of nuclear energy — 064-05. The account of external impacts of natural and anthropogenic origin on the objects of use of atomic energy]. M., Standartinform Publ., 2005, 48 p. (In Russia)
9. Khromykh V.V., Khromykh O.V. *Tsifrovye modeli rel'efa* [Digital elevation models]. Tomsk, Tml-Press Publ., 2007, 178 p. (In Russia)

ВОПРОСЫ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 550.83

**О МЕТОДИКЕ ПРЕПОДАВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН
В ИНСТИТУТЕ НАУК О ЗЕМЛЕ ЮФУ**

Н.Е. ФОМЕНКО

*Институт наук о Земле Южного федерального университета
40, Зорге ул., г. Ростов н/Д 344090, Россия
e-mail: FNEgeophyskohle@yandex.ru*

Обсуждаются результаты работ, выполненных студентами на практических занятиях и во время прохождения учебных практик. Проанализированы причины и трудности в усвоении студентами знаний по разведочной геофизике. Установлен недостаток в получении будущими инженерами практических навыков работы с геофизической аппаратурой и оборудованием и дальнейшем осмысливании собственно измеренных параметров естественных и искусственно созданных геофизических полей. Кратко описывается усовершенствованная методика преподавания будущим инженерам-геологам и инженерам-геоэкологам предмета геофизики путём включения практических работ с геофизической аппаратурой на эталонной площадке по ул. Зорге с задачами изучения инженерно-геологического разреза и картирования на этой территории подземных коммуникаций. Приводятся другие примеры выполнения студентами геофизических исследований на объектах учебных геофизических практик с последующим детальным геолого-геофизическим истолкованием.

Ключевые слова: Институт наук о Земле; методика преподавания геофизических дисциплин; процесс обучения.

**ON METHODOLOGY OF TEACHING GEOPHYSICAL COURSES
AT THE INSTITUTE OF EARTH SCIENCES, SFU**

N.E. FOMENKO

*Institute of the Earth Sciences of the Southern Federal Institute
40, Zorge street, Rostov-na-Donu 344090, Russia
e-mail: fnegeophyskohle@yandex.ru*

The results of the works undertaken by students on practical classes and during educational practices have been discussed. Causes and difficulties in student learning of exploratory geophysics have been analyzed. It has been found a deficiency in practical skills of future engineers relevant to the work with geophysical facilities and equipment and further mental processing of the measured parameters of natural and artificial geophysical fields. A brief description has been given for improvements in the methodology of teaching geophysics to future geology and geoecology engineers via inclusion of practical works with geophysical equipment on the test site on the Zorge Street with tasks linked to engineering-geological cross-section study and mapping underground infrastructure on the given area. There are some other examples of student involvement in solution of geophysical tasks on the objects of educational geophysical practices with subsequent detailed geological and geophysical interpretation.

Keywords: Institute of Earth Sciences; geophysical courses teaching methodology; education process.

Институт наук о Земле ЮФУ (ИНОЗ) является приемником геолого-географического факультета РГУ. Геофизические дисциплины читаются: а) бакалаврам по направлениям: «Геология» и «Экология и природопользование»; б) специалистам по направлению «Прикладная геология»; в) магистрам по направлению: «Экология и природопользование».

Цель статьи: 1) показать пути совершенствования преподавания геофизических дисциплин в РГУ-ЮФУ; 2) обсудить результаты работ, выполненных студентами на практических занятиях и во время прохождения учебных практик; 3) рассмотреть вопрос оптимизации процесса обучения в рамках Болонской системы.

Геофизические дисциплины были включены в программы обучения горных инженеров в вузах России в начале XX в., т. е. почти одновременно с зарождением разведочной геофизики. Дату 15 января 1931 г., когда осуществилась в г. Ростове-на-Дону реорганизация Северо-Кавказского университета — предшественника РГУ, можно считать началом изучения студентами-геологами основ геофизических знаний.

Встречи и дискуссии выпускников геолого-географического факультета РГУ со своими бывшими преподавателями привели к заключению, что действующая методика аудиторного обучения не даёт студентам необходимую систему геофизических знаний, позволяющую молодым специалистам решать в производственных условиях сложные задачи поисково-разведочных работ на нефть, газ, уголь, редкие и радиоактивные элементы, а также при гидрогеологических, геоэкологических и инженерно-геологических изысканиях. Следствием являлось представление результатов комплексной геолого-геофизической интерпретации в геологических отчётах в не должной форме. Нередкими являлись случаи различающейся трактовки основных выводов в геологических и геофизических главах. Об этом свидетельствует и обзор замечаний экспертов Государственной комиссии запасов (ГКЗ) и Главной государственной экспертизы России (ФАО «Главгосэкспертиза РФ»).

Анализ перечисленных фактов привёл к выводу, что трудности усвоения студентами знаний по разведочной геофизике связаны прежде всего с недостатком у них практических навыков работы с геофизической аппаратурой и оборудованием, включая последующий анализ измеренных параметров геофизических полей. Обмен опытом с преподавателями других вузов показал, что при решении этой проблемы преимуществом соответственно пользуются геологические факультеты в составе которых имеются отдельные лаборатории с комплектами аппаратурных средств, позволяющими выполнять эксперименты индивидуально каждым студентом. Когда же аппаратура имеется в единичном экземпляре, преподавателю ничего не остаёт-

ся, как переходить к «плакатному способу» подачи материала.

На геолого-географическом факультете РГУ проблема «плакатной методики» знакомства с геофизической аппаратурой и порядком работы с ней была решена автором статьи посредством проведения практических занятий по геофизическим дисциплинам непосредственно в полевых условиях. Для натурных измерений на прилегающей к зданию факультета газонной территории по ул. Зорге были размечены две эталонные площадки, на которых в осеннем семестре в благоприятный погодный период (сентябрь—ноябрь) и в весеннем семестре (апрель—май) студентами выполняются геофизические наблюдения. Занятия проводятся по подгруппам из 12—14 студентов. Преподаватель предварительно готовит 3—4 комплекта аппаратуры. Длительность каждого практического занятия предусматривается в течение трёх—четырёх академических часов. Этого времени достаточно для объяснения каждой бригаде из 2—3 студентов методики и техники проведения того или иного эксперимента с последующими натурными измерениями. Полученные результаты студенты обрабатывают в компьютерных классах. Обязательное требование — составление отчётов и их представление преподавателю в твердой копии в виде сшива для защиты с получением оценки по нормативно-балльной шкале.

В неблагоприятное для полевых работ время аудиторные занятия по геофизическим дисциплинам включают метрологический контроль используемых геофизических приборов и определение физических свойств горных пород на образцах: 1) плотности; 2) удельного электрического сопротивления жидкостей; 3) скорости распространения упругих волн; 4) магнитной восприимчивости; 5) содержания радия (Ra), урана (U), и тория (Th) в порошковых пробах.

Модернизированный учебный план изучения студентами геофизических дисциплин получил одобрение руководства факультета и всех заведующих профильными кафедрами. Он позволил ориентировать студентов на расширение и углубление получаемой в процессе обучения системы знаний в геофизической области.

Схема эталонных площадок для проведения геофизических измерений студентами ИНОЗ приведена на рис. 1. Территория находится в западном жилом массиве Советского района г. Ростова-на-Дону по улице Зорге между зданиями ИНОЗ и химического факультета ЮФУ. Участок работ представляет собой ровную газонного вида поверхность, где отсутствуют строения. Через площадку проходят подземные трассы теплоснабжения, бытовой канализации, водопроводов и телефонных кабелей. Поставленные перед студентами задачи сводятся к проведению полевых работ, включающих ознакомление с комплектами геофизической аппаратуры, изучение геологического разреза на

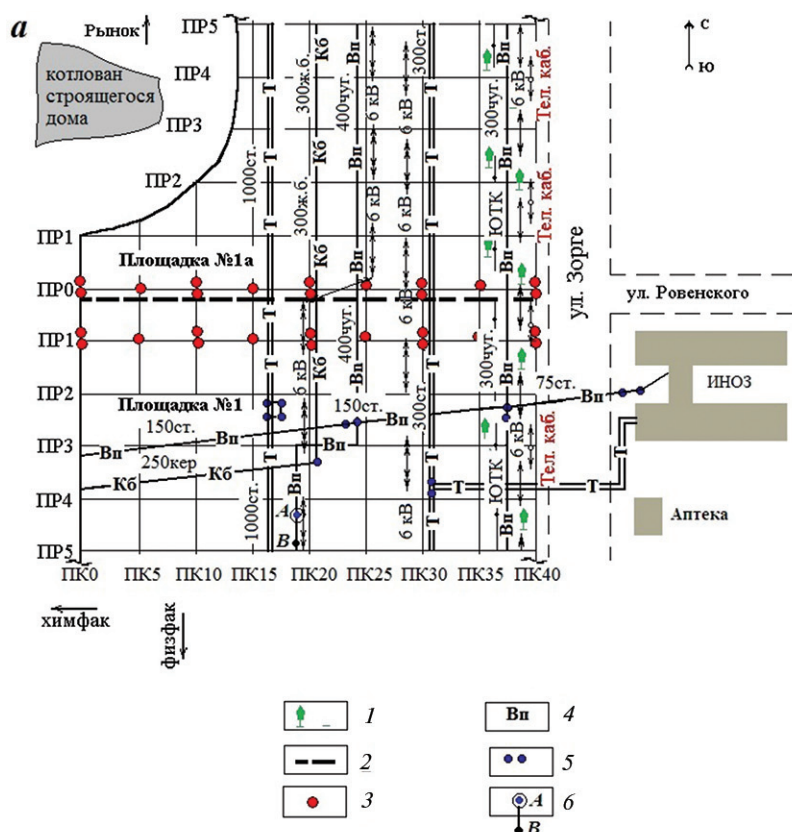


Рис. 1. Схема эталонных площадок проведения геофизических измерений (а); фотографии площадок (б) и котлована, вскрывающего геологический разрез до глубины залегания грунтовых вод (в): 1 — деревья, 2 — асфальтовая дорожка, 3 — разметочная лунка, 4 — подземные коммуникации, 5 — люки, 6 — место заряда

глубину, определение уровня грунтовых вод (УГВ), а также поиск и картирование подземных коммуникаций.

На рис. 2 приведён пример картирования подземных коммуникаций методами магнитометрии (а), электропотенциального томографического зондирования (ЭПТЗ) в форме электропрофилирования (б), заряженного тела (в) и радиолокационного подповерхностного зондирования (РЛЗ) (г) на площадке 1 по профилю 3. Инженерно-геологический разрез известен и положение подземных коммуникаций тоже. Следовательно, по результатам наблюдений студенты решают прямую геофизическую задачу на натурном объекте.

Первоначальное рассмотрение материалов, полученных студентами в результате проведённых измерений (рис. 2), показывает, что на всех графиках фиксируется амплитудный эффект над трубами магистральной теплосети диаметром 1000 мм, которые расположены между пикетами 15 и 20. Эти трубы залегают ближе других к дневной поверхности (глубина 1,5 м), поэтому аномальные поля хорошо выражены не только в методе «заряда» (возбуждение электромагнитного поля контактным способом путём подсоединения одного из питающих электродов непосредственно к трубе), но и на графиках магниторазведки (бесконтактный

способ измерений) и ЭПТЗ (возбуждение электрического поля на дневной поверхности). Вторая ветка теплосети в районе 30-х пикетов, как и трубы магистральной теплосети, проложена на глубине 1,7 м и имеет диаметр (300 мм), т. е. в 3,3 раза меньший, чем у магистральных труб. Ветка проявляется (пикет 30) на графиках метода заряженного тела или «заряда» весьма слабо выраженным соотношением максимума горизонтальной (H_x) и минимума вертикальной (H_z) магнитных составляющих напряжённости электромагнитного поля. Аномалии возникают за счёт наведённой индукции от труб магистральной теплосети [1]. От этой же индукции достаточно ярко фиксируется железобетонная труба бытовой канализации (КБ) диаметром 300 мм. Над этой трубой составляющая H_z характеризуется положительной аномалией, а составляющая H_x — отрицательной. Причина инверсии по отношению к стальным трубам — появление в железобетонной конструкции токов Фуко.

Чугунные трубы водопровода (Вп), трассируемые вдоль пикетов 28 и 37, в индукционном поле не проявляются. Сказывается влияние увеличенной глубины залегания (порядка 2,2 м) и уменьшенного диаметра (400 и 300 мм), который в 2,5 и 3,3 раза меньше, чем у магистральных труб теплосети. И главное: электропроводность чугуна в 5÷10

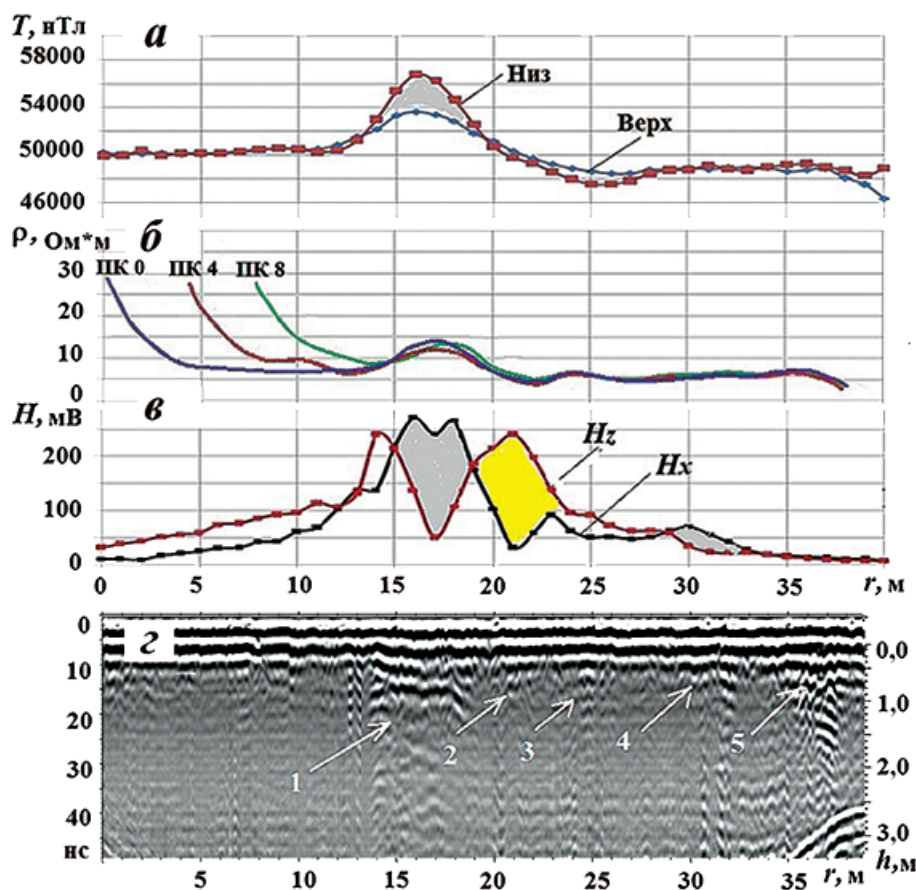


Рис. 2. Пример картирования на площадке 1 подземных коммуникаций методами магнитометрии (а), электропотенциального томографического зондирования (ЭПТЗ) в форме электропрофилирования (б), заряда в трубу теплосети на частоте 30 кГц (в) и радиолокационного подповерхностного зондирования (РЛЗ) на частоте 400 МГц (г)

раз меньше стали. В то же время косвенным признаком нахождения в грунте труб водопровода является общее снижение интенсивности магнитного поля в интервале пикетов 25—40 (чугун, как известно, является диамагнитным материалом).

