

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 3
МАЙ—ИЮНЬ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 г.

Выходит 6 раз в год



ФГБОУ ВО «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДочный УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ»

МОСКВА-2019

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ СТАТЕЙ, ПУБЛИКУЕМЫХ В ЖУРНАЛЕ

В журнале «Известия высших учебных заведений. Геология и разведка». (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration]), 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 поля 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 помечать 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 слов — 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, повторяющий 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_kirillovometrec_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 сокращение и редакционные изменения рукописей.

14. Отписки 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

М.М. Амро (Mohammed Musa Amro, ФРГ), О.С. Брюховецкий, М. Вердойя (Massimo Verdoya, Италия), В.К. Гаранин, С.Д. Ганова, П.А. Игнатов, М.Н. Игнатьева, В.Ю. Керимов, 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, Ш. Хуанг (Shaopeng Huang, Китай, США), Л.Е. Чесалов, Е.Н. Щурова (отв. секретарь)

Сдано в набор 15.05.2019.
Бумага офсет. № 1
Уч.-изд л. 11,50.

Подписано в печать 15.06.2019.
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», 2019

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА
2019, № 3

СОДЕРЖАНИЕ

Геология

Новиков И.В. Биостратиграфическое значение комплексов триасовых тетрапод Тимано-Североуральского региона и сопредельной территории 5

Горожанина Е.Н., Горожанин В.М., Заграновская Д.Е., Захарова О.А. О строении Камско-Кинельской системы прогибов 9

Минералогия, петрография, литология

Рященко Т.Г., Штельмах С.И., Ухова Н.Н., Лоншаков Г.С., Колесников С.С. Осадки северо-восточного шельфа Охотского моря на участке Южно-Кириного месторождения углеводородов: микроструктура, минеральный, химический и микроэлементный составы 21

Лютюев В.П., Макеев А.Б. Оценка качества магнитных концентратов титановых руд Пижемского месторождения с позиции технологической минералогии 31

Рязанцев А.В., Новиков И.А., Разумовский А.А. Каменноугольный окраинно-континентальный мафит-ультрамафитовый комплекс параллельных даек Западно-Магнитогорской зоны (Южный Урал) 42

Гидрогеология и инженерная геология

Бураков М.М., Буркуш В.Г., Тынбаев М.М. О восстановлении уровня подземных вод после откачек из слоистых водоносных систем с перетеканием 51

Булахова К.Я., Судариков С.М. Анализ данных гидрогеохимического мониторинга подземных вод Северо-Сивашского артезианского бассейна 64

Геофизические методы поисков и разведки

Каринский А.Д., Кузнецов Н.М. Определение областей пространства, влияющих на результаты радиоволнового просвечивания 72

Из истории науки

Стародубцева И.А. Женщины в геологии. Елена Александровна Молдавская (1891—1973) 77

Вопросы геолого-разведочного образования

Гапоненко Е.С., Новгородова Л.В., Лекай Е.С., Еременко Р.У., Комаров В.Н., Андрухович А.О. Об опыте использования тестовых заданий для текущего контроля знаний по исторической геологии в МГРИ 86

PROCEEDINGS OF HIGHER EDUCATIONAL ESTABLISHMENTS
GEOLOGY AND EXPLORATION
2019, N 3

CONTENTS

Geology

- Novikov I.V. Biostratigraphic significance of the tetrapod assemblages of the Timan-North Urals region and adjacent areas . . . 5
- Gorozhanina E.N., Gorozhanin V.M., Zagranovskaya D.E., Zakharova O.A. About the structure of the Kama-Kinel trough system 9

Mineralogy, petrography, lithology

- Ryashchenko T.G., Shtel'makh S.I., Ukhova N.N., Lonshakov G.S., Kolesnikov S.S. Sediments of northeastern shelf of the sea of Okhotsk in the area of South Kirin hydrocarbon deposits: microstructure, mineral, chemical and trace element composition 21
- Lyutov V.P., Makeyev A.B. Assessment of the quality of the magnetic concentrates of the titanium ores at Pizhensky deposit from the point of view of the technological mineralogy 31
- Ryazantsev A.V., Novikov I.A., Razumovskij A.A. Carboniferous continental margin mafic-ultramafic sheeted dyke complex in the West Magnitogorsk zone (Southern Urals) 42

Hydrogeology and engineering geology

- Burakov M.M., Burkush V.G., Tynbayev M.M. On the restoration of the level of underground water after withdrawal from the layered aquifers with overflow 51
- Bulakhova K.YA., Sudarikov S.M. Analysis of the data of hydrogeochemical monitoring of groundwater in the North Sivash artesian basin 64

Geophysical methods of prospecting and exploration

- Karinskiy A.D., Kuznetsov N.M. Definition of the areas of space affecting results of the radio-wave method 72

From the history of science

- Starodubtseva I.A. Women in geology. Elena Alexandrovna Moldavskaya (1891—1973) 77

Geologic education issues

- Gaponenko E.S., Novgorodova L.V., Lekaj E.S., Eremenko R.U., Komarov V.N., Andruhovich A.O. To the experience in the use of tests for current control of knowledge on historical geology in MGRI 86

ГЕОЛОГИЯ
GEOLOGY

УДК 597/599:551.761(47)

**БИОСТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ ТРИАСОВЫХ
ТЕТРАПОД ТИМАНО-СЕВЕРОУРАЛЬСКОГО РЕГИОНА И СОПРЕДЕЛЬНОЙ
ТЕРРИТОРИИ**

И.В. НОВИКОВ

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

Приводятся новые и уточнённые данные по составу комплексов триасовых тетрапод Тимано-Североуральского региона, Мезенской и восточной части Московской синеклиз. Известная на этой территории последовательность триасовых тетраподных сообществ включает восемь комплексов, семь из которых соответствуют разновозрастным сообществам наземных позвоночных известным из других регионов Восточно-Европейской платформы и Приуральского прогиба. Первый комплекс из базального триаса Мезенской и Московской синеклиз, имеет раннеиндский возраст. Второй, третий и четвертый комплексы датируются ранним оленеком и характеризуют среднюю часть раннетриасового разреза Тимано-Североуральского региона, а также Мезенской и Московской синеклиз. Позднеоленьские пятый и шестой комплексы характеризуют верхнюю часть нижнего триаса Северного Приуралья, Московской и Мезенской синеклиз. Седьмой комплекс приурочен к основанию среднего триаса (нижний анизий) Северного Приуралья и не имеет аналогов в других регионах платформы и Приуралья. Восьмой комплекс известен из верхов среднего триаса Северного Приуралья и датируется поздним ладинином.