Необходимо отметить, что процесс расшифровки аномалий малой амплитуды является важным этапом, развивающим у студентов аналитическое мышление с требованием углублённого изучения особенностей распределения тех или иных геофизических полей в среде, содержащей (включающей) малоконтрастные по физическим свойствам объекты. В рассматриваемом примере существует возможность ещё и проанализировать радарограмму, картина которой содержит вертикально ориентированные зоны (рис. 2, г). В них верхняя часть характеризуется «проседанием» осей синфазности и ниже — «звучащей» записью. Зоны соответствуют местоположению траншей с обратной засыпкой в которых проложены подземные коммуникации из труб теплосети (индексы 1 и 4), бытовой канализации (индекс 2), водовода (индекс 3) и телефонного кабеля (индекс 5). На радарограмме отсутствуют характерные для одиночных объектов малого размера области дифрагированных волн,

что объясняется тем, что трубы размещены в низкоомной среде (удельное сопротивление (ρ) меньше $10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), т. е. в среде с сильным поглощением электромагнитных волн.

Продолжая анализ графиков, приведённых на рис. 2, прежде всего следует ещё раз подчеркнуть, что трубы теплосети и водопровода выполнены из стали и чугуна и поэтому являются проводниками. Следовательно, при «заряде», т. е. возбуждении в этих трубах переменного электромагнитного поля, можно измерять с помощью магнитной антенны возникающую индукцию в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Характерный признак «заряженного» электропроводящего объекта — положительная аномалия H_x и отрицательная H_z (рис. 2, в). Ещё один отличительный диагностический признак труб теплосети — положительные аномалии на графиках электропрофилирования (рис. 2, б). Это значит, что трубы теплосети имеют диэлектрическое покрытие.

Для более детального изучения анализируемых объектов на эталонных площадках, помимо охарактеризованных, используются и другие методы, способы и приёмы проведения экспериментов и интерпретации полученных данных. На рис. 3 при-

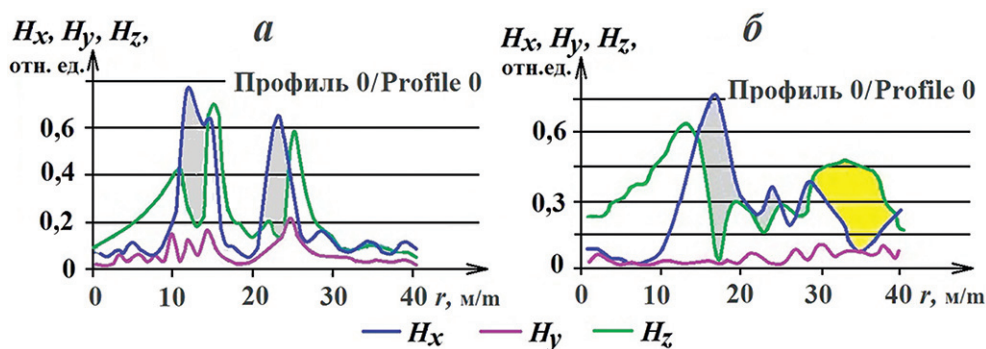


Рис. 3. Графики индуцированного поля, зарегистрированные на площадке 1, профиль 0 при подключении питающей линии к трубе водовода на частоте возбуждаемого тока 30 кГц (а) и таком же подключении при возбуждении тока на частоте 625 Гц (б)

ведён пример, когда метод «заряда» реализован на одной и той же трубе посредством возбуждения электромагнитного поля на двух частотах, что в разведочной геофизике называется внутриметодным комплексированием. Измерения напряженности составляющих электромагнитного поля H_x , H_y , H_z проведены на профиле 0 при «заряде» в трубу водовода с возбуждением поля на частоте 625 Гц и таком же подключении при возбуждении тока на частоте 30 кГц. При этом необходимо подчеркнуть, что труба водовода чугунная и её электропроводность в 5÷10 раз меньше стали, что предопределяет соответствующий индукционный эффект. Рассмотрение графиков на рис. 3, а показывает, что по сравнению с таковыми графиками на рис. 2, в, когда «заряд» на частоте 30 кГц выполнен в трубу теплотрассы, «заряженная» чугунная труба водовода со-

здаёт вполне читаемый амплитудный эффект и такой же эффект от стальных труб теплотрассы за счёт формирования в них вторичной индукции. В то же время при подключении «заряда» к трубе водовода на частоте 625 Гц соотношение амплитуд от труб теплотрассы и водопровода резко изменяется, при том что в интервале пикетов 30÷40 происходит инверсия график H_x и H_z (рис. 3, б). Причина, по всей видимости, заключается в разной плотности индуцируемого поля на частотах 30 кГц и 625 Гц и возникновении токов Фуко в кабельных сетях.

На рис. 4 приведены план-графики результатов геофизических наблюдений на площадке 1а методами магниторазведки (а), импульсного естественного переменного электромагнитного поля (б) и гамма-спектрометрии (в). Из рассмотрения план-графиков следует, что стальные трубы магистраль-

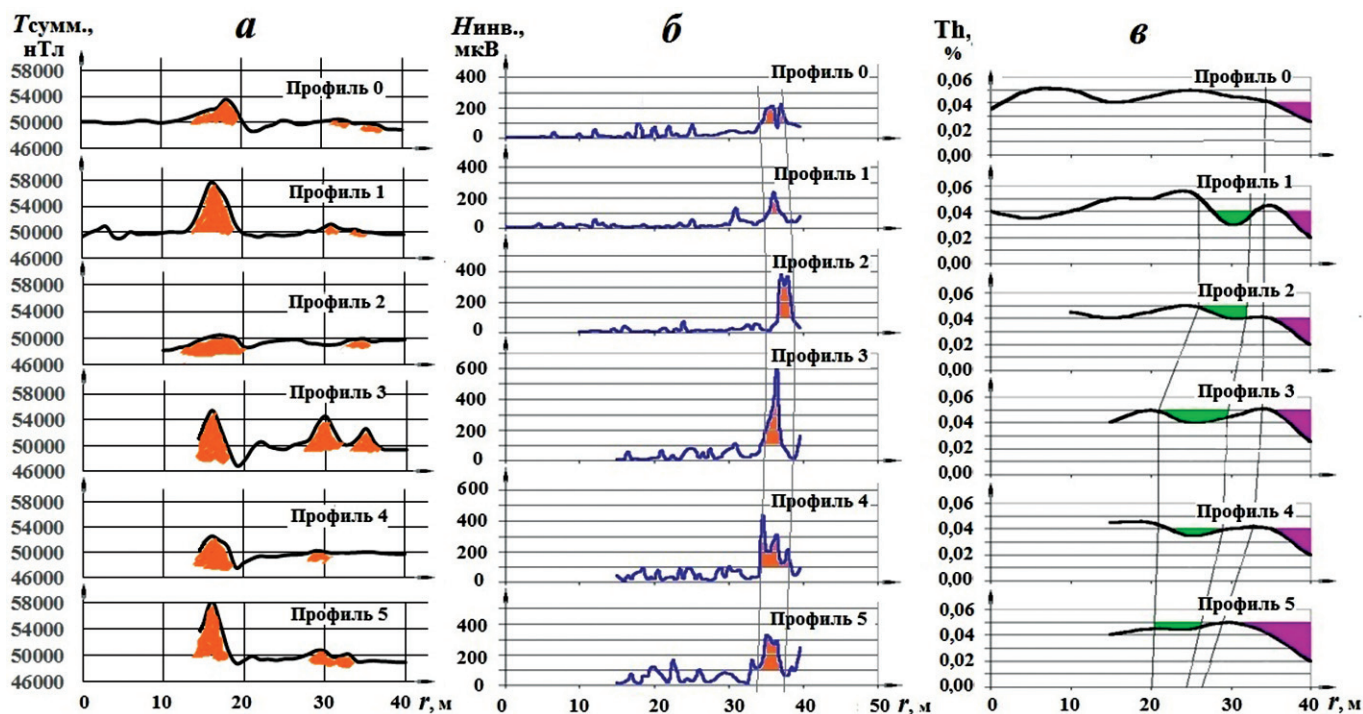


Рис. 4. Результаты картирования подземных коммуникаций на эталонной площадке 1а методами магниторазведки (а), импульсного естественного переменного электромагнитного поля (б) и гамма-спектрометрии (в)

ной теплосети диаметром 1000 мм выделяются устойчивыми положительными аномалиями магнитного поля в интервале пикетов 10—20 (рис. 4, а). Такие же по составу трубы, но в 3,3 раза меньшего диаметра, характеризуются в аномальном магнитном поле в интервале пикетов 30—33 более слабо выраженными положительными аномалиями, за исключением профиля 3, в районе которого произведена врезка труб строящегося дома.

Над полосой прокладки телефонного кабеля фиксируются положительные аномалии импульсного естественного переменного электромагнитного поля (рис. 4, б), а из рассмотрения графиков, характеризующих спектрометрию естественной радиоактивности покровных отложений по содержанию тория, следует, что несмотря на малое содержание этого элемента (в среднем 0,04%), устойчивые отрицательные аномалии выявляются на всех профилях в интервалах пикетов 20—40 (рис. 4, в) и, по всей видимости, обусловлены влиянием корневой системы деревьев, посаженных по обочинам асфальтового полотна по ул. Зорге.

Навыки экспериментальных наблюдений, приобретаемые студентами в рамках практических и лабораторных работ по курсам «Геофизические методы» и «Экологическая геофизика», закрепляются во время летних учебных практик. Последние проводятся как в Ростове-на-Дону и его окрестностях, так и на учебных полигонах «Белая речка»

в республике Адыгея и «Лиманчик» в районе пос. «Абрау-Дюрсо» на Черноморском побережье.

Рис. 5—7 иллюстрируют результаты геофизических работ при изучении линзы донных отложений, которые складировались на левом берегу реки «Темерник» при очистке её русла на территории Ботанического сада ЮФУ. Схема участка геофизических работ приведена на рис. 5. Объект изучался методами электроразведки и электропрофилирования (рис. 6), а также магниторазведки, радиоспектрометрии и сейсморазведки (рис. 7). Электро-разведочными и сейсмическим методами решались задачи по оценке: 1) глубины залегания грунтовых вод и идентичности по разрешающей способности методов вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и электропотенциального томографического зондирования (ЭПТЗ) (рис. 6, а и 7. в); 2) особенностей строения геологического разреза по данным ЭПТЗ (рис. 6, б), 3) обводнённости толщи и направления фильтрации подземных вод по данным электропрофилирования методами постоянного естественного электрического поля (ЕП) и пространственной электрической фильтрации (МПЭФ) (рис. 6, в, г) [2].

Для изучения степени загрязнённости линзы донных отложений использовались методы гамма-спектрометрии (рис. 7, а) и магнитометрии (рис. 7, б). При проведении сейсморазведочных работ методом преломлённых волн (МПВ) перед студентами ста-

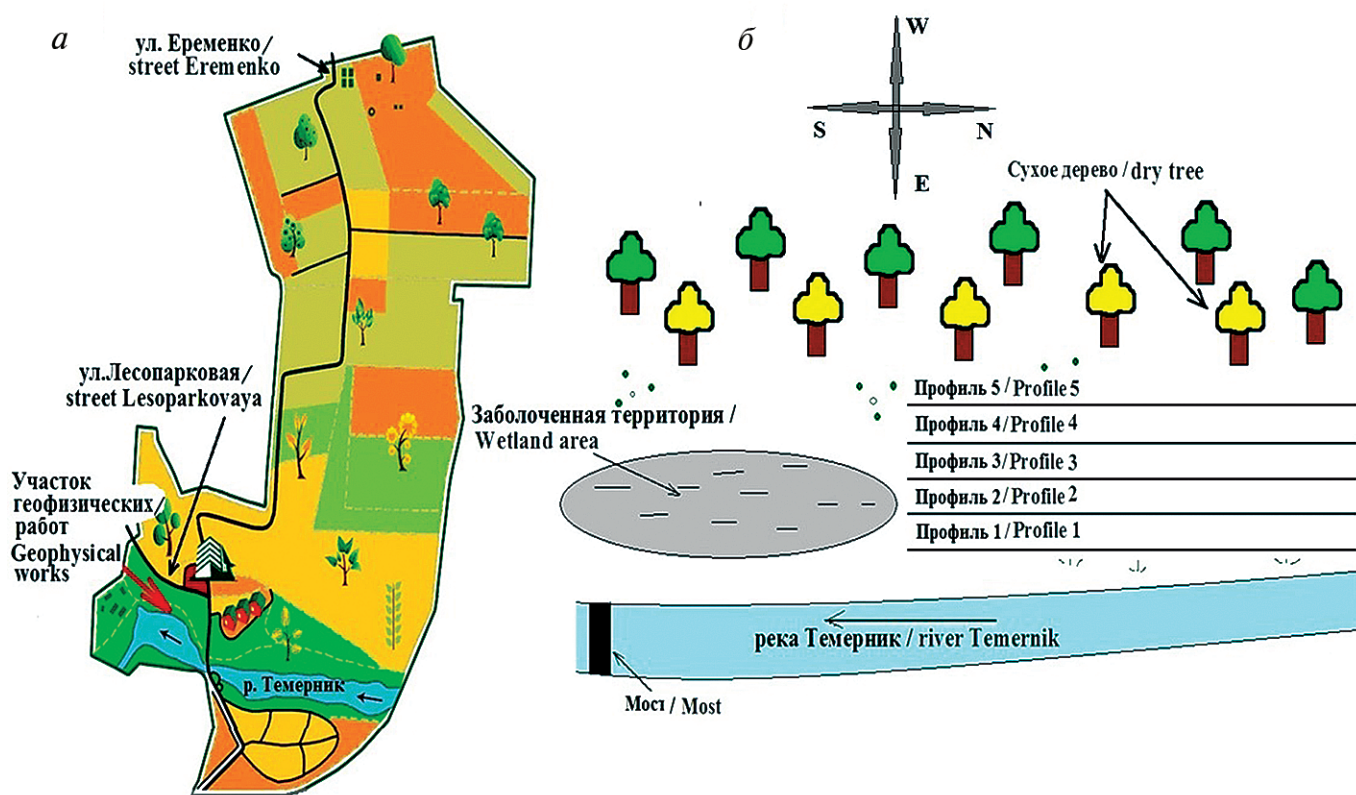


Рис. 5. Схема участка геофизических работ на левом берегу р. Темерник на территории Ботанического сада ЮФУ

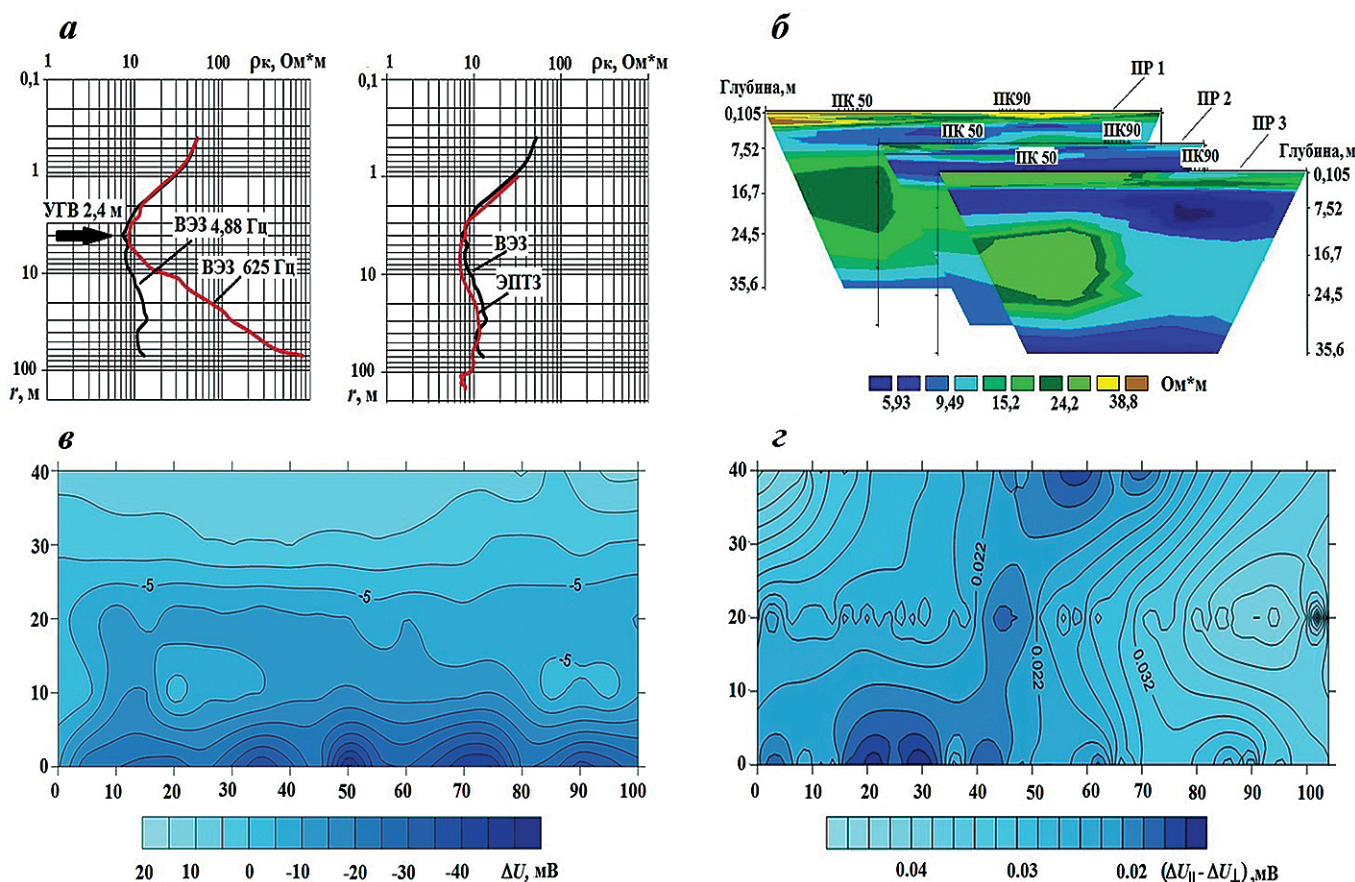


Рис. 6. Результаты электроразведочных работ методами: вертикального и электропотенциального томографического зондирования с построением геоэлектрического разреза (а, б) и постоянного естественного электрического поля и пространственной электрической фильтрации (в, г)

вилась задача по усвоению методики регистрации продольных и поперечных упругих волн в геологической среде с последующим построением сейсмологического разреза в программе «Zond» (рис. 7, в). Рассмотрение графиков на рис. 7 показывает, что аномальное поле по радиационной загрязнённости линзы квазиоднородно и не представляет опасности. Загрязнённость линзы металлическими предметами железистого ряда также невелика, при том, что колебания интенсивности магнитного поля на 5-м профиле более значительны по сравнению с таковыми по линии 4-го профиля. Уровень грунтовых вод на сейсмогеологическом разрезе по данным МПВ находится на глубине порядка 2,5 м и фиксируется границей различных скоростей поперечных волн 0,19 и 0,68 км/с.

Обратимся теперь к периоду 2011–2013 гг., связанному с переходом ИНОЗ на Болонскую систему (БС) образования, где основным нормативным документом является федеральный государственный отраслевой стандарт (ФГОС). Согласно положениям этого стандарта, комплекс изучаемых студентами предметов по одной и той же специализации получается неодинаковым. В то же время в периодической печати, а также в ведущих научных журналах [2, 7–12] всё чаще отмечается, что исполь-

зуемые в производственных и коммерческих структурах технологии меняются так быстро, что университеты не успевают запускать планы по подготовке специалистов под эти технологии. Это приводит к пониманию того, что система подготовки специалистов должна принципиальным образом перестраиваться. Таким образом, нужно уходить от линейной подготовки узкоспециализированных инженеров. Путь к этому лежит через анализ единых глубоко продуманных обязательных программ, созданных в период 50–80-х гг. XX в. [4–6]. Прогрессивной системой тогда являлось обучение студентов в первые два года по единой системе базовой инженерной подготовки. В направлениях по геологическим специальностям это большой почасовой объём для дисциплин общей геологии, иностранного языка, математики, физики, химии, IT-технологий, физики Земли, общей геофизики, структурной геологии, основ минералогии и петрографии. На этой широкой базовой подготовке студентам имеется возможность выбирать более узкую специализацию.

Заключение

Приступая к написанию статьи, автор ставил своей целью особо подчеркнуть значимость предпо-

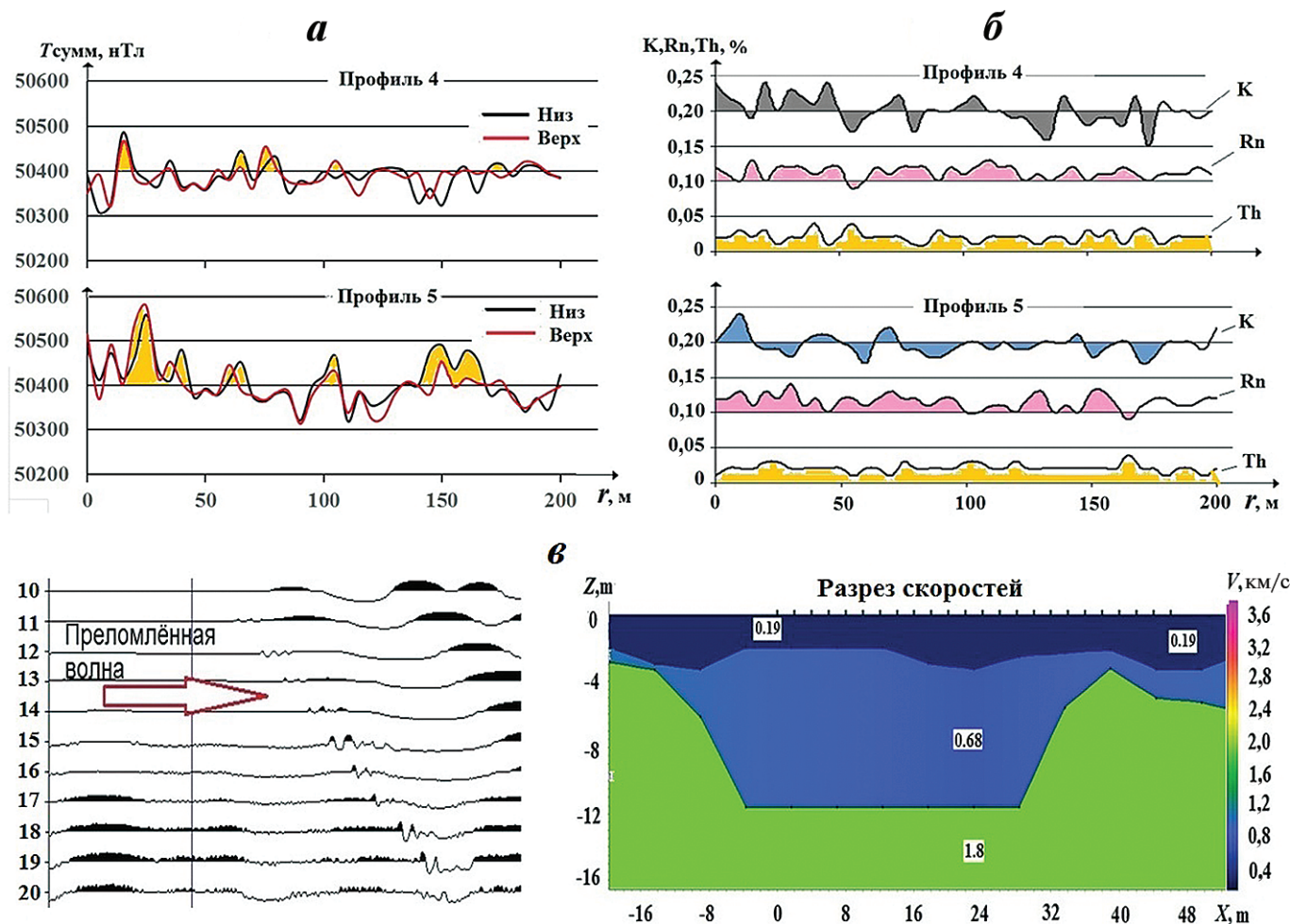


Рис. 7. Интенсивность радиационного (а) и магнитного (б) полей и сейсмогеологический разрез по результатам метода преломлённых волн (в) над линзой донных отложений на левом берегу р. Темерник на территории Ботанического сада ЮФУ в г. Ростове-на-Дону

давания геофизических дисциплин в ИНОЗ ЮФУ и других родственных вузах при подготовке инженеров-геологов и инженеров-геоэкологов. Актуальность проблемы диктуется современными требованиями, когда эффективность геолого-разведочных работ, включая вопросы охраны окружающей среды и экологических последствий, немыслима без применения и широкого использования геофизических методов. Опережающее изучение этими методами поисковых и разведочных площадей на начальных этапах позволяют получить первичную исходную информацию для прогнозирования и выявления нефтегазовых, рудных и нерудных полезных ископаемых, а в последующие стадии провести глубокую детализацию. С этой целью особое внимание в статье уделено целесообразности включения в процесс обучения полевых наблюдений, в том числе в условиях ограниченности наличия в вузах новых видов геофизической аппаратуры и специально оборудованных под эксперименты учебных аудиторий. Опыт показывает, что заинтересованность к изучаемому предмету значительно повышается: студенты в натуральных условиях получают информацию о существовании того или ино-

го геофизического поля и пытаются регистрируемым параметрам найти объяснение. Отсюда и начинается формирование системы знаний и представлений с пониманием физико-геологических процессов, происходящих в земной коре. Учитывая вышеизложенное, предлагается не только закрепить методику преподавания геофизики с включением практических работ, проводимых на натуральных объектах, но и существенно увеличить число часов на изучение теоретической части курса. В рамках Болонской системы образования это вполне возможно за счёт корректировки дисциплин вариативного ряда и тем самым воссоздания и усиления единой системы базовой инженерной подготовки. Это предложение, по мнению автора, справедливо и для ряда других базовых геологических дисциплин. Конечный результат должен быть один: подготовка высококвалифицированных инженеров-геологов, глубоко знающих геофизику, и также инженеров-геофизиков, в совершенстве освоивших фундаментальные геологические дисциплины. Иначе мы получим неполноценных специалистов, так называемых метропроцентов, которые оценивают запасы полезного ископаемого по фак-

тическим замерам пересечённого скважиной рудного объекта или нефтяного (угольного) пласта, без глубокого обоснования условий образования и

генетической природы и тем самым нередко ошибаются в истинном значении исследуемого объекта. Этого нельзя допускать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобачев А.А., Большаков Д.К., Модин И.Н., Шевнин В.А. *Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей*. Т. II. Малоглубинная электроразведка / Под ред. проф. В.А. Шевнина, доц. А.А. Бобачева. Изд. 2, перераб. и доп. М.: Изд.-во МГУ, 2013. 123 с.
2. Брянкин К.В., Авдеева А.В., Брянкина Л.В. Системы обеспечения качества образовательных программ на основе принципов болонского процесса // *Современные проблемы науки и образования*. 2018. № 1. RL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=27371> (дата обращения: 09.05.2018).
3. Дронова Е.А., Плешакова А.Н., Рудь Д.А., Фоменко Н.Е. Геоэкологическое обследование поймы реки Тёмный на территории Ботанического сада Южного федерального университета (ЮФУ) комплексом геофизических и геохимических методов // *Проблемы геологии и освоения недр. Труды XVI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 110-летию со дня основания горно-геологического образования в Сибири*. Томск: Изд.-во ТПИ, 2012. С. 530–532.
4. Костицын В.Н. Образовательная и научная деятельность кафедры геофизики Пермского государственного университета // *Геофизический вестник*. 2010. № 1. С. 14–18.
5. Мамышев В.Г. Геофизики и геологи будущего // *Геофизика*. 2015. №4. С. 57–64.
6. Попов В.В. Как нас учили и как учим мы // *Каротажник*. 2013. №2 (224). С. 96–113.
7. Романовская И.А. Развитие инновационной позиции преподавателей высшей школы в процессе организационного обучения // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=9093> (дата обращения: 09.05.2018).
8. Усова А.В., Яшалова Н.Н., Ильясов А.А., Рубан Д.А. Прикладные аспекты развития учебной мотивации студентов // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2017. №2 (77). С. 170–178.
9. Шнейдер Е.М., Димитрюк Ю.С., Тамошкина Е.В. Инновационные изменения в современном высшем образовании России // *Современные проблемы науки и образования*. 2017. № 5. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=26813> (дата обращения: 09.05.2018).
10. Baldridge W.S., Bedrosian P.A., Biehler S., Braile L.W., Ferguson J.F., Folsom M., Jiracek, G.R., Kelley S.A., McPhee D.K., Pellerin L., Snelson C.M. Summer of Applied Geophysical Experience (SAGE): Training for our future geoscientists. Vol. 34. Issue 10. October 2015. P. 1214–1219.
11. Paolo Dell'Aversana. Neurobiological Background of Exploration Geosciences. New Methods for Data Analysis Based on Cognitive Criteria // Chapter 8 – Applications to Education in Geosciences. 2017. P. 171–183.
12. Seong Won Han. National education systems and gender gaps in STEM occupational expectations // *International Journal of Educational Development*. 2016. July. Vol. 49. P. 175–187.