Ключевые слова: триас; биостратиграфия; тетраподы; Тимано-Североуральский регион; Московская синеклиза; Мезенская синеклиза.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-3-5-8

**BIOSTRATIGRAPHIC SIGNIFICANCE OF THE TETRAPOD ASSEMBLAGES OF THE
TIMAN-NORTH URALS REGION AND ADJACENT AREAS**

I.V. NOVIKOV

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

New and specified data on the composition of the Triassic tetrapod assemblages of the Timan-North Urals region, the Mezen syncline and the eastern part of the Moscow syncline have been given. The succession of the Triassic tetrapod communities known in this area includes eight assemblages, seven of which correspond to the contemporary communities of the terrestrial vertebrates known from other regions of the East European platform and the Cisurals. The first assemblage, known from the basal Triassic of the Mezen and Moscow synclines, is Early Induan in age. The second, third and fourth assemblages are dated by Early Olenekian age and typical for the middle part of the Early Triassic section of the Timan-North Urals region, the Mezen and Moscow synclines. The Late Olenekian fifth and sixth assemblages characterize the upper part of the Lower Triassic of the Northern Cisurals, the Moscow and Mezen synclines. The seventh assemblage characterizes the base of the Middle Triassic (Lower Anisian) of the Northern Cisurals and has no analogues in other regions of the platform and of the Cisurals. The eighth assemblage is known from the upper part of the Middle Triassic of the Northern Cisurals and is Late Ladinian in age.

Keywords: Triassic; tetrapods; biostratigraphy; Timan-North Urals region; Moscow syncline; Mezen syncline.

Остатки тетрапод играют ведущую роль при расчленении и корреляции триасовых отложений Восточной Европы, представленных преимущественно континентальными фациями. Прослеженная здесь история смены ранне- и среднетриасовых тетраподных сообществ по дробности выделяемых эволюционных этапов (до 10) не имеет аналогов в мире и может рассматриваться в качестве эталонной для межкуонтинентальных сопоставлений. Так, наиболее полная последовательность раннетриасовых комплексов наземных позвоночных, известная из Бузулукской впадины Восточно-Европейской платформы, включает пять фаун, названных по ведущим родам темноспондильных амфибий (снизу вверх): *Tupilakosaurus*, *Selenocara-Syrtosuchus*, *Benthosuchus*, *Wetlugasaurus* и *Parotosuchus*. При этом каждая из трёх последних фаун подразделяется на две группировки. Для фауны *Benthosuchus* — это группировки *Benthosuchus gusevae* и *B. sushkini*, для фауны *Wetlugasaurus* — группировки *Wetlugasaurus angustifrons* и *W. malachovi*, а для фауны *Parotosuchus* — группировки *Inflectosaurus* и *Trematosaurus* [7]. Две среднетриасовые фауны (*Eryosuchus* и *Mastodonsaurus*) известны из Южного Приуралья и Прикаспийской впадины Восточно-Европейской платформы [13]. Другая уникальная особенность восточно-европейской последовательности триасовых комплексов тетрапод состоит в том, что значительная часть её подразделений (фаун или группировок) может быть непосредственно датирована в подразделениях эталонной геохронологической шкалы благодаря присутствию родов амфибий, встречаемых в других регионах в прибрежно-морских отложениях совместно с фауной аммонитов [7, 13].

В пределах Тимано-Североуральского региона костеносные отложения триасового возраста присутствуют в Коротайхинской, Большесынинской и Верхнепечорской впадинах и гряде Чернышева Северного Приуралья и Печорской синеклизе Восточно-Европейской платформы [6, 7]. На сопредельной территории остатки тетрапод характеризуют нижний триас Яренской впадины и Сафоновского прогиба Мезенской синеклизы и восточной части Московской синеклизы [4, 7]. Известная отсюда последовательность триасовых тетраподных сообществ включает восемь комплексов, характеризующих различные стратиграфические уровни.

Первый комплекс относится к фауне *Tupilakosaurus* и известен из вохминской свиты Московской синеклизы и нижней подсвиты красноборской свиты в Яренской впадине. Он включает темноспондильных амфибий *Tupilakosaurus wetlugensis* и *Luzocerphalus blomi*, реликтовых антракозаврохрониозухий *Axitectum vjushkovi* и проколофоновспондилостид *Contritosaurus simus*. Возраст комплекса определяется прежде всего на основе присутствия его руководящих родов *Tupilakosaurus* и

Luzocerphalus в прибрежно-морских отложениях (формация Уорди Крик) мыса Стош Восточной Гренландии. Распространение обоих этих родов здесь связано с двумя местными аммонитовыми зонами — *Ophiceras commune* и *Bukkenites rosenkrantzi*, причем *Tupilakosaurus* встречается только в этих зонах, а *Luzocerphalus* — ещё и в интервале между ними (зона *Wordieoceras decipiens*) [10, 12]. Указанные гренландские зоны совместно отвечают верхней части нижеиндского подъяруса (верхней части грисбаха) Свердлупского бассейна Арктической Канады [9, 10].

Второй, относительно бедный комплекс (фауна *Benthosuchus*) приурочен к верхней подсвите красноборской свиты Яренской впадины и низам верхней подсвиты чаркабожской свиты Печорской синеклизы (о. Колгуев), откуда происходят находки темноспондила *Benthosuchus sushkini* и проколофонид *Tichvinskia cf. jugensis* соответственно [6, 7]. Комплекс датируется ранним оленеком благодаря находкам в Южном Приморье близкого к *Benthosuchus* рода *Benthosphenus* в местной раннеоленекской аммонитовой зоне *Anasibirites nevolini* [13].

Третий комплекс (группировка *Wetlugasaurus angustifrons* фауны *Wetlugasaurus*) характеризует нижнюю часть бызовской свиты Большесынинской впадины (откуда известны темноспондилы *Wetlugasaurus sp.* и *Trematosauridae gen. indet.*, текодонты *Tsylmosuchus sp.* и *Chasmatosuchus (?) sp.*, *Tichvinskia sp.* и пролацертилия *Microcnemus sp.*), среднюю часть нижнелестаншорской подсвиты Коротайхинской впадины (темноспондил *Angusaurus sp.*), среднюю часть верхней подсвиты чаркабожской свиты Печорской синеклизы (проколофонид *Insulophon morachovskayae*), нижнюю часть вашкинской свиты Яренской впадины (*Wetlugasaurus cf. angustifrons*, *W. sp.*, *Microcnemus sp.*), чучепальскую свиту Сафоновского прогиба (*Wetlugasaurus cf. angustifrons*, *Angusaurus sp.*, *Tichvinskia sp.*, *Microcnemus sp.*, *Chasmatosuchus sp.*) и слудкинскую свиту восточной части Московской синеклизы (*Wetlugasaurus angustifrons*, *Angusaurus sp.*) [4, 6, 7].

Четвертый комплекс соответствует верхней группировке фауны *Wetlugasaurus* — группировке *Wetlugasaurus malachovi*, впервые выделенной из верхов чаркабожской свиты Печорской синеклизы (бассейн р. Цильма) как «цильменский комплекс» [5]. Он также известен из пижмомезенской свиты Сафоновского прогиба, нижней части нижнелестаншорской подсвиты Коротайхинской впадины и березниковской свиты восточной части Московской синеклизы. Из чаркабожской и пижмомезенской свит происходят находки темноспондил *Wetlugasaurus malachovi*, *Vyborosaurus mirus* и *Angusaurus tsylmensis*, пролацертилий *Microcnemus sp.*, проколофонид *Timanophon rarientatus* и *Orenburgia sp.*, текодонтов *Tsylmosuchus jakovlevi* и *Chasma-*

tosuchus sp. Дополнительно из чаркабожской свиты (о. Колгуев) известна пролацертилия *Boreopricea funerea*, а из пижмomezенской свиты — реликтовый представитель рода *Benthosuchus* (B. sp.). Низы нижнелестаншорской подсвиты характеризуются присутствием *Wetlugasaurus* (?) sp., *Angusaurus* sp., *Trematosauridae* gen. indet., *Microcnemus* sp., проколофонид *Lestanshoria massiva* и *Orenburgia bruma* [6, 7]. Березниковская свита содержит остатки темноспондила *Vladlenosaurus alexeyevi*, пролацертилии *Microcnemus* sp. и ближе не определенных проколофонид [4]. Ведущий элемент комплекса (*Wetlugasaurus* cf. *malachovi*) отмечен также в верхней части вашкинской свиты Яренской впадины [7]. Раннеоленинская датировка третьего и четвертого комплексов (как и фауны *Wetlugasaurus*, в целом) основана на данных палинологического анализа вмещающих отложений (верхи чаркабожской свиты) в бассейне р. Цильмы [3].

Пятый комплекс (группировка *Inflectosaurus* фауны *Parotosuchus*) известен из федоровской свиты Московской синеклизы и лопатинской свиты Яренской впадины. Среди амфибий он содержит темноспондилов *Parotosuchus* sp., *Inflectosaurus* sp., *Yarengia* (?) sp., *Batrachosuchoides lacer*, *Melanopelta antiqua* и *Axitectum georgi*, а среди рептилий — *Tichvinskia vjatkensis*, *Tsylmosuchus* sp., пролацертилию *Augustaburiania* (?) sp. и неопределимых до рода териодонтов. К этому же комплексу мы относим остатки крупных текодонтов (семейства *Erythrosuchidae* или *Rauisuchidae*) и проколофона *Tichvinskia* (?) sp. из верхней части бызовской свиты Большесынинской впадины, а также трематозавроида (*Trematosauroida* gen. indet.) из пачки зеленовато-серых песчаников и красно-коричневых глин гряды Чернышева [6, 7].

Шестой комплекс широко распространен в гамской свите Яренской впадины и восточной части Московской синеклизы. Установленный отсюда богатый комплекс амфибий (темноспондилы *Parotosuchus komiensis*, *Trematosaurus* sp., *Yarengia perplexa*, *Batrachosuchoides ochevi* и *Melanopelta antiqua*, хрioniозухия *Vyushkoviana aperta*) и рептилий (проколофоны *Macrophon komiensis* и *Kapes amoenus*, текодонты — *Gamosaurus lozovskii* и *Vytshgeddosuchus zheshartensis*) относится к группировке *Trematosaurus* фауны *Parotosuchus*. Отдельные элементы комплекса происходят из верхов нижнелестаншорской подсвиты бассейна р. Хей-Яга (*Parotosuchus* cf. *komiensis*, *Batrachosuchoides impressus*, *Trematosauridae* gen. indet., *Augustaburiania* (?) sp. и ближе неопределимые текодонты-рауизухиды) [6, 7].

Позднеоленинская датировка пятого и шестого комплексов, отвечающих двум группировкам фауны *Parotosuchus*, базируется на присутствии их ведущего элемента (*Parotosuchus*) в прибрежно-морских отложениях горы Большое Богдо (Астраханская область) и п-ова Мангышлак (Казахстан),

соответствующих верхнеоленинским аммонитовым зонам *Tirolites harti* и *Columbites parisianus* [13].

Седьмой комплекс относительно бедный. Его основу составляют три находки остатков темноспондилейных амфибий из разновозрастных (раннеанизийских [1]) отложений в Северном Приуралье: *Komatosuchus chalyshevi* из низов нядейтинской свиты и *Plagiosternum* (?) sp. из верхней подсвиты лестаншорской свиты Кортаихинской впадины и *Aranetsia improvisa* из краснокаменной свиты Большесынинской впадины. Этот комплекс, получивший название «коматозуховый» [8], может соответствовать раннеанизийской фауне *Heptasaurus-Eosyclotosaurus* Центральной Европы, достоверные аналоги которой пока не известны на территории России. Помимо этих трёх форм комплекс включает неопределимых до рода темноспондилов-капитозаврид из верхней подсвиты лестаншорской свиты [6].