REFERENCES

1. Bobachev A.A., Bol'shakov D.K., Modin I.N., Shevnin V.A. *Elektrozvedka: posobie po ehlektrozvedochnoj praktike dlya studentov geofizicheskikh spetsial'nostej*. T.II. Maloglubinnaya ehlektrozvedka / Pod red. prof. V.A. Shevnina, dots. A.A. Bobacheva [Electric surveying: a textbook on electric surveying practice for students of geophysical specialties, vol. II, Shallow-depth electric surveying, edition. 2, revised and enlarged]. M., MSU Publ, 2013, 123 p. (in Russian).
2. Bryanin K.V., Avdeeva A.V., Bryankina L.V. Systems of quality provision for educational programs on the basis of principles of the Bologna process. *Journal of Computer-Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2018, no 1, RL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=27371> (date accessed: 09.05.2018). (in Russian).
3. Dronova E.A., Pleshakova A.N., Rud' D.A., Fomenko N.E. Geocological surveying of the floodplain of the Temernik River on the territory of the Botanical Garden of the Southern Federal University with a complex of geophysical and geochemical approaches. *Problemy geologii i osvoeniya neдр. Trudy XVI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashennogo 110-letiyu so dnya osnovaniya gorno-geologicheskogo obrazovaniya v Sibiri*. [Problems of Geology and exploitation of mineral resources. Proceedings of the XVI international Symposium named after academician M. A. Usov of students and young scientists, dedicated to the 110th anniversary of mining and geological education in Siberia], Tomsk, TPI Publ, 2012, pp. 530–532. (In Russian).
4. Kostitsyn V.N. Obrazovatel'naya i nauchnaya deyatel'nost' kafedry geofiziki Permskogo gosudarstvennogo universiteta. [Educational and scientific activity of the department of geophysics of the Perm State University] *Geofizicheskij vestnik — Geophysical Bulletin*, 2010, no 1, pp. 14–18. (In Russian).
5. Mamyashev V.G. Geofiziki i geologi budush-hego. [Geophysicists and geologists of the future] *Geofizika — Geophysics*, 2015, no 4, pp. 57–64. (In Russian).
6. Popov V.V. Kak nas uchili i kak uchim my. [How we were taught and how do we teach], *Karotazhnik — of Well logging*, 2013, no 2 (224), pp. 96–113. (In Russian).
7. Romanovskaya I.A. A development of innovation position of teachers of the higher school in the process of organizational learning. *Journal of Computer-Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=9093> (date accessed: 09.05.2018). (in Russian)
8. Usova A.V., Yashalova N.N., Il'yasov A.A., Ruban D.A. Prikladny'e aspekty` razvitiya uchebnoj motivacii studentov [Applied aspects of development students' educational motivation]. *Vestnik Cherepoveczkogo gosudarstvennogo universiteta — Herald of Cherepovets state University*, 2017, no 2(77), pp. 170–178. (In Russian).
9. Shnejder E.M., Dimitryuk YU.S., Tamoshkina E.V. Innovation changes in the modern higher education of Russia. *Journal of Computer-Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* 2017, no 5. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=26813> (date accessed: 09.05.2018). (in Russian)
10. Baldridge W.S., Bedrosian, P.A., Biehler S., Braile L.W., Ferguson J.F., Folsom M., Jiracek, G.R., Kelley S.A., McPhee D.K., Pellerin L., Snelson C.M. Summer of Applied Geophysical Experience (SAGE): Training for our future geoscientists, vol. 34, Issue 10, October 2015, pp. 1214–1219.
11. Paolo Dell'Aversana. Neurobiological Background of Exploration Geosciences. *New Methods for Data Analysis Based on Cognitive Criteria, Chapter 8 — Applications to Education in Geosciences*, 2017, pp. 171–183.
12. Seong Won Han. National education systems and gender gaps in STEM occupational expectations. *International Journal of Educational Development*, vol. 49, July 2016, pp. 175–187.

ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ

УДК 56

**ЖОРЖ КЮВЬЕ — ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЁНЫЙ-ЕСТЕСТВОИСПЫТАТЕЛЬ
(К 250-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)**

И.А. ЩЕГЛОВ, Ф.Ф. АХУНОВ, Р.У. ЕРЕМЕНКО, В.Н. КОМАРОВ

*ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: komarovmgri@mail.ru*

Жорж Кювье принадлежит к числу крупнейших естествоиспытателей конца XVIII — первой половины XIX вв. Он опубликовал свыше 300 научных работ, в которых затронул самые различные проблемы — от создания сравнительно-анатомического фундамента для построения системы животных до вопросов истории естествознания. Ж. Кювье предложил собственное видение прогресса в органическом мире, которое дало в руки геологов научный метод относительной геохронологии. Созданная им теория катастроф, которыми обуславливалась смена на Земле последовательных фаун и флор, оказала огромное влияние на дальнейшее развитие науки. Итогом её использования явилось появление в первой половине XIX в. стратиграфической шкалы. С трудами Ж. Кювье связана важнейшая реформа зоологической систематики. На основе сравнительно-анатомического метода он впервые обосновал учение о четырёх основных формах организации животных, или планах строения животного царства. Предложенная Ж. Кювье стратиграфическая схема Парижского бассейна стала образцом для расчленения сходных отложений других районов Западной Европы. Приведены краткие сведения о биографии ученого.

К л ю ч е в ы е с л о в а: Жорж Кювье; сравнительная анатомия; систематика; палеонтология; теория катастроф.

**GEORGES CUVIER — AN OUTSTANDING SCIENTIST-NATURALIST
(TO THE 250TH ANNIVERSARY OF BIRTHDAY)**

I.A. SHCHEGLOV, F.F. AKHUNOV, R.U. YEREMENKO, V.N. KOMAROV

*Russian State Geological Prospecting University
23, Miklouho-Maklay's street, Moscow 117997, Russia
e-mail: komarovmgri@mail.ru*

Georges Cuvier belongs to the most largest naturalists of the end of 18th — the first half of 19th century. He published more than 300 scientific works, which considered different problems — from the design of comparative-anatomical fundament for the development of the creatures system, to the questions of natural science. Cuvier suggested his own sight of the progress in organic world, which gave to the geologists the scientific method on geochronology. His theory of catastrophes, which provided the change of the subsequent systems of flora and fauna on the Earth, had a huge influence on the further development of science. The result of its use was the appearance of the stratigraphic scale in the first half of 19th century. The most important reform of the zoological systematics is connected with the Kuvier's works. On the base of comparative-anatomical method, he justified for the first time the study of the four main forms of the organization of the creatures, or the plans of the animal kingdom's structure. The stratigraphic scheme of Paris basin, suggested by Kuvier, became the example pattern for the differentiation of the similar deposits in other regions of Western Europe. A brief biographic data has been provided.

Key words: Georges Cuvier; comparative anatomy; systematics; paleontology; theory of catastrophes.



Жорж Кювье

В 2019 г. исполняется 250 лет со дня рождения Жоржа Кювье — выдающегося французского учёного-энциклопедиста, естествоиспытателя, зоолога-систематика, основоположника сравнительной анатомии и палеонтологии позвоночных животных [1—17, 20—22].

Жорж Кювье родился 23 августа 1769 г. в г. Монбельяр. Уже в четыре года он научился великолепно рисовать и свободно читать тексты на французском языке. Когда Ж. Кювье ходил в школу, им умело руководила мать, приобщая к истории, художественной литературе и искусству. Интерес к естествознанию возник у Ж. Кювье в результате чтения многотомного сочинения Ж. Бюффона «Естественная история, всеобщая и частная», иллюстрированного прекрасными гравюрами, изображающими различных животных. После окончания школы Ж. Кювье продолжил обучение в местной гимназии, осваивал латинский и греческий языки, занимался географией, историей и математикой. В 1784 г. он успешно завершил обучение и поступил в военизированную Каролингскую академию в Штуттгарте. Ж. Кювье выделялся среди сверстников исключительными разносторонними способностями. За несколько месяцев он изучил немецкий язык, на котором велось преподавание и, как лучший ученик, получил в конце первого семестра серебряную медаль. Из пяти факультетов академии Ж. Кювье избрал административный, на котором овладевал естественной историей, зоологией, ботаникой, физикой, химией, минералогией, горным делом. На этом факультете преподавали также прикладную математику, технологию, финансовое право, бухгалтерию, знание которых впоследствии пригодилось Ж. Кювье в его государ-

ственной и административной деятельности. Интерес Ж. Кювье к знаниям, увлечение анатомированием насекомых и высших позвоночных поражали его сокурсников. Память у него была феноменальной, он запоминал по несколько тысяч нарисованных им во время экскурсий природных экспонатов насекомых и растений. В 1787 г. Ж. Кювье получил высшую награду Каролингской академии — эмалированный золотой рыцарский крест с почетным титулом — званием «кавалера». По окончании в 1788 г. Каролингской академии ему пришлось в 18 лет взять на себя заботу о семье. Ж. Кювье вынужден был поехать в Нормандию, в г. Кан, где до 1795 г. он работал в качестве домашнего учителя в одной аристократической семье. Близость моря и доступность объектов для изучения окончательно сформировали его склонность к анатомическим исследованиям морских животных [6, 21, 22]. Здесь он самостоятельно исследовал сравнительное строение ракообразных, моллюсков и других морских беспозвоночных, занимался вопросами систематики растений и насекомых, проводил геологические наблюдения. Именно в те годы был заложен фундамент дальнейших революционных работ Ж. Кювье в области классификации беспозвоночных.

Прежде чем создать свою систематику животных, Ж. Кювье внимательно проанализировал сочинение известного, придерживавшегося идеи о неизменяемости видов, французского ботаника А. Жюссье «Роды растений, расположенные в естественном порядке», в котором содержалась первая попытка составить естественную систему растений. К 1790 г. Ж. Кювье почти закончил написание раздела курса конхиологии — науки, изучающей моллюсков, обладающих раковиной. Параллельно он занимался физиологией животных. Его интересовала структура органов не сама по себе, а в связи с функцией тех или иных органов в организме как в целостной системе. В 1794 г. Ж. Кювье активно переписывался со знаменитым французским биологом Э. Жоффруа Сент-Илером, возглавлявшим кафедру позвоночных в Парижском национальном музее естественной истории. Именно Э. Жоффруа Сент-Илер привлёк Ж. Кювье к работе в музее, где его зачислили на должность ассистента, а затем профессора сравнительной анатомии. В 1795 г. Ж. Кювье переселился в Париж, где его выбрали профессором старейшего учебного заведения Франции — Коллеж де Франс. К этому времени Ж. Кювье был уже известным учёным, занимавшим лидирующее положение в области зоологии. Он приступил к чтению курса лекций по сравнительной анатомии и в 1795 г. опубликовал уже более 10 статей. Ж. Кювье чётко изложил систему беспозвоночных, отнесённых К. Линнеем к классу «Червей». Эти исследования Ж. Кювье были не формальным продолжением искусственной системы К. Линнея, а логичной клас-

сификацией хаотического класса «Червей» на отдельные систематические группы. Эту работу можно считать удачной попыткой создания естественной системы беспозвоночных животных. В 1796 г. в Париже был организован Национальный институт Франции на базе реорганизованной Наполеоном Бонапартом Французской академии наук. Годом раньше, по рекомендациям многих французских учёных, очень высоко ценивших талант Ж. Кювье, именно его избрали одним из первых академиков. Знаменательным можно назвать событие, когда Ж. Кювье начал целенаправленно изучать имевшиеся в Королевском ботаническом саду ископаемые остатки, главным образом кости. В 1796 г. он выступил с сообщением о результатах исследований костей мамонтов и ныне живущих хоботных. Базируясь на своих анатомических исследованиях, Ж. Кювье доказывал, что мамонт относится к самостоятельному виду. Колоссальное научное наследие Ж. Кювье, касающееся ископаемых млекопитающих, занимает в истории палеонтологии исключительное место. В 1798 г. Ж. Кювье опубликовал краткий курс лекций по сравнительной анатомии. В 1800—1805 гг. вышли в свет пять томов данного курса. Этот выдающийся труд стал целой эпохой в истории сравнительной анатомии. В 1800 г. Ж. Кювье назначили секретарём, а через два года избрали неперменным секретарём Национального института Франции (бывшей Французской академии наук) по классу физических и математических наук. Этот ответственный пост он занимал до конца своей жизни. В 1800 г. академик Ж. Кювье произвел неизгладимое впечатление на Первого консула Французской республики Наполеона Бонапарта своим «поминальным словом», посвящённым кончине выдающегося натуралиста, члена Французской академии наук Л. Добантона. С этого момента Наполеон Бонапарт, объявивший себя с 1796 г. президентом Национального института Франции, приблизил Ж. Кювье к кругу своих особо доверенных лиц, оценив по достоинству его разнообразные природные дарования и организаторские способности. Наполеон Бонапарт часто привлекал Ж. Кювье к административной государственной службе. В частности, в 1802 г. он назначил Ж. Кювье одним из шести «генеральных инспекторов», которым было поручено создавать лицеи в различных городах Франции. Пребывание в этих городах Ж. Кювье одновременно использовал и для исследования морских животных. В 1802 г. будучи профессором анатомии, он получил кафедру и квартиру в Парижском национальном музее естественной истории, где прожил все оставшиеся годы жизни и написал выдающиеся труды. Уже ранние достижения Ж. Кювье в палеонтологии и сравнительной анатомии были достойно отмечены Императорской академией наук и художеств в Санкт-Петербурге, которая 13 октября 1802 г. из-

брала его в число своих иностранных почётных членов. В 1809—1813 гг. Ж. Кювье энергично занимался реорганизацией образования в Нидерландах и Южной Германии. В награду за результативную деятельность в этом ответственном деле он был удостоен в 1811 г. дворянского титула «шевалье». Перед своим падением в 1814 г. Наполеон назначил Ж. Кювье членом Государственного Совета.

Изучая ископаемые остатки, Ж. Кювье пришёл к выводу о постоянной приуроченности определённых форм ископаемых к конкретным пластам и заинтересовался проблемой различия вымерших и современных организмов. Понимая, что эта проблема не может быть разрешена путём кабинетного изучения чужих коллекций ископаемых, Ж. Кювье решает приступить к полевому изучению последовательности слоёв и заключённых в них остатков различных организмов. В этом отношении интересы Ж. Кювье совпали с таковыми А. Броньяра.

В течение ряда лет Ж. Кювье и А. Броньяр совершают частые экскурсии в окрестностях Парижа, с которым была связана их основная научная деятельность, изучая последовательность пластов (в основном палеогенового возраста) и заключённых в них ископаемых. В 1808 г. они публикуют первое сообщение о результатах своих исследований. В 1812 г. Ж. Кювье опубликовал 4-томное, блестяще оформленное сочинение «Исследование костей ископаемых четвероногих», в котором установил, что в каждом организме между органами имеются определённые соотношения, обуславливающие их взаимное влияние один на другой (принцип соподчинения, или принцип корреляции Кювье). На основании этого сравнительно-анатомические обобщения Ж. Кювье мог по одной кости реконструировать облик ископаемого организма. В качестве приложения к данному труду Ж. Кювье и А. Броньяр выпускают значительно расширенное, снабжённое геологической картой и разрезами описание геологического строения окрестностей Парижа, повторённое во втором, самостоятельном издании в 1822 г. Предложенная Ж. Кювье стратиграфическая схема послужила основой всех последующих вариантов расчленения третичных отложений Парижского бассейна. Одновременно она стала образцом для стратификации сходных отложений других районов Западной Европы.

Ж. Кювье не покидала мысль о том, как объяснить существование многих, давно вымерших комплексов животных и растений и обосновать смену видов в истории Земли. В 1812 г. одновременно с выходом в свет геологического описания окрестностей Парижа, в качестве введения к труду «Исследование костей ископаемых четвероногих», вышла в свет его всемирно известная книга «Предварительные рассуждения», которая в последующих изданиях получила название «Рассуждения о переломах на поверхности Земного шара». В этом тру-

де Ж. Кювье обосновал теорию катастроф, вошедшую в историю естествознания под его именем.

В центр своей концепции Ж. Кювье помещает проблему окружающей среды, предельно радикализируя её — окружающая среда воздействует на живые организмы посредством периодических катастроф: «Итак, жизнь не раз потрясалась на нашей земле страшными событиями. Бесчисленные живые существа становились жертвой катастроф: одни, обитатели суши, были поглощаемы потопами, другие, населявшие недра вод, оказывались на суше вместе с внезапно приподнятым дном моря; сами их расы навеки исчезли, оставив на свете лишь немногие остатки, едва различаемые для натуралистов» [7, с. 83]. Ж. Кювье развивает и тщательно обосновывает мысль о том, что различия видов животных, встречающихся в различных слоях Земли, обусловлены периодически совершавшимися на поверхности Земли катастрофами, уничтожавшими всё живое. После перестройки органический мир обновлялся кардинальным образом. На месте погибших животных появлялись другие, более прогрессивные новые организмы. При этом в «межкатастрофный» период виды оставались неизменными, а между сменяющимися один другой периодами жизни не было никакой закономерной, преемственной связи. Что касается причин появления на Земле новых сообществ организмов, то сам Ж. Кювье пишет об этом следующее: «когда я утверждаю, что каменные пласты содержат кости многих родов, а рыхлые слои — кости многих видов, которые теперь не существуют, я не говорю, что нужно было новое творение для воспроизведения ныне существующих видов; я говорю только, что они не существовали в тех местах, где мы их видим теперь и что они должны были притти из других мест» [7, с. 150].