Восьмой комплекс приурочен к надкраснокаменной и сынинской свитам Большесынинской впадины. Из надкраснокаменной свиты происходят находки темноспондилов *Vukobaja* (?) sp. и *Cyclotosauridae* gen. indet., хрioniозухии *Synesuchus muravjevi*, пролацертилии *Malutinisuchus gratus*, текодонта-рауизухида *Energosuchus garjainovi*, дицинодонта *Planitorostris pechoriensis* и эозауроптеригии *Pistosaurus* (?) sp. [ср. 6]. Низы сынинской свиты бассейна р. Большая Сыня характеризуются присутствием темноспондилейных амфибий из надсемейства *Trematosauroida*. В бассейне р. Печоры к рассматриваемому комплексу, вероятно, относятся «кости рептилий», найденные еще в 1930-х гг. Т.А. Добролюбовой [6] и в настоящее время утраченные. По присутствию некоторых специфических элементов (*Malutinisuchus*, *Energosuchus*, представитель *Cyclotosauridae*) рассматриваемый комплекс близок к ассоциации тетрапод из букобайской свиты Южного Приуралья, относящейся к фауне *Mastodonsaurus* позднеладинского возраста [6]. Данные спорово-пыльцевого анализа вмещающих комплекс отложений не противоречат такой датировке [1].

Рассмотренный ход событий в эволюции триасовой тетраподной фауны Тимано-Североуральского региона и сопредельной территории документирован на разных своих этапах с неодинаковой полнотой. Последняя в целом наиболее значительна для фаун *Wetlugasaurus* (третий и четвертый комплексы) и *Parotosuchus* (пятой и шестой комплексы), известных из широкого круга захоронений и представленных обеими выделенными в других регионах Восточной Европы группировками. Обращает внимание отсутствие среди триасового тетраподного сообщества рассматриваемой территории типичных элементов позднеиндской фауны *Selenocara-Syrtosuchus*, широко распространённой на юго-востоке Восточно-Европейской

платформе (в Бузулукской впадине) [7, 11]. Однако мы не исключаем возможности отнесения к этой фауне тероцефала *Scalopognathus* (*S. multituberculatus*) из нижней подсвиты чаркабожской свиты Печорской синеклизы, охарактеризованной палинокомплексом *Pechorosporites disertus* предположительно позднегрисбахско-динерского возраста [2].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-54-10013 КО_а), а также в рамках государственной программы повышения конкурентоспособности Казанского (Приволжского) федерального университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

ЛИТЕРАТУРА

- Ильина Н.В. Палинотриаграфия среднего триаса Тимано-Североуральского региона. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 230 с.
- Ильина Н.В. Этапы развития раннетриасовой палинофлоры в Тимано-Североуральском регионе // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2005. № 1. С. 11–13.
- Ильина Н.В., Новиков И.В. Раннеоленинский комплекс мiosпор Печорской синеклизы // Палинология в стратиграфии. М.: Наука, 1994. С. 59–62.
- Лозовский В.Р., Олферьев А.Г., Новиков И.В., Миних М.Г., Миних А.В., Сенников А.Г. Уточненная субрегиональная стратиграфическая схема триасовых отложений запада, центра и севера Восточно-Европейской платформы (Польско-Литовская, Московская и Мезенская синеклизы, Вятско-Камская впадина): Объяснит. записка. М.: ПИН РАН, 2011. 32 с.
- Новиков И.В. Предварительные данные о новых находках позвоночных в чаркабожской свите (нижний триас) бассейна р. Цильмы // Изв. вузов. Геология и разведка. 1988. № 3. С. 112–115.
- Новиков И.В. Биостратиграфия континентального триаса Тимано-Североуральского региона по фауне тетрапод. М.: Наука, 1994. 139 с.
- Новиков И.В. Раннетриасовые амфибии Восточной Европы: эволюция доминантных групп и особенности смены сообществ. М.: РАН, 2018. 358 с.
- Новиков И.В., Шишкин М.А. Новые среднетриасовые лабиринтодонты Печорского Приуралья // Палеонтол. журн. 1992. №3. С. 71–80.
- Шевырев А.А. Аммоноидеи и хроностратиграфия триаса. М.: Наука, 1990. 179 с. (Тр. Палеонтол. ин-та АН СССР. Т. 241).
- Bjerager M., Seidler L., Stemmerik L., Surlyk F. Ammonoid stratigraphy and sedimentary evolution across the Permian–Triassic boundary in East Greenland // *Geol. Mag.* 2006. V. 143. P. 635–656.
- Novikov I.V. New stage of recovery of East European tetrapod community after Permian–Triassic crisis // *Paleontol. Journ.* 2018. V. 52. N 7. P. 791–795.
- Säve-Söderbergh G. On the dermal bones of the head in labyrinthodont stegocephalians and primitive Reptilia with special reference to Eotriassic stegocephalians from East Greenland // *Meddel. Gronland.* 1935. V. 98. № 3. P. 1–211.
- Shishkin M.A., Ochev V.G., Lozovskii V.R., Novikov I.V. Tetrapod biostratigraphy of the Triassic of Eastern Europe // *The Age of Dinosaurs in Russia and Mongolia.* Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. P. 120–139.