После выхода в свет знаменитых «Рассуждений о переворотах на поверхности земного шара» веяния взглядов Ж. Кювье глубоко проникли в науку. Теория катастрофизма была подкреплена как новыми палеонтологическими, так и геологическими данными и получила активное развитие. Это стало возможным, благодаря работам не только самого Ж. Кювье, но и его последователей: Александра и Адольфа Броньяров, Леонса Эли де Бомона и многих других учёных. Итогом использования катастрофистских идей Ж. Кювье явилось создание в первой половине XIX в. геохронологической (стратиграфической) шкалы, периодизация которой была произведена, по существу, на основе выделения биотических кризисов [13]. Следует отметить, что идея Ж. Кювье о катастрофах во многом положена в основу одного из современных методов стратиграфических исследований — событийной стратиграфии.

До работ Ж. Кювье учёные-систематики в принципе не использовали анатомические данные,

основывая классификацию исключительно на внешних, видимых признаках организмов [12]. С работами Ж. Кювье связывают главную реформу зоологической систематики в начале XIX в. На основе сравнительно-анатомического метода Ж. Кювье не только выделил важнейшие признаки внутреннего строения животных, но и положил их в основу принципиально новой оригинальной классификации. В короткой статье 1812 г. [18] он отказался от устаревшего и тормозившего дальнейший прогресс зоологии классического деления всех животных Аристотелем на позвоночных и беспозвоночных. Ж. Кювье впервые теоретически обосновал учение о четырёх основных формах организации животных, или планах строения животного царства, представляющих собой дискретные и самостоятельные ответвления (которым впоследствии было присвоено название тип), разделённые глубокими морфологическими различиями. Тем самым Ж. Кювье заложил основы учения о типах в зоологии. Главными критериями деления животных на четыре группы он считал особенности строения нервной системы, скелета и органов кровообращения. Метафизическое толкование, которое придавал Ж. Кювье теории типов, не помешало ей оказать огромное влияние на дальнейшее развитие систематики. Учение Ж. Кювье о четырёх планах строения нашло полное выражение в капитальной сводке «Царство животных, распределенное по своей организации», вышедшей в четырех томах в 1817 г. [19]. Ж. Кювье выделил «позвоночных», «моллюсков», «членистых», к которым отнёс членистоногих и высших червей, а также «лучистых», объединяющих инфузорий и примитивных червей. Все известные «классы» животных Ж. Кювье распределил в пределах упомянутых «типов».

Настоящую революцию произвёл Ж. Кювье в области изучения моллюсков, покончив с аристотелианской традицией деления их на мягкотелых и раковинных [2, 3]. Именно он впервые сформулировал близкое к современному понятие о моллюсках как особом типе организации животных и отказался от построения их системы на основе признаков раковины. Ж. Кювье окончательно объединил безраковинных головоногих, слизней и других мягкотелых, лишённых наружного скелета, с группой раковинных моллюсков, убедительно показав первостепенную важность макроанатомии моллюсков как основы для построения их системы. Изучение внешних особенностей впервые было заменено на исследование организма как целого, в единстве формы и её функции.

В 1814 г. Ж. Кювье был возведен в ранг комиссара короля. Короли Франции Людовик XVIII, Карл X и Луи Филипп ценили Ж. Кювье не меньше, чем Наполеон. В 1818 г. его избрали членом Французской академии, которая занималась проблемами словесности и языкознания. В 1819 г.

Ж. Кювье был удостоен титула барона и назначен председателем Комитета внутренних дел Государственного Совета. Когда в 1824 г. Людовика XVIII сменил Карл X, то присутствовавшему на коронации Ж. Кювье с почестями вручили орден старшего кавалера Почетного Легиона — знак высочайшего отличия, и в том же году наградили орденом Вюртембергской короны. В 1828 г. его избрали президентом Географического общества. Одновременно с выполнением организационных государственных дел Ж. Кювье продолжал заниматься научными исследованиями, активно общался с коллегами, в том числе с российскими.

В 1830 г. между Ж. Кювье и Жоффруа Сент-Илером возник диспут, история которого подробно описана в литературе [6, 11, 15]. Ж. Кювье настойчиво доказывал, что библейское учение о кратковременности истории Земли вполне сочетается с накопленными данными о смене геологических формаций и сменой ископаемых остатков, которые находили в пластах горных пород. Каждый период геологической истории Земли, как уже было отмечено, завершался мировой катастрофой. В результате таких переворотов гибли организмы, и в резко меняющихся условиях появлялись виды с новыми, более прогрессивными чертами строения. Жоффруа Сент-Илер, изучая анатомию и эмбриологию позвоночных, пришел к выводу о едином плане строения представителей животного мира. Кроме того, он распространил этот вывод на происхождение некоторых органов, которые утратили морфологическое сходство, например, крылья птиц и конечности млекопитающих. По существу, это было учение о гомологичных и аналогичных органах. Подробно излагая свою концепцию, Жоффруа Сент-Илер не мог избежать преувеличений и даже явных ошибок. В частности, он считал, что хитиновые покровы членистоногих по происхождению соответствовали скелету позвоночных. Такого рода неточности очень умело использовал Ж. Кювье, одержав в итоге публичную победу над своим оппонентом.

В 1831 г. Ж. Кювье был удостоен Луи Филиппом звания пэра Франции — почётного титула высшего дворянства, а в 1832 г. он был назначен на высокий пост президента Государственного Совета и оставался им до своей кончины 13 мая 1832 г. Похоронен Ж. Кювье в Париже на кладбище Пер-Лашез.

Ж. Кювье принадлежит к числу «крупнейших широко эрудированных естествоиспытателей» [8, с. 171] конца XVIII — первой половины XIX вв. Он опубликовал свыше 300 научных работ, в которых затронул самые различные проблемы — от создания сравнительно-анатомического фундамента для построения системы животных до вопросов исто-

рии естествознания. Множество сочинений Ж. Кювье стало классическими. Они неоднократно переиздавались и переведены на разные языки.

Ж. Кювье предложил собственное видение прогресса в органическом мире, которое дало в руки геологов научный метод относительной геохронологии, обеспечив несомненные успехи в стратиграфических исследованиях. Развитая им идея о катастрофах, которыми обуславливалась смена на Земле последовательных фаун и флор, благодаря эрудиции Ж. Кювье, а также блестящему стилю его аргументации, оказала огромное влияние на его современников и дальнейшее развитие науки. Рациональное зерно теоретических воззрений Ж. Кювье заключалось в том, что оно иллюстрировало прогрессивное усложнение строения живых организмов, а его предположение о резкой смене фауны давало возможность выделять руководящие ископаемые для каждого из периодов геологической истории Земли. Установив связь между слоями земной коры и заключёнными в них органическими остатками, Ж. Кювье своими палеонтологическими работами подготовил почву для создания основ исторической геологии. Следует отметить, что среди палеонтологов вплоть до 1860-х гг., благодаря практически непререкаемому научному авторитету Ж. Кювье господствовало представление о неизменяемости видов. Многие палеонтологические описания и виртуозно выполненные Ж. Кювье реконструкции вымерших животных до настоящего времени остаются непревзойдёнными.

Выдающееся значение работ Ж. Кювье нашло своё отражение и в характере экспозиций музеев естественной истории XIX в., которые формировались под воздействием его взглядов и обычно подразделялись на зоологический, палеонтологический и сравнительно-анатомический отделы. При этом доминирующим принципом, заложенным в экспозицию, был систематический. В зоологическом отделе животные экспонировались в соответствии с классификацией Ж. Кювье, иногда с небольшими дополнениями [9].

Памяти Ж. Кювье посвящена французская бронзовая медаль, выпущенная в 1834 г. [1]. На реверсе имеется надпись в десять строк, характеризующая сферу основных его интересов: теория катастроф, поиск ископаемых остатков, сравнительная анатомия, животный мир, естественная история и т. д. Все эти области в творчестве Ж. Кювье были внутренне связаны между собой и имели общую теоретическую основу. По краю медального поля, по кругу размещена надпись в две строки, перечисляющая главные регалии Ж. Кювье. Среди них, в том числе указано, что он является одним из 40 «бессмертных» членов Французской академии наук.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барштейн В.Ю. Систематика животных в первой половине XIX в. // Наука и современность. 2010. № 4. С. 26–32.
2. Винарский М.В. От конхиологии к малакологии: проблема перехода // Историко-биологическое исследование. 2014. Том 6. № 2. С. 7–20.
3. Винарский М.В. Вклад Ж. Кювье и Ж.-Б. Ламарка в разработку системы типа Mollusca // Бюллетень Дальневосточного малакологического общества. 2014. Вып. 18. С. 120–137.
4. Гремяцкий М.А. Кювье (1769–1832). Очерк жизни и научной деятельности. М.: Молодая гвардия, 1933. 128 с.
5. Гумирова А.А., Отыцкий Г.П. Эволюция места Бога в научных теориях эволюции (Ж.-Б. Ламарк, Ч. Дарвин, Ж. Кювье, Т. Гексли) // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2016. № 2. С. 33–38.
6. Канаев И.И. Жорж Кювье (1769–1832). Л.: Наука, 1976. 212 с.
7. Кювье Ж. Рассуждение о переворотах на поверхности земного шара. М.-Л.: Биомедгиз, 1937. 368 с.
8. Леонов Г.П. Основы стратиграфии. Том. 1. М.: Изд-во МГУ, 1973. 530 с.
9. Слепкова Н.В. Зоологический музей Императорской Академии наук в Санкт-Петербурге в XIX веке. Принципы экспонирования // Историко-биологические исследования. 2016. Том 8. № 1. С. 29–65.
10. Соловьев Ю.Я. 240 лет со дня рождения Жоржа Кювье (1769–1832) // Палеонтол. журн. 2010. № 6. С. 107–112.
11. Сухова Н.Г. Неожиданная дискуссия: Н.А. Северцев против зоологов Академии наук // Историко-биологические исследования. 2014. Том 6. № 2. С. 21–23.
12. Фукс М. Слова и вещи: Археология гуманитарных наук. СПб.: А-Cad, 1994. 408 с.
13. Цинкобурова М.Г. Из истории событийной стратиграфии (юбилею Ж. Кювье посвящается) // 200 лет отечественной палеонтологии. М.: ПИН РАН, 2009. С. 138.
14. Энгельгардт М.А. Ж. Кювье — его жизнь и научная деятельность. С.-Петербург: Типография товарищества «Общественная польза», 1893. 79 с.
15. Appell T.A. The Cuvier-Geoffrey Debate: French Biology in the Decades before Darwin. Baltimore: Oxford University Press, 1987. 306 p.
16. Bourdier F. Cuvier Georges // Dictionary of scientific biography. 1971. V. 3. P. 521–528.
17. Coleman W. Georges Cuvier, zoologist; a study in the history of evolution theory. Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Press, 1964. 212 p.
18. Cuvier G. Sur un nouveau rapprochement a etabli entre les classes qui composent le Regne animal // Annales du Museum d'Histoire Naturelle. 1812. Vol. 19. P. 73–84.
19. Cuvier G. Le Regne Animal distribue d'apres son organisation, pour servir de base a l'histoire naturelle des animaux et d'introduction a l'anatomie comparee. Paris: Deterville, 1817. Vol. 4.
20. Grene M. Darwin, Cuvier and Geoffroy: Comments and Questions // History and Philosophy of the Life Sciences. 2001. N 23. P. 187–211.
21. Johnston G. Introduction to Conchology, or, Elements of the Natural History of Molluscan Animals. London: John van Voorst, 1850. 616 p.
22. Winsor M.P. Starfish, Jellyfish and the Order of Life: Issues of Nineteenth-century Science. New Haven, London: Yale University Press, 1976. 228 p.

REFERENCES

1. Barstejn V.YU. Systematics of animals in the first half of the XIX century. *Nauka i sovremennost'* — [Science and modernity], 2010, no 4, pp. 26–32. (In Russian).
2. Vinarskij M.V. From conchology to malacology: the transition problem. *Istoriko-biologicheskie issledovanie* — [Historical and biological research], 2014, V. 6, no. 2, pp. 7–20. (In Russian).
3. Vinarskij M.V. The contribution of J. Cuvier and J.-B. Lamarck to the development of a system such as Mollusca. *Byulleten' Dal'nevostochnogo malakologicheskogo obshchestva* — [Bulletin of the Far Eastern Malacological Society], 2014, no. 18, pp. 120–137. (In Russian).
4. Gremyackij M.A. *Kyuv'e (1769–1832). Ocherk zhizni i nauchnoj deyatel'nosti*. [Cuvier (1769–1832). Essay on life and scientific activity]. Moscow, Molodaya gvardiya Publ., 1933, 128 p. (In Russian).
5. Gumirova A.A., Otyuckij G.P. Evolution of the place of God in scientific theories of evolution (J. B. Lamarck, C. Darwin, J. Cuvier, T. Huxley). *Prioritetnye nauchnye napravleniya: ot teorii k praktike* — [Priority research areas: from theory to practice], 2016, no 2, pp. 33–38. (In Russian).
6. Kanaev I.I. *Zhorzh Kyuv'e (1769–1832) [Georges Cuvier (1769–1832)]*. Leningrad, Nauka Publ., 1976, 212 p. (In Russian).
7. Kyuv'e Zh. *Rassuzhdenie o perevorotah na poverhnosti zemnogo shara* [Discourse on coups on the surface of the globe]. Moscow-Leningrad, Biomedgiz Publ., 1937, 368 p. (In Russian).
8. Leonov G.P. *Osnovy stratigrafii* [Fundamentals of stratigraphy]. Moscow, MGU Publ., 1973, v. 1, 530 p. (In Russian).
9. Slepikova N.V. Zoological Museum of the Imperial Academy of Sciences in St. Petersburg in the XIX century. Principles of exposure. *Istoriko-biologicheskie issledovaniya* — [Historical and biological research], 2016, v. 8, no 1, pp. 29–65. (In Russian).
10. Solov'ev Yu.Ya. 240th Anniversary of the Birth of Georges Cuvier (1769–1832). *Paleontologicheskij zhurnal* — [Paleontological journal], 2010, no 6, pp. 107–112. (In Russian).
11. Suhova N.G. Unexpected discussion: N.A. Severtsev vs. zoologists of the Academy of Sciences. *Istoriko-biologicheskie issledovanie* — [Historical and biological research], 2014, v. 6, no 2, pp. 21–23. (In Russian).
12. Fuko M. *Slova i veshchi: Arheologiya gumanitarnykh nauk* [Words and things: Archeology of the humanities], S.-Peterburg, A-Cad Publ., 1994, 408 p. (In Russian).
13. Cinkoburova M.G. From the history of event stratigraphy (Jubilee J. Cuvier is dedicated). *200 let otechestvennoj paleontologii*. [200 years of national paleontology], Moscow, PIN RAN Publ., 2009, 138 p. (In Russian).
14. Engel'gardt M.A. *Zh. Kyuv'e — ego zhizn' i nauchnaya deyatel'nost'* [J. Cuvier — his life and scientific activity], S.-Peterburg, Tipografiya tovarishchestva «Obshchestvennaya pol'za», 1893, 79 p. (In Russian).
15. Appel T.A. *The Cuvier-Geoffrey Debate: French Biology in the Decades before Darwin*. Baltimore, Oxford University Press, 1987, 306 p.
16. Bourdier F. Cuvier Georges. *Dictionary of scientific biography*, 1971, v. 3, pp. 521–528.
17. Coleman W. *Georges Cuvier, zoologist; a study in the history of evolution theory*. Cambridge, Mass., Harvard Univ. Press, 1964, 212 p.
18. Cuvier G. Sur un nouveau rapprochement a etabli entre les classes qui composent le Regne animal. *Annales du Museum d'Histoire Naturelle*, 1812, vol. 19, pp. 73–84.
19. Cuvier G. *Le Regne Animal distribue d'apres son organisation, pour servir de base a l'histoire naturelle des animaux et d'introduction a l'anatomie comparee*. Paris, Deterville, 1817, vol. 4.
20. Grene M. Darwin, Cuvier and Geoffroy: Comments and Questions. *History and Philosophy of the Life Sciences*, 2001, no 23, pp. 187–211.
21. Johnston G. *Introduction to Conchology, or, Elements of the Natural History of Molluscan Animals*. London, John van Voorst, 1850, 616 p.
22. Winsor M.P. *Starfish, Jellyfish and the Order of Life: Issues of Nineteenth-century Science*. New Haven, London, Yale University Press, 1976, 228 p.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 553.5 (470.42)

ГЕММОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕНГИЛИТА — НОВОГО ВИДА
ЮВЕЛИРНО-ПОДЕЛОЧНОГО СЫРЬЯ УЛЬЯНОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Д.А. ПЕТРОЧЕНКОВ

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени С. Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: p-d-a@mail.ru

Сенгилит — торговая марка флорогенного ювелирно-поделочного материала, добываемого у пос. Сенгилей Ульяновской области. Сенгилит представляет собой литифицированные морские растительные остатки, сцементированные в мергеле. Сенгилит преимущественно состоит из кальцита (от 86 до 94 мас. %). Установлены (мас. %): пирит 2,5—6, кварц 2, монтмориллонит 3, доломит 2, в незначительных количествах могут присутствовать иллит, каолинит, ярозит, гипс, халькопирит. Из элементов-примесей присутствуют Sr до 0,053 мас. % и Ba до 0,023 мас. %. Содержания радиоактивных и канцерогенных элементов находится на уровне фона. В сенгилите наследуется исходная структура растительных остатков. Различно окрашенные зоны сенгилита определяются размером и структурными особенностями кристаллов кальцита, количеством включений пирита, присутствием мергеля. В кальците из элементов-примесей отмечены (мас. %): Mg от 0,68 до 1,29, Fe от 0,14 до 0,52, незначительные количества Mn. По технологическим и декоративным характеристикам сенгилит является новым высококачественным ювелирно-поделочным материалом, позволяющим изготавливать широкий ассортимент ювелирных и сувенирных изделий. Сбор и обработка сенгилита в Ульяновской области попутно с аммонитами и другими видами ювелирно-поделочного сырья позволит увеличить рентабельность месторождения и ассортимент выпускаемой продукции.

Ключевые слова: ювелирно-поделочное сырьё; сенгилит; ювелирные изделия; кальцит; нижнемеловые отложения; Ульяновская область.

GEMMOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SENGILIT — A NEW KIND
OF JEWELRY-ORNAMENTAL RAW MATERIALS OF THE ULYANOVSK REGION

D.A. PETROCHENKOV

Russian State Geological Prospecting University
23, Miklukho-Maklay's street, Moscow 117997, Russia
e-mail: p-d-a@mail.ru

Sengilite is a trade mark of flороgenic jewelry and ornamental material being mined around the village Sengilei of the Ulyanovsk region. The sangilite is a lithofected marine plant remains cemented in marl. The sangilite mainly consists of calcite (from 86 to 94 wt. %). The following minerals have been established (wt. %): pyrite 2,5—6, quartz 2, montmorillonite 3, dolomite 2, in minor quantities illite, kaolinite, jarosite, gypsum, chalcopryrite can be presented. Among the elements-admixture, Sr is presented up to 0,053 wt. % and Ba up to 0,023 wt. %. The content of radioactive and carcinogenic elements is at the background level. The original structure of plant remains is inherited in sengilite. The differently colored zones of sengilite are determined by the size and structural features of the calcite crystals, as well as the amount of pyrite inclusions, and the presence of marl. In the calcite, the following elements-admixture, (wt. %) are noted: Mg from 0,68 to 1,29, Fe from 0,14 to 0,52, insignificant amounts of Mn. According to its technological and decorative characteristics, sengilite is a new high-quality jewelry and ornamental material that allows to produce a wide range of jewelry and souvenirs. Collection and processing of sengilite in the Ulyanovsk region along with ammonites and other types of jewelry and ornamental raw materials will increase the profitability of the deposit and the range of products.

Keywords: jewelry and ornamental raw materials; sengilite; jewelry; calcite; lower Cretaceous deposits; Ulyanovsk region.

В Ульяновской области добываются различные виды ювелирно-поделочного сырья: аммониты, септарии, конкреции с фоссилиями, спектропит, сенгилит, окаменелое дерево, окаменелости морских рептилий [2, 4–6]. Ряд из них остаются геммологически не изучены. К ним относится и сенгилит. Сенгилит — торговая марка флорогенного ювелирно-поделочного материала, добываемого у пос. Сенгилей [6]. Сенгилит представляет собой литофицированные морские растительные остатки, сцементированные в мергеле (рис. 1, а). В настоящее время из сенгилита изготавливают декоративно-интерьерные спилы — панно, шары, яйца, шкатулки, кабошоны для ювелирных изделий (рис. 1, б). Изделия из сенгилита в последнее время пользуются спросом и на мировом рынке. Тем не менее сенгилит не рассматривается в РФ в качестве ювелирно-поделочного сырья [7], что существенно сдерживает его добычу.

Сенгилит добывается преимущественно из отложений нижнего апта, представленными серо-коричневыми рыхлыми песчаниками, тёмно-серыми глинистыми алевролитами и чёрными глинами. Породы биотурбированы. В разрезе находятся также слои чёрных горючих сланцев и слой крупных плотно расположенных карбонатных конкреций — «аптская плита». В отложениях присутствует большое количество пиритовых и карбонатных конкреций, встречаются крупные фрагменты древесины, раковинный детрит и мелкие фосфатные конкреции. Общая мощность отложений нижнего апта около 50–55 м [1, 3].

Сбор сенгилита осуществляется в весенне-летний период из склоновых отложений и в зоне пляжа р. Волга без сооружения горных выработок, и нарушения экологии. Отдельные куски сенгилита имеют массу несколько килограмм, что позволяет изготавливать и крупные сувенирные изделия. В статье приведены результаты детальных геммологических исследований сенгилита — нового вида ювелирно-поделочного сырья.

Методы исследований

Комплекс исследований сенгилита проведён на кафедре минералогии и геммологии МГРИ-РГГРУ, в ФГБУ

«ВИМС», ИГЕМ РАН. Он включал определение микротвёрдости, плотности, люминесценции, описание прозрачных шлифов, установление химического состава, электронно-зондовые исследования.

Химический состав сенгилита изучен методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (РФА) на вакуумном спектрометре последовательного действия Axios MAX Advanced. Оптико-петрографический и минералогический анализ выполнен с использованием микроскопа «Полам Р-112». Микротвёрдость измерена на микротвердомере «ПМТ-3» с нагрузкой 50 г, выдержкой 15 с. Плотность образцов определялась гидростатическим методом на электронных весах «Sartorius Gem G 150D». Люминесценция изучена под ультрафиолетовой лампой «Multispec System Eickhorst» с $\lambda = 254$ и 365 нм. Минеральный состав установлен рентгенографическим количественным фазовым анализом (РКФА) на установке «X'Pert PRO MPD». Электронно-зондовые исследования выполнены на микроанализаторе «Jeol JXA-8100», позволяющем получить химический состав по данным локального рентгеноспектрального анализа (ЛРСА), провести анализ образцов в обратнорассеянных электронах (ОРЭ). Содержание кислорода рассчитывалось по стехиометрии.

Результаты исследований

По данным РКФА сенгилит преимущественно состоит из кальцита (от 86 до 94 мас. %), пирита 2,5–6, кварца 2, монтмориллонита 3, доломита 2 и в незначительных количествах могут присутствовать иллит, каолинит, ярозит, гипс и халькопирит. По данным измерения параметров элементарной ячейки содержание Mg в кальците составляет 4 мас. %.

Химический состав сенгилита подтверждает его минеральный состав (табл. 1). Отметим содержания P_2O_5 от 0,47 до 0,53 мас. %, указывающие на возможное присутствие апатита. Из элементов-примесей с содержанием выше 0,01 мас. %, установлены Sr (от 0,0490 до 0,0529) и Ba (от 0,0209 до 0,0227). Содержания радиоактивных U, Th и канцерогенных Pb, As элементов близки к фоновым (табл. 2).

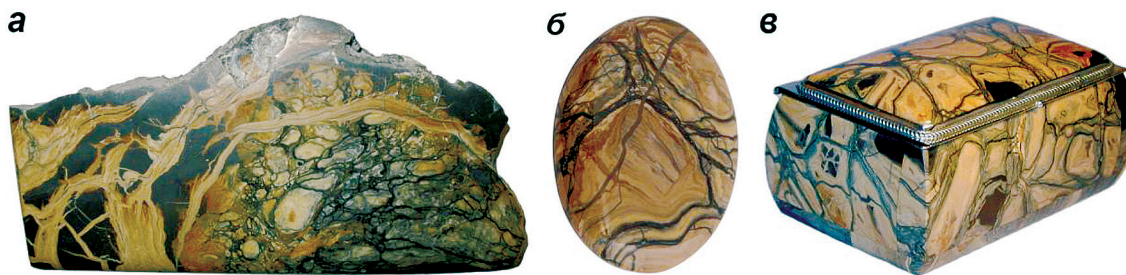


Рис. 1. Полированная пластина 4,5х9 см (а), кабошон 38х50 мм (б) и шкатулка 7х10 см (в) из сенгилита

Таблица 1

Химический состав сенгилита по данным РФА

Номер образца	Содержание компонента, мас. %											
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	ППП*
Сен-5	0,15	1,34	1,30	3,30	0,18	49,45	0,09	0,05	1,66	0,47	2,09	39,83
У-С	0,15	1,36	1,02	2,96	0,15	46,48	0,08	0,06	4,01	0,53	5,45	37,50

Примечание. ППП* — потери при прокаливании.

Таблица 2

Содержание элементов-примесей в сенгилите по данным РФА

Номер образца	Содержание элемента, мг/кг ($\times 10^{-4}$ мас. %)															
	Cr	V	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	U	Th	Y	Nb	Pb	As
Сен-5	<10	<10	<10	10	12	11	15	490	<10	209	<5	<5	11	7	<10	<10
У-С	<10	<10	<10	13	11	10	14	529	<10	227	<10	<10	<10	<10	<10	<10

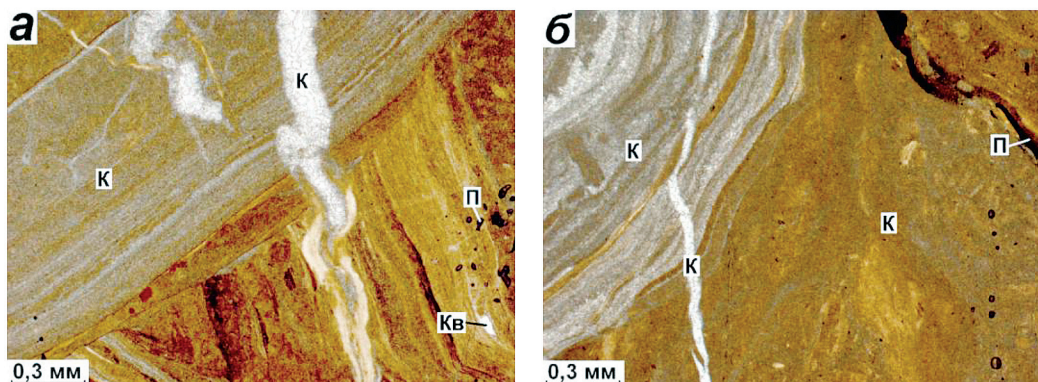


Рис. 2. Структура сенгилита в прозрачных шлифах (а, б), с анализатором, К — кальцит, Кв — Кварц, П — пирит

Цвет сенгилита от чёрного до светло-серого, присутствуют зоны коричневого оттенка. Распределение окраски зональное. На чёрном основном фоне характерны светло-серые, различных оттенков разноориентированные полосы различной ширины (рис. 1). Текстура полосчатая, плитчатая.

Сенгилит плотный, непрозрачный, раскалывается с раковистым, неровным изломом. Микротвёрдость участков, образованных мергелем, 149 кг/мм², участков, образованных кальцитом, 256 кг/мм², а участков, сложенных кальцитом с включениями пирита, возрастает до 699 кг/мм². Плотность сенгилита изменяется от 2,8 до 2,9 г/см³ и определяется преимущественно содержанием пирита и кальцита. При λ 254 нм светло-жёлтые зоны сенгилита люминесцируют зелёным цветом, при λ 366 нм свечение усиливается. Тёмноокрашенные зоны сенгилита не люминесцируют. Сенгилит хорошо полируется до стеклянного блеска, поверхность ровная.

В прозрачных шлифах хорошо проявлена структура сенгилита, характеризующаяся чередованием разноокрашенных слоёв, различной ориентировки и ширины (рис. 2). Широкие слои обычно разделяются по цветовым оттенкам на более узкие. Характерна волнистая линия контактов слоёв и чёткий цветовой переход. На отдельных участках наблюдается брекчиевая структура. Слои пересекаются тонкими — 0,03—0,15 мм зигзагообразными, невыдержанными по длине кальцитовыми прожилками белого цвета. Характерны прожилки, зоны, мелкие линзы чёрного цвета, выполненные мергелем.

В сенгилите наследуется исходная структура растительных остатков. Светло-коричневые слои сенгилита образованы тонкоигльчатыми кристалликами кальцита, ориентированными вдоль слоя, с близкими углами угасания. В этих слоях наблюдается отчётливый плеохроизм. Серые, тёмно-коричневые слои образованы мелкими изометричными, разноориентированными кристалликами кальцита. Однородные участки серого цвета с

невывраженной слоистостью образованы изометричными мелкими (0,001 мм) кристалликами кальцита с равномерной вкрапленностью тонкозернистого пирита.

Кристаллы кальцита в прожилках имеют размер до 0,05 мм и изометричную форму. Пирит наблюдается в виде равномерной вкрапленности, часто образует вдоль слоёв цепочки и линейные зоны. Максимальный размер пирита достигает 0,08 мм. Кварц присутствует в виде редких угловатых зёрен размером до 0,03 мм (рис. 2).

Электронно-зондовым методом изучен участок сенгилита, включающий непрозрачный кальцит коричневой, серой, тёмно-серой окраски, мергель чёрного цвета и пиритизированные фрагменты светло-серого цвета (рис. 3, а). В обратнорассеянных электронах мергель и кальцит однородного серого цвета, пирит отчётливо выявляется по белой окраске на сером фоне (рис. 3, б—г). Характерно присутствие в сенгилите большого числа разноразмерных пор (от 1 до 10 мкм), их форма от изометричной до сильно вытянутой. Типичны цепочки пор вокруг включений. Число пор резко преобладает в зонах, выполненных мергелем.