REFERENCES

- Il'ina N.V. *Palinostratigrafija srednego triasa Timano-Severoural'skogo regiona* [Middle Triassic palynostratigraphy of the Timan-NorthUrals region]. Ekaterinburg, Ural branch of RAS Publ., 2001, 230 p. (In Russian).
- Il'ina N.V. Etapy razvitiya rannetriasovoy palinoflory v Timano-Severoural'skom regione [Stages of the development of the Early Triassic palynoflora in the Timan-NorthUrals region]. *Vestnik Instituta geologii Komi NC UrO RAN.* [Bulletin of the Institute of geology of Komi scientific Centre of the Ural branch of RAS], 2005, no. 1, pp. 11–13. (In Russian).
- Il'ina N.V., Novikov I.V. Ranneolenekskij kompleks miospor Pechorskoj sineklizy [Early Olenekian miospore complex of the Pechora syncline], *Palinologija v stratigrafii* — [Palynology in stratigraphy]. Moscow, Nauka Publ., 1994, pp. 59–62. (In Russian).
- Lozovskij V.R., Oref'ev A.G., Novikov I.V., Minih M.G., Minih A.V., Sennikov A.G. *Utochnjonnaja subregional'naja stratigraficheskaja chema triasovykh otlozhenij zapada, centra i severa Vostochno-Evropskoj platformy (Pol'sko-Litovskaja, Moskovskaja i Mezenskaja sineklizy, Vjatsko-Kamskaja vpadina): Objasnitel'naja zapiska* [Specified subregional stratigraphic scheme of the Triassic deposits of the west, centre and north of the East European platform (Polish-Lithuanian, Moscow and Mezen' synclises): Explanatory letter]. Moscow, Paleontological Institute of RAS Publ., 2011, 32 p. (In Russian).
- Novikov I.V. Predvaritel'nye dannye o novyh nahodkakh pozvonocnykh v charkabozhskoj svite (nizhnij trias) bassejna r. Cil'ma [Preliminary data on the new finds of vertebrates in the Charkabozhka Formation of the Tsylna River basin] — *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka* — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 1988, no. 3, pp. 112–115. (In Russian).
- Novikov I.V. *Biostratigrafija kontinental'nogo triasa Timano-Severoural'skogo regiona po faune tetrapod.* [Continental Triassic biostratigraphy of the Timan-NorthUrals region on the tetrapod fauna]. Moscow, Nauka Publ., 1994, 139 p. (In Russian).
- Novikov I.V. *Rannetriasovye amfibii Vostochnoj Evropy: jevoljucija dominantnykh grupp i osobennosti smeny soobshhestv* [Early Triassic amphibians of Eastern Europe: evolution of dominant groups and peculiarities of changing communities]. Moscow, Russian Academy of Sciences Publ., 2018. 358 p. (In Russian).
- Novikov I.V., Shishkin M.A. Novye srednetriasovye labirintodonty Pechorskogo Priural'ja [New Middle Triassic labyrinthodonts of the Pechora CisUrals]. *Paleontologicheskij zhurnal.* — [Paleontological Journal], 1992, no. 3, pp. 71–80. (In Russian).
- Shevyryov A.A. *Ammonoidei i chronostratigrafija triasa* [Ammonoids and chronostratigraphy of the Triassic]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 179 p. (In Russian).
- Bjerager M., Seidler L., Stemmerik L., Surlyk F. Ammonoid stratigraphy and sedimentary evolution across the Permian–Triassic boundary in East Greenland, *Geol. Mag.* 2006, V. 143, pp. 635–656.
- Novikov I.V. New stage of recovery of East European tetrapod community after Permian–Triassic crisis. *Paleontol. Journ.*, 2018, V. 52, no 7, pp. 791–795.
- Säve-Söderbergh G. On the dermal bones of the head in labyrinthodont stegocephalians and primitive Reptilia with special reference to Eotriassic stegocephalians from East Greenland, *Meddel. Gronland.* 1935, V. 98, no 3, pp. 1–211.
- Shishkin M.A., Ochev V.G., Lozovskii V.R., Novikov I.V. Tetrapod biostratigraphy of the Triassic of Eastern Europe. *The Age of Dinosaurs in Russia and Mongolia.* Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2000, pp. 120–139.

УДК 55.(470.4)551.73. /551.242

О СТРОЕНИИ КАМСКО-КИНЕЛЬСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОГИБОВ*Е.Н. ГОРОЖАНИНА¹, В.М. ГОРОЖАНИН¹, Д.Е. ЗАГРАНОВСКАЯ², О.А. ЗАХАРОВА²*

¹*Институт геологии УФИЦ РАН
16/2, К.Маркса, Уфа 450077, Россия
e-mail: ygorozhanina@yandex.ru, gorozhanin@ufaras.ru*

²*ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ НТЦ»
75-79 д., лит. Д, Набережная реки Мойки, Санкт-Петербург 190000, Россия
e-mail: Zagranovskaya.DE@gazpromneft-ntc.ru, Zaharova.OA@gazpromneft-ntc.ru*

Камско-Кинельская система прогибов (ККСП) — структура, образовавшаяся во франском веке позднего девона на обширной территории Волго-Уральской провинции, выделяется по отложениям верхнего девона—нижнего карбона. Дана новая интерпретация обстановок формирования карбонатных отложений в ККСП. Прогибы ККСП были сформированы в конце девона, как впадины с пологими шельфовыми зонами. Выделены отложения среднего шельфа (рампа), полого погружающегося в сторону бассейна, где накапливались слоистые отложения, представленные биокластовыми и интракластовыми (комковатыми) известняками и карбонатными брекчиями, сформированными под влиянием штормов. Установленные в строении прогибов ККСП три структурно-фациальные зоны: центральная, бортовая и сводовая, отражают структуру прогибов, возникшую в результате тектонической перестройки в начале визейского века и реактивированную на неотектоническом этапе. Поднятия бортовой зоны, принимаемые за рифовые массивы, по-видимому, являются горстовидными структурами приразломных зон. Эти особенности позволяют рассматривать структуру ККСП как сформированную в результате палеотектонических процессов с соответствующим распределением мелководных и глубоководных фаций, впоследствии измененную в результате реактивации разломов фундамента.

К л ю ч е в ы е с л о в а: Камско-Кинельская система прогибов; девон; карбон; фации; известняки; шельф; рампы; штормовые отложения; рифы; разломы; сдвиги; неотектоническая активизация.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-3-9-20

ABOUT THE STRUCTURE OF THE KAMA-KINEL TROUGH SYSTEM*E.N. GOROZHANINA¹, V.M. GOROZHANIN¹, D.E. ZAGRANOVSKAYA², O.A. ZAKHAROVA²*

¹*Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS)
16/2, K. Marx st., Ufa 450077, Bashkortostan, Russia
ygorozhanina@yandex.ru, gorozhanin@ufaras.ru*

²*Gazpromneft Science & Technology Centre
75-79 D, Moika River emb., St Petersburg 190000, Russia
e-mail: Zagranovskaya.DE@gazpromneft-ntc.ru, Zaharova.OA@gazpromneft-ntc.ru*

Kama-Kinel Trough System (KKTS) — the structure formed in the Frasnian of the Late Devonian in the vast territory of the Volga-Ural province, is distinguished by the Upper Devonian — Lower Carboniferous deposits. The new interpretation of forming conditions of carbonate deposits in the KKTS has been given. The troughs of the KKST were formed in the Late Devonian as basin with gently sloping shelf zones. The deposits of the middle shelf (ramp), gently sinking into the side of the pool, where the layered accumulated precipitation are presented by bioclastic and intraclastic (lumpy) limestones and carbonate breccia, formed under the influence of storms. Three structural-facial zones, central, border and arched, allocated in the structure of deflections of the KKTS, reflect the structure of troughs formed as a result of tectonic restructuring at the beginning of the Visian and reactivated at the neotectonic stage. The uplift of the side zone considered as the reef buildups seem to be horst-shaped structures in fault zones. These features allow us to consider the structure of the KKTS as formed as a result of paleotectonic processes with the appropriate distribution of shallow and deep-water facies, subsequently changed as a result of reactivation of the basement faults.

K e y w o r d s: Kama-Kinel Trough System; Devonian; Carboniferous; facies; limestones; shelf; ramp; storm deposits; reef; faults; strike-slip faults; neotectonic activation.

Камско-Кинельская система прогибов (ККСП) — структура Волго-Уральской провинции (ВУП), выделяется по отложениям верхнего девона—нижнего карбона. Прогибы ККСП, проявленные во франско-турнейском ($D_3fr_3 - C_1t_2$) карбонатном комплексе и компенсированные терригенными отложениями нижнего карбона ($C_1t_2 - C_{1v_1}$) протягиваются вдоль р. Кама, с ответвлениями вдоль рек Волга, Белая и Кинель (рис. 1). Впадины ККСП образовались одновременно на обширной территории во франском веке позднего девона после формирования отложений доманикового горизонта [3, 6, 13—15, 17]. В течении фамена и турне происходило сужение впадин за счёт регрессивного смещения шельфовых зон к центральной глубоководной части, где сохранялось некомпенсированное (конденсированное) осадконакопление в течение всего периода их существования (до раннего визе). Это указывает на постоянство глубины бассейна в этой зоне в течение длительного времени.

Общепринятой считается точка зрения М.Ф. Мирчинка, Р.О. Хачатряна и О.М. Мкртчяна [3, 4, 6, 12—15, 17] о том, что прогибы образовывались в результате некомпенсированных тектонических погружений в позднедевонское—раннетурнейское время и что вдоль их бортов формировались рифогенные (биогермные) массивы. В позднетурнейский—ранневизейский этап прогибы были заполнены (компенсированы) терригенными осадками. Из-за частичного несовпадения структурных планов вышележащих каменноугольных и пермских пород относительно девонских отложений ККСП рассматривается как франско-турнейская тектоно-седиментационная структура, обусловленная конседиментационными дислокациями. Особенное значение придается валообразным и куполовидным поднятиям высотой до 300 м в бортовой и прибортовой зонах, которым приписывается седиментогенная—биогермно-рифовая природа. Считается, что перекрывающие отложения образовали структуры облекания этих поднятий.

В данных построениях практически не рассматривается влияние тектонической активности и размыва территории в раннем карбоне как фактора, повлиявшего на строение ККСП. Большинство тектонических форм рассматривается как конседиментационные структуры или структуры, унаследованные от строения фундамента [12—15, 19]. В то же время в ряде работ отмечается постоянство простираения зон разломов в течение геологической истории территории и их соответствие разломам в кристаллическом фундаменте [5].

По литологическим особенностям карбонатные отложения разделяются на фации открытого карбонатного шельфа, биогермные, склоновые кремнисто-карбонатные с прослоями брекчий, депрессионные карбонатно-кремнистые (доманиковые) [16, 17]. Доманиковый горизонт практически на

всей территории ВУП представлен однотипной фацией битуминозных тентакулитовых известняков примерно равной мощности. Выравнивание рельефа преддоманиковой поверхности подтверждается формированием монотонной толщи терригенных пород пашийского горизонта. Последовавшая трансгрессия отражена в последовательности карбонатных отложений тиманского, саргавского и доманикового горизонтов. Дифференциация фаций, сопровождавшая заложение ККСП, началась в позднем фране с уровня мендымского горизонта. На сводах в карбонатных отложениях появляется терригенный материал (колганская толща, орловские слои), в депрессионных образованиях — прослои карбонатных брекчий, что указывает на тектоническую активность в это время. Наиболее контрастное разделение фаций произошло в фамене [15, 17]. К началу раннего карбона область развития депрессионных битуминозно-глинистых осадков значительно сузилась и сместилась к центральной части прогибов ККСП [15, 17]. В бортовых зонах прогиба накапливались глинисто-карбонатные толщи, по мощности сопоставимые с фаменскими карбонатными отложениями. Основными особенностями строения ККСП являются резкая латеральная смена мощных фаменских карбонатов турнейскими глинисто-карбонатными толщами к центру прогибов и заполнение их нижневизейскими глинисто-песчаными отложениями. Начиная с позднего визе и до московского века среднего карбона, территория ВУП развивалась в режиме слабо расчлененного карбонатного шельфа.

В соответствии с фациальным составом пород, их мощностью и структурной позицией в ККСП установлены сводовый, бортовой и депрессионный типы разрезов [13, 17]. Из-за миграции фаций к центру выделяются бортовые зоны франско-фаменского, позднефаменского и турнейского времени [13, 17]. Границы этих зон обычно рассматриваются как фациальные. Резкая смена мощности объясняется либо унаследованным тектоническим рельефом, либо биогермной или клиноформной природой отложений без учёта постседиментационной тектоники.

Механизм формирования крупных платформенных структур рассматривается как сочетание субвертикальных и субгоризонтальных движений, чему соответствует их сдвиговый характер [2]. Исследования тектоники Русской платформы, проведённые в последнее время, показали сложную сдвиговую природу осадочных бассейнов [8]. Вопрос о времени формирования этих сдвигов является дискуссионным. Основная их часть, вероятно, была заложена в рифейское время, что запечатлено положением авлакогенов рифейского заложения. Их формирование В.Н. Валеев [2] связывал со сдвиго-раздвиговыми системами рифейских разломов.