Структура кальцита в обратнорассеянных электронах не проявлена. По данным локального рентгеноспектрального анализа в кальците фиксируются повышенные содержания, мас. %: Mg 0,93, Fe 0,31 и практически отсутствует Mn (табл. 3). Кальцит в различных зонах имеет близкий химический состав.

Мергель состоит из включений алюмосиликатов, пирита, сцементированных дисперсным кальцитом, с большим числом пор (рис. 3, б). Включения алюмосиликатов (5—25 мкм) овальной изометричной формы. По данным локального рентгеноспектрального анализа в алюмосиликатах фиксируются высокие (более 10 мас. %) содержания Al, Si и O, повышенные Na, Mg, K, Ca, и Fe. Концентрация элементов в различных включениях существенно отличаются, что указывает на различный минеральный состав (табл. 4).

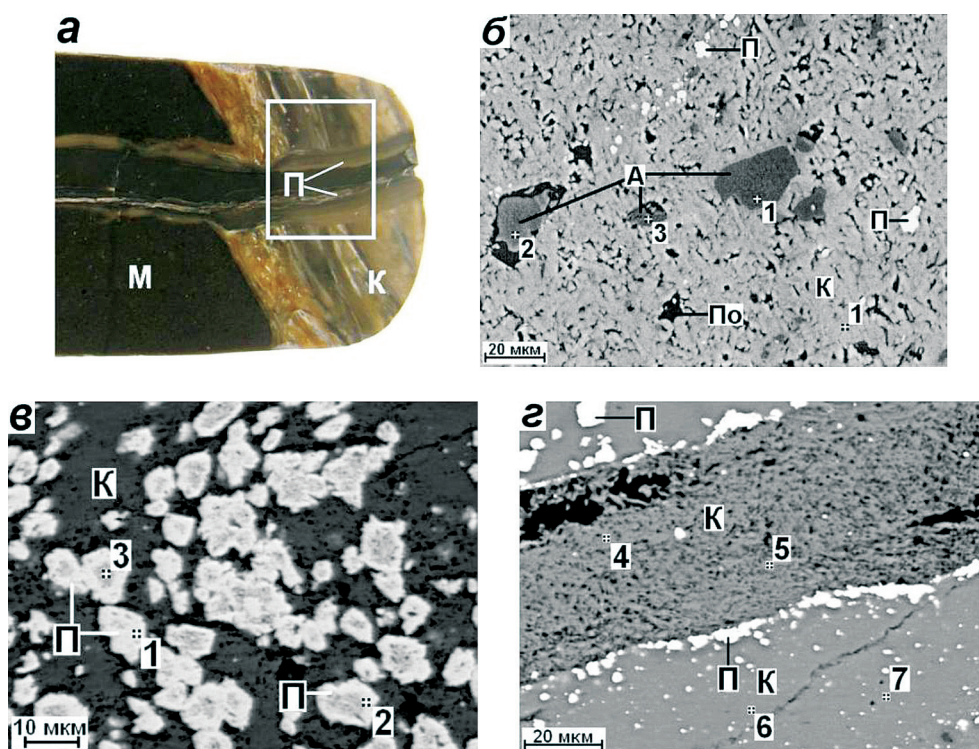


Рис. 3. Аншлиф сенгилита (а) и его фрагменты в ОРЭ (б–г), б — мергель с включениями алюмосиликатов и пирита; в — включения неоднородных кристаллов пирита в кальците; г — линейная зона пористого кальцита с цепочками кристаллов пирита, К — кальцит, П — пирит, А — алюмосиликаты, По — поры, 1–7 — номера спектров, прямоугольник — фрагмент детального изучения

Таблица 3

Химический состав кальцита в сенгилите по данным ЛРСА				
Содержание элемента, мас. %				
Mg	Mn	Fe	Ca	O
0,68–1,29*	0,00–0,12	0,14–0,52	34,54–37,58	16,10–16,90
0,93	0,05	0,31	36,32	16,43

Примечание. Над чертой — максимальное и минимальное содержания, под чертой — среднее по 14 спектрам.

Таблица 4

Химический состав включений алюмосиликатов в сенгилите по данным ЛРСА								
Номер спектра	Содержание элемента, мас. %							
	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	O
1	8,50	0,1	10,49	31,40	0,12	0,98	0,0	48,54
2	5,85	– –	13,51	27,64	0,0	5,86	– –	47,95
3	0,32	0,8	13,63	18,02	2,39	7,0	2,86	37,82

Включения пирита размером 1–5 мкм, при их срастании образуются более крупные (до 10 мкм) выделения. Пирит выполняет разноориентированные линейные зоны. Ширина зон колеблется от 5 до 120 мкм. Насыщенность их пиритом различна. Пирит присутствует в сенгилите также в виде цепочек и отдельных включений (рис. 3, б–г). К выделениям пирита приурочены цепочки мелких пор той же ориентировки. При больших увеличениях видно, что выделения пирита изометричной, угловатой формы с неровным контуром, содержат микрозоны

серого цвета (рис. 3, в). В пирите фиксируются повышенные содержания О до 5,23 мас. %, указывающие на его окисление и образование ярозита.

Выводы

Сенгилит представляет литофицированные морские растительные остатки сцементированные в мергеле. Сенгилит преимущественно состоит из кальцита до 94 мас. % с включениями пирита до 6 мас. % и доломита до 2 мас. %. Фрагменты мергеля состоят из включений кварца, алю-

мосиликатов, сцементированных дисперсным кальцитом. В сенгилите наследуется исходная структура растительных остатков. Различно окрашенные зоны сенгилита обусловлены размером и структурными особенностями кристаллов кальцита, количеством включений пирита,

присутствием мергеля. По технологическим и декоративным характеристикам сенгилит является высококачественным ювелирно-поделочным материалом флорогенной группы, позволяющим изготавливать широкий ассортимент ювелирных и сувенирных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барабошкин Е.Ю. Палеогеография Восточно-Европейской платформы и ее южного обрамления в раннем мелу // Серия аналитических обзоров «Очерки по региональной геологии России». Вып. 1. М.: Геокарт. ГЕОС. 2005. С. 201–232.
2. Буканов В.В. Цветные камни. Энциклопедия. СПб., 2008. 416 с.
3. Геология СССР. Поволжье и Прикамье. Т. XI. Ч. 1. Геологическое описание / Под ред. А.В. Сидоренко М.: Недра. 1967. 872 с.
4. Петроченков Д.А. Камнесамоцветное сырьё Ульяновской области // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 5. С. 319–323.
5. Петроченков Д.А. Структурные особенности и минеральный состав раковин готеривских аммонитов Ульяновской области // Известия вузов. Геология и разведка. 2006. № 5. С. 26–30.
6. Петроченков Д.А. Ружицкий В.В. Минералогические особенности ювелирного пирита из меловых отложений Ульяновской области // Разведка и охрана недр. 2018. № 4. С. 7–12.
7. Полянин В.С., Полянина Т.А., Дусманов Е.Н., Яковлева Е.И. Минерально-сырьевая база цветных камней России: перспективы её освоения и развития // Разведка и охрана недр. 2015. № 9. С. 66–76.

REFERENCES

1. Baraboshkin E.Yu. Paleogeography of the East European Platform and its southern framework in the Early Cretaceous. *A series of analytical reviews «Essays on regional geology of Russia»*, 2005, vol. 1, M, Geokart. GEOS Publ., pp. 201–232. (In Russian).
2. Bukanov V.V. *Colored stones. Encyclopedia*. Saint Petersburg, 2001, 416 p. (In Russian).
3. Geology of the USSR. *The Volga region and the Kama region. Geological Description*. vol. XI, no. 1. 1967, Edited by A.V. Sidorenko M., Nedra Publ., 872 p. (In Russian).
4. Petrochenkov D.A. Colored-stone raw materials from Ulyanovsk region. *Mining informational and analytical bulletin (Scientific and technical journal)*, 2006, vol. 5, M., MSMU Publ., pp. 319–323. (In Russian).
5. Petrochenkov D.A. Structural features and mineral composition of hauterivian ammonites from Ulyanovskaya area. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and exploration]* 2006, vol. 5, pp. 26–30. (In Russian).
6. Petrochenkov D.A., Ruzhitsky V. V. Mineralogical peculiarities of jewelry pyrite from the Cretaceous deposits of the Ulyanovsk region. *Prospect and protection of mineral resources*, 2018, vol. 4, pp. 7–12. (In Russian).
7. Polyaniin V.S., Polyaniina T.A., Dusmanov E.N. and etc. Mineral and raw materials base of colored stones of Russia: prospects for its development and extension. *Prospect and protection of mineral resources*, 2015, vol. 9, pp. 66–76. (In Russian).

УДК 556.388

ОБ ИЗМЕНЕНИИ РОЛИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРИРОДНО-АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

О.Е. ВЯЗКОВА, М.М. ЧЕРЕПАНСКИЙ, К.В. БЕЛОВ

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: wjazkova@yandex.ru, vodamch@mail.ru, kostik-belowne@rambler.ru

Проанализированы изменяющиеся во времени возможности водоснабжения исторических населённых пунктов, городищ и крепостей в период их создания и эксплуатации. Для исследования причин сохранения и разрушения памятников археологии в наши дни необходимо оценивать роль гидрогеологических условий как компонента инженерно-геологических условий. Рассмотрен вклад подземных вод в сохранение (консервацию) артефактов органического происхождения. При музеефикации археологических памятников необходимо обеспечивать безопасный уровень подземных вод во избежание процессов подтопления и химического выветривания.

Ключевые слова: гидрогеологические условия; природно-археологическая система; поселения; водоснабжение; качество подземных вод; музеефикация археологических памятников.

THE CHANGE OF ROLE OF THE HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS AT THE DIFFERENT STAGES OF THE FUNCTIONING OF NATURAL-ARCHEOLOGICAL SYSTEMS

O.E. VYAZKOVA, M.M. CHEREPANSKY, K.V. BELOV

*Russian State Geological Prospecting University
23, Miklouho-Maklay's street, Moscow 117997, Russia
e-mail: wjazkova@yandex.ru, vodamch@mail.ru, kostik-belowne@rambler.ru*

The time-varying resources for water supplies of historical settlements, fortifications and fortresses in periods of their creation and usage have been analyzed. Nowadays it is necessary to assess the role of hydrogeological conditions as an important component of engineering-geological conditions in order to study the reasons of conservation and destruction of archaeological sites. The contribution of groundwater in protection (conservation) of organic origin artifacts has been considered. It is necessary to ensure a safe groundwater level to avoid flooding and chemical weathering during the process of the museumification of the archaeological sites.

Keywords: hydrogeological conditions; natural-archeological system; settlements; water supply; groundwater quality; museumification of archaeological sites.

В ходе многолетних инженерно-геологических исследований археологических памятников авторы постоянно анализировали влияние на них гидрогеологических условий. Особенно это актуально для памятников, связанных в прошлом с длительным проживанием людей: поселения, селища, городища, крепости. Вопрос водоснабжения во многих случаях в историческом прошлом остаётся неясным, несмотря на очевидную невозможность жизни гражданского населения и воинского контингента в условиях дефицита воды.

Роль гидрогеологических условий (ГГУ) в истории формирования и функционирования природно-археологических систем (ПАС) [2] сложна, важна и многогранна. Можно выделить пять направлений анализа влияния ГГУ на ПАС, соответствующих этапам её развития: создание, эксплуатация, постэксплуатация, научное исследование (археологическое, инженерно-геологическое, гидрогеологическое) и музеефикация. На каждом этапе значение гидрогеологических условий довольно существенно менялось и соответственно должно рассматриваться по-разному.

Кроме исторического аспекта влияния гидрогеологических условий на ПАС, можно выделить ещё несколько вопросов, связанных с изучением гидрогеологических условий, которые рассматриваются при исследовании археологических памятников как компонента инженерно-геологических условий.

Во-первых, в период *создания и эксплуатации* поселения наиболее важен аспект возможности водоснабжения. В ходе исследований должны выявляться и анализироваться:

- 1) возможные источники водоснабжения (поверхностные воды или подземные);
- 2) количество воды, которое могли получать жители при климатических условиях изучаемого исторического периода;
- 3) качество воды, обусловленное историческими (древними, синхронными периоду освоения территории) природными и техногенными факторами;
- 4) способы обеспечения населения водой (колодцы, тоннели, каналы, акведуки, трубопроводы, доставка на транспорте и пр.).

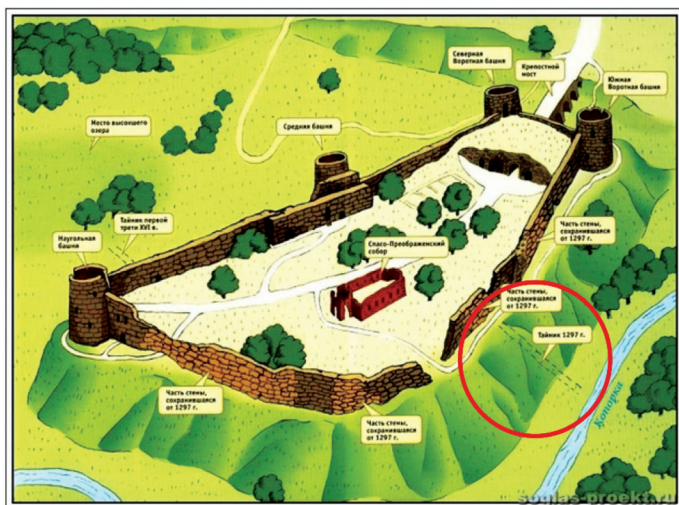
Благоприятные гидрогеологические условия (наличие родников или неглубокое залегание качественных грунтовых вод, защищённость водоносного горизонта) обеспечивали в историческом прошлом возможность устойчивого водоснабжения поселений, в том числе укрепленных. Особенно это важно для фортификационных сооружений, предназначенных для длительной обороны в условиях осады (Изборская, Копорская, Судакская и другие крепости).

Примерами заложения тоннелей, построенных в склоновых отложениях и ведущих к постоянным источникам подземных вод (аллювиальный водоносный горизонт рек и ручьёв), в оборонительных сооружениях, построенных на известняках, служат средневековые крепости Копорье и Изборск (рис. 1). В настоящее время восстановлен в ходе реставрации только тоннель Изборской крепости (рис. 2).

В Московском (Водовзводная) и Псковском (Плоская) кремлях, в Ивангородской (Колодезная), Староладжской (Тайницкая) и Изборской (Плоская) крепостях были башни, специально построенные в нижних частях склона у уреза воды для защиты источника водоснабжения и возможности пользоваться им тайно. Этими функциями и предопределены названия башен.