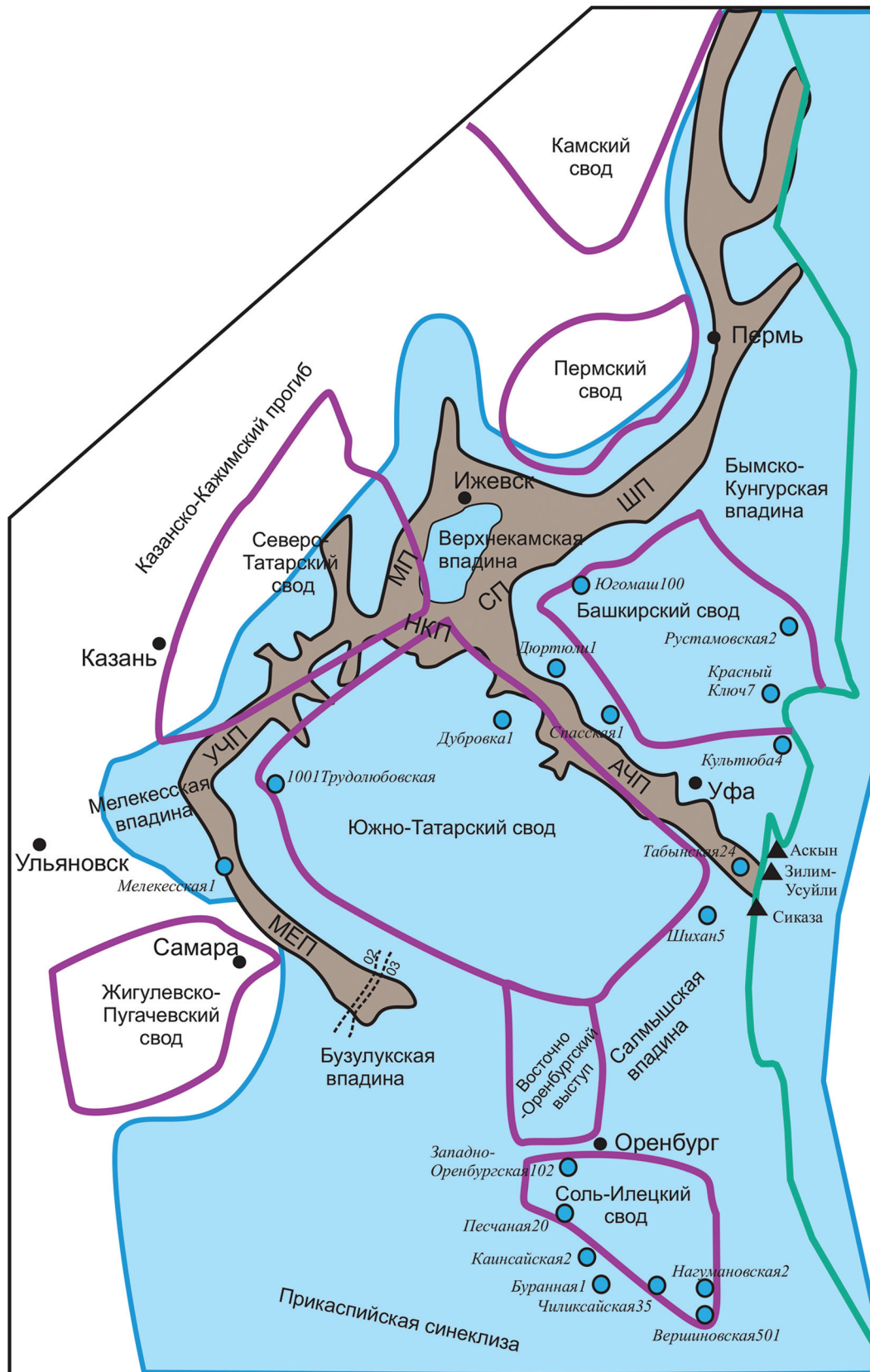


Рис. 1. Схема расположения осевых зон Камско-Кинельской системы прогибов: 1 – область распространения углисто-кремнисто-карбонатных отложений доманикового горизонта (D_3fr); 2 – контур осевых зон ККСР, по [15], прогибы: АЧП – Актаныш-Чишминский, МЕР – Муханово-Ероховский, УЧП – Усть-Черемшанский, МП – Можгинский, СП – Сарапульский, НКП – Нижнекамский, ШП – Шалымский; 3 – контуры сводовых поднятий фундамента, по [20]; 4 – граница Урала; 5 – города; 6 – скважины; 7 – разрезы Южного Урала; 8 – положение региональных сейсмопрофилей, показанных на рис. 2