Однако следует отметить, что большинство древних поселений тяготело к поверхностным источникам водоснабжения (ручьи, реки, озёра). К такому типу памятников относятся средневековые поселения Центральной России, изученные одним из авторов в 1998—2003 гг. (более 170 памятников) вдоль трасс газопроводов Ямал—Европа-1, СРТО—Торжок и других в Московской, Смоленской, Тверской, Ярославской и Калужской областях. Связано это было долгое время с достаточно хорошим качеством поверхностных вод и лёгкостью их добычи в мирное время. Даже в Москве в середине XIX в. возили воду в бочках от р. Неглинной, что запечатлено на картине В.Г. Перова «Тройка». Кроме того, было сделано наблюдение такого факта: более поздние поселения располагаются на совсем мелких в настоящее время водотоках. Объясняется это может более влажным климатом, характерным для Малого ледникового перио-

a



б

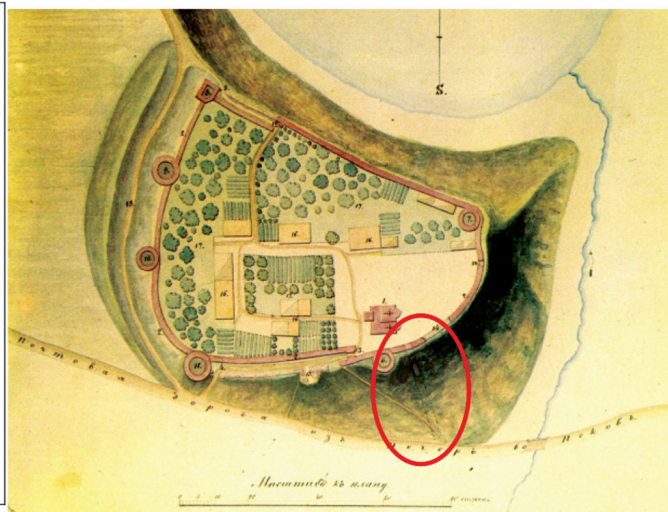


Рис. 1. Схемы расположения тоннелей для водоснабжения в период осады, входивших в систему обороны Копорской [6] и Изборской [4] крепостей на Русском Севере



Рис. 2. Наклонный тоннель для водоснабжения, построенный под юго-восточной стеной Изборской крепости

да (1350—1850 гг.), и соответственно большей водностью даже небольших водотоков.

В настоящее время (с современной техногенной нагрузкой, сведением лесов, откачками подземных вод из различных горизонтов, изменением положения уровней грунтовых и подземных вод) на равнинных территориях родники стали относительно редким явлением, а качество воды сильно ухудшилось. В историческом прошлом в других климатических условиях, при более широком распространении лесов их было больше. При хорошем качестве подземных вод на прилегающей к ним территории формировались поселения. В некоторых случаях родники в силу богатства микроэлементами были целебными и привлекали к себе диких животных. Древний человек охотился в этих местах и основывал поселения, начиная с бронзового века [5].

Интересен факт отсутствия колодцев на территории множества исследованных нами городищ. В горных районах защищенные поселения (городища) часто располагались на мысах, имевших значительное превышение над уровнем воды в реке (150—200 м). В Кисловодской котловине ранними аланами при этом использовались

родники, находившиеся выше по склону, чем сами поселения, а кобанские поселения имели вблизи себя родники, бьющие чуть ниже по склону [3].

Из пяти исследованных городищ Восточного Боспора два имели колодцы за пределами стен (Раевское и Красная Батарея), но синхронность строительства колодцев и укреплений не доказана.

Отсутствие колодцев в укреплениях ранних исторических эпох может объясняться: доступностью качественных естественных поверхностных источников водоснабжения (реки, ручьи, родники); трудоёмкостью создания колодцев; в целом благоприятной военно-политической обстановкой в период функционирования укреплений. Требования фортификационных сооружений к участку расположения (высокий мыс, огражденный реками или оврагами) входят в противоречие с формированием благоприятных условий водоснабжения, так как в пределах таких мысов подземные воды, как правило, значительно сдренированы. Недостаточная археологическая изученность объектов исследования также может объяснять отсутствие колодцев в укрепленных поселениях.

Во-вторых, при исследованиях необходимо оценивать влияние гидрогеологических условий на инженерно-геологические условия освоения территории, на которой планировалось (создание ПАС) и осуществлялось (эксплуатация ПАС) создание населенного пункта в прошлом. Так, близкое залегание УГВ вызывало подтопление территорий, усложняя их хозяйственное использование, обеспечивая условия для быстрого разрушения как деревянных построек вследствие гниения, так и каменных сооружений в ходе выветривания и деформаций грунтов основания.

В-третьих, должно анализироваться изменение качества подземных вод, использовавшихся древним населением, на протяжении функционирования поселения (эксплуатация ПАС). В историческом прошлом оно формировалось преимущественно под влиянием природных факторов (состав пород, режим атмосферных осадков). Последовательное негативное изменение состава подземных вод в ходе техногенеза (выпас скота, распашка с

внесением удобрений, захоронение умерших людей и скота и др.) могло происходить при слабой защищённости горизонта, когда область его питания совпадала с областью распространения, а также территорией поселения и его хозяйственной округи.

К сожалению, в некоторых случаях и в наше время не всегда учитываются все обстоятельства формирования состава подземных вод. Например, в Псковской области в п. Камно есть церковь Георгия Победоносца, к северу от которой расположено современное кладбище (захоронение производится в моренные песчаные грунты, подстилаемые трещиноватыми девонскими известняками). В 40 м к северо-востоку от кладбища в нижней части склона из известняков вытекает обильный родник, на котором устроена купальня... Аналогичная ситуация в Изборске, где Словенские родники считаются чуть ли не целебными, хотя над ними на водоразделе также расположено современное кладбище. Зона аэрации в этом случае также сложена моренными песками, подстилаемыми трещиноватыми известняками девона.

В-четвёртых, чрезвычайно важно проводить оценку роли подземных вод в сохранении предметов материальной культуры органического происхождения (древесина, кожа, ткани, береста и др.). Подъём уровня грунтовых вод в *постэксплуатационный* период при определённых условиях создаёт возможность длительного сохранения органических остатков в культурном слое, в том числе и строительных конструкций.

Так, при первоначальных раскопках в Историческом проезде (г. Москва) в 1988 г. в мелких зеленоватых песках, имевших болотный запах (наблюдения О.Е. Вязковой) археологами было обнаружено очень большое число сохранных вещей из органических материалов (лапти, кошельки, три слоя мостовых разных веков). Экстренная рекультивация раскопа осенью 1988 г. чистым речным

песком привела к быстрому (до 1993 г.) гниению большинства не извлечённых артефактов.

Как сообщает Е.В. Салмина, в Пскове «при раскопках 2010 г. в раскопе Петровский XI были обнаружены деревянные сани. Принципиально важным является факт обнаружения саней не «в развале», а в виде конструкции, сохранившей «в сборке» большую часть деталей» [8, с. 17]. Возраст находки — XVII в. Раскопки проводились перед строительством жилого дома. Культурный слой был насыщен грунтовыми водами, которые для продолжения раскопок откачивали помпой. Высокое залегание УГВ позволило сохраниться материалам старинного изделия (древесина, кожаные ремни).

Аналогичная ситуация сложилась при раскопках на участке строительства мастерских для драматического театра в Пскове. В раскопе обнаружены мостовые и остатки срубов Нового торгового XVI—XVII вв. очень хорошей сохранности (рис. 3). «возможно, уже при установке первых клетей на новом месте происходит сооружение дренажного канала, устройство которого предшествует мощению и возведению сооружений Торга, что было необходимо в условиях активного поступления подземных вод» [7, с. 33]. Раскопки также велись с откачкой грунтовых вод.

В-пятых, при *музеефикации* археологических памятников важно оценивать влияние подземных вод на их дальнейшее сохранение, иначе может сложиться такая ситуация, как в музее-заповеднике «Горгиппия» (г. Анапа): подъём УГВ привёл к химическому выветриванию исторических каменных фундаментов, с чем и пришлось бороться.

Музей под открытым небом «Горгиппия» создан в прибрежной зоне г. Анапа (краснодарский край) на месте крупных площадных раскопок (≈100×200 м). Историческая Горгиппия была крупным городом-колонией



Рис. 3. Сохранность деревянных конструкций Нового Торга XVI—XVII вв. в Пскове. Раскопки перед строительством подсобных помещений Драматического театра (2011 г.)



Рис. 4. Улицы древней Горгииппии (г. Анапа), ооконтуренные сохранившимися подвальнойми помещениями

Азиатского Боспора на протяжении тысячи лет (VI в. до н. э. — IV в. н. э.) [1]. Музеефицировано несколько кварталов античного города (рис. 4).

Массив пород, на котором основан город, сложен палеоценовым флишем (свита Горячего Ключа) [9], представленным песчаниками (мощность прослоев от 2—5 до 30—50 см), аргиллитами и алевролитами (мощностью от 5 см до 1,5 м). Породы падают в север—северо-западном направлении под углом 40—45°. Флиш перекрыт четвертичными элювиально-делювиальными преимущественно глинистыми образованиями мощностью до 1,7 м. Фундаменты античных зданий прорезали четвертичные отложения и опирались на более прочные палеоценовые грунты.

С начала 1990-х гг. территория музея стала подтапливаться, что вызывало заболачивание древних подвальных помещений и разрушение каменной кладки античных фундаментов в результате химического выветривания. Изучением инженерно-геологических проблем, возникающих при музеефикации древних каменных конструкций в черте Анапы, современного бурно развивающегося города-курорта, занимались Л.А. Ярг и О.Е. Вязкова.

Для исследования механизма процесса выветривания пород, использованных при реставрации каменной кладки фундаментов памятника, было выполнено лабораторное физическое моделирование. Образцы подвергались попеременному водонасыщению в растворах разного pH

и состава (нейтрального, кислого и щелочного) и высушивания в воздушно сухом режиме. Длительность экспериментов составила 90—150 дней. Уже через 15 дней образцы пород покрылись соляной «щёткой» (в модели со щелочной средой).

Химические процессы гидратации — гидролиза — выщелачивания сопровождались физическими процессами: изменением геометрии порового пространства, появлением микротрещин, увеличением пористости, снижением прочности пород. Результаты моделирования однозначно подтвердили предположение о негативном влиянии подтопления на состояние каменной кладки археологического памятника.

Реализация в 2000 г. разработанного проекта системы самотечного лучевого слабонаклонного дренажа, расположенного ниже конструкций памятника в коренных породах, привела к полному осушению не только античных помещений, но и подвалов в прилегающих гостиничных комплексах.

При гидрогеологических исследованиях археологических памятников, имеющих различные перспективы сохранения (разрушение раскопками или геологическими процессами, сохранение в условиях естественного ландшафта или музеефикация), должны учитываться различные аспекты влияния подземных вод на процессы, происходящие в природно-археологической системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева Е.М. Античный город Горгииппия. М.: Эдиториал УРСС, 1997. 560 с.
2. Вязкова О.Е. Природно-археологические системы: понятие, структура, этапы формирования и функционирования // Изв. вузов. Геология и разведка. 2015. № 6. С. 57—59.
3. Вязкова О.Е., Курдыш Е.С. Влияние инженерно-геологических условий на закономерности освоения территории Кисловодской котловины // Инженерные изыскания. 2016. № 2. С. 24—29.

4. Голубева И. Судьба флигеля // Интернет-газета Губерния. Псковская область. № 33 (605) от 29 августа 2012 г. (http://gubernia.pskovregion.org/number_605/09.php?export. Дата обращения 11.05.2018.)
5. Игнатов П.А., Бушков К.Ю., Калмыков Б.А., Вязкова О.Е. О связи ландшафтно-радиогеохимических условий с археологическими находками в долине р. Сосна на юго-востоке Орловской области // Мат. Международной научной конференции «Великие реки — аттракторы локальных цивилизаций». Дубна, 2002. С. 43–45.
6. Крепости северо-запада России. От крепости к крепости / Коллектив авторов. Под ред. Ю.Б. Демиденко. СПб, 2012. 108 с.
7. Подгорная Р.Г., Салмина Е.В. Исследования Нового Торга в Пскове в 2011 г. (предварительный обзор) // Археология и история Пскова и Псковской земли. Семинар имени академика В.В. Седова: Мат. 58-го заседания. М.—Псков, 2013. С. 23–38.
8. Салмина Е.В., Салмин С.А. Сани XVII в. из XI Петровского раскопа (предварительная публикация) // Археология и история Пскова и Псковской земли. Семинар имени академика В.В. Седова: Мат. 57-го заседания. М.—Псков, 2011. С. 17–25.
9. Сerezhenko В.А., Кузубов П.П. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Кавказская Лист L-37-XXVI/XXXII. М.: Недра, 1971.

REFERENCES

1. Alekseeva E.M. *Antichnyy gorod Gorgippiya* [Ancient city of Gorgippia]. Moscow, EHDitorial URSS Publ, 1997, 560 p. (In Russian).
2. Vyazkova O.E. Prirodno-arheologicheskie sistemy: ponyatie, struktura, ehtapy formirovaniya i funkcionirovaniya [Natural- archaeological systems: conception, structure, stages of the formation and functioning]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy Geologiya i razvedka* [Proceedings of Higher Schools. Geology and Exploration], 2015, no. 6, pp. 57–59. (In Russian).
3. Vyazkova O.E., Kurdysh E.S. Vliyanie inzhenerno-geologicheskikh uslovij na zakonornosti osvoeniya territorii Kislovodskoj kotloviny [Engineering geological conditions and forecast of locations of archaeological sites in the Kislovodsk basin]. *Inzhenernye izyskaniya* [Engineering survey], 2016, no. 2, pp. 24–29. (In Russian).
4. Golubeva I. Sud'ba fligelya [судьба флигеля]. Internet-gazeta Guberniya. Pskovskaya oblast'. № 33 (605) ot 29 avgusta 2012 g. [Internet-newspaper «Guberniya». Pskov region. 2011, no.33 (605)] Available at: http://gubernia.pskovregion.org/number_605/09.php?export. (Accessed 11 May 2018). (In Russian).
5. Ignatov P.A., Bushkov K.YU., Kalmykov B.A., Vyazkova O.E. O svyazi landshaftnoradiogeoimicheskikh uslovij s arheologicheskimi nahodkami v doline r. Sosna na yugovostoke Orlovskoj oblasti [About the connection of landscape-radio- geochemical conditions and archaeological findings in the valley of the river Sosna in the south-east of the Orlov region]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Velikie reki — attraktory lokal'nyh civilizacij»* [Materials of the International Scientific Conference «Great Rivers — Attractors of Local Civilizations»], Dubna, 2002, pp. 43–45. (In Russian).
6. *Kreposti severo-zapada Rossii. Ot kreposti k kreposti* [Fortresses of the north-west of Russia. From fortress to fortress]. Kollektiv avtorov. Pod red. YU.B. Demidenko [Collaborative writing edited by Y.B. Demidenko], SPb, 2012, 108 p. (In Russian).
7. Podgornaya R.G., Salmina E.V. Issledovaniya Novogo Torga v Pskove v 2011 g. (predvaritel'nyy obzor) [Research of the New Torg in Pskov in 2011 (preliminary review)]. *Arheologiya i istoriya Pskova i Pskovskoj zemli. Seminar imeni akademika V.V. Sedova: Materialy 58-go zasedaniya* [Archeology and history of Pskov and Pskov land. Seminar named after academician V.V. Sedov: Materials of the 58th meeting], Moscow, Pskov, 2013, pp. 23–38. (In Russian).
8. Salmina E.V., Salmin S.A. Sani XVII v. iz XI Petrovskogo raskopa (predvaritel'naya publikaciya) *Arheologiya i istoriya Pskova i Pskovskoj zemli. Seminar imeni akademika V.V. Sedova: Materialy 57-go zasedaniya* [Archeology and history of Pskov and Pskov land. Seminar named after academician V.V. Sedov: Materials of the 57th meeting], Moscow, Pskov, 2011, pp. 17–25. (In Russian).
9. Serezhenko V.A., Kuzubov P.P. *Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1 : 200000. Seriya Kavkazskaya List L-37-XXVI/XXXII* [Geological map of the USSR, scale 1: 200000. Caucasian Group. Fragment L-37-XXVI / XXXII], Moscow, «Nedra» Publ, 1971, ROSGELFOND, № 22015. (In Russian).