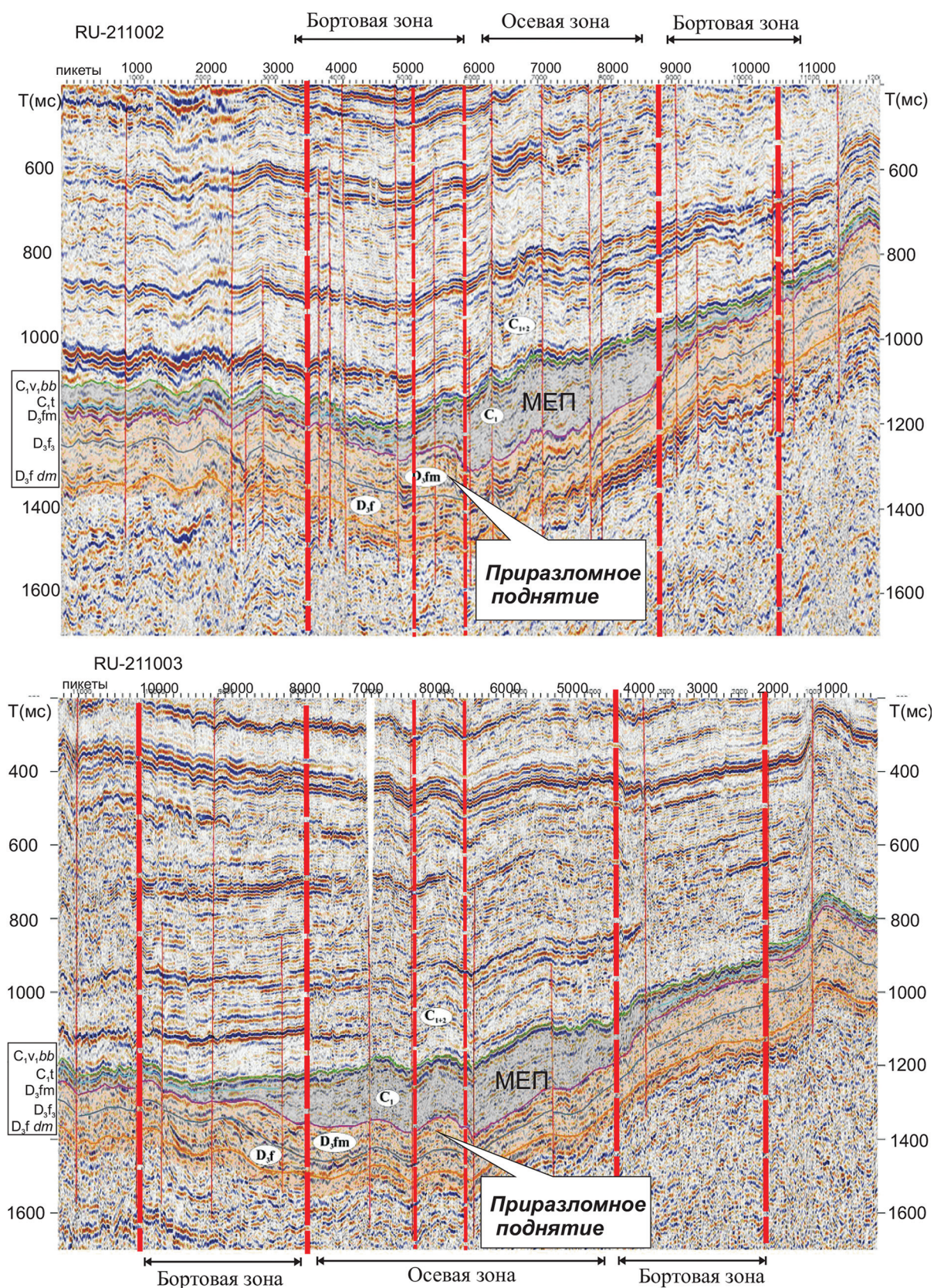


Рис. 2. Временные сейсмические разрезы через Муханово-Ероховский прогиб по профилям RU-211002 и RU-211003 (интерпретация Е.П. Атяшевой), положение приразломного поднятия на профиле 21002 – в борту прогиба, на профиле 21003 (расположенном восточнее) – в центре прогиба, красные линии – основные разломы, контролирующие структурно-фациальные зоны ККСП

Следующей крупной эпохой тектонической активизации была девонская, которая проявилась не только тектоническим расколом, но и сопровождалась интрузивным магматизмом. Подвижки по древним разломам привели к формированию ККСР, о чем свидетельствует частично унаследованное положение Актаныш-Чишминского (АЧР) прогиба вдоль борта Камско-Бельского авлакогена.

Статья посвящена описанию и анализу опубликованных и фондовых материалов и собственных исследований по строению Камско-Кинельской системы прогибов на территории южной части ВУР и выяснению роли постседиментационных тектонических подвижек в формировании структуры ККСР.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили разрезы скважин, расположенных на территории Башкирского свода, разрезы Западного Урала (Сиказа, Рязук), а также фондовые и архивные данные. На основе литофациального анализа проведено сопоставление разрезов. Для определения влияния постседиментационной тектоники использована интерпретация сейсмических данных (рис. 2).

Характеристика литофаций

Камско-Кинельская система прогибов характеризуется зональным строением. Здесь выделяются центральная депрессионная зона, бортовая зона и зона сводов [3, 13, 17]. Соответственно распределены мощности отложений — минимальные в центре и увеличенные в бортах и на сводах. Изучение литофациальных особенностей пород из керна ряда скважин, расположенных в разных зонах ККСР, и разрезов Сиказа и Усуили, соответствующих продолжению бортовых зон АЧР на Южном Урале (рис. 1), показывает, что во франско-фаменском комплексе можно выделить разные литофациальные типы известняков и фациальные последовательности отложений соответственно глубине шельфового моря (рис. 3). Бассейновые фации, сформировавшиеся на глубине моря свыше 100 м, представлены типичными доманикоидными породами (рис. 3, фиг. 1, 2). Они относятся к депрессионному типу разреза с мощностью отложений до 40 м. Фации глубоководного шельфа (глубина моря 50—100 м, ниже базиса штормовых волн) представлены тонкообломочными биолитокластовыми вагстоунами (рис. 3, фиг. 3, 4). Их мощность не превышает 50 м. Известняки слабобитуминозные, в разрезе отсутствуют кремнистые и глинистые прослои, нет глубоководных фаунистических остатков (гонимитов, радиолярий, спикул кремнистых губок). Несмотря на небольшую мощность, отложения нельзя отнести к депрессионным фациям.

Между впадиной и мелководным шельфом (глубина моря менее 20 м) имеется промежуточная зона с глубиной моря от 20 до 100 м, где возможно влияние штормов. Эта относительно глубоководная зона рассматривается как зона среднего шельфа или рампа (слабонаклонного шельфа) [21]. Типичные отложения этой зоны можно наблюдать в разрезах фаменского яруса Южного Урала на р. Сиказа и р. Усуили (приток р. Зилим). В разрезе Сиказа отложения представлены толщей серых толстослоистых пелитоморфных известняков мощностью 35 м. Характер слоистости указывает на активную гидродинамику — влияние волн и течений. Особенностью этих осадков является смешение относительно глубоководной и мелководной биокластики (например, трубчатые зеленые водоросли рода *Камаена*, обитатели фотической зоны, встречаются вместе с относительно более глубоководной фауной — криноидеями и конодонтами). Отсутствие кремнистых остатков (радиолярий и спикул губок — обитателей тиховодных глубин) и фоновых иловых прослоев, вероятно, связано с активным волновым воздействием. В то же время в разрезе присутствуют прослои и линзы диагенетических кремней, указывающие на относительную глубоководность и влияние апвеллинга. Характерными микрофациями являются литобиокластовые пакстоуны, грейнстоуны и рудстоуны (рис. 3, фиг. 5, 7), сформировавшиеся в условиях активной волновой деятельности и течений, часто встречаются прослои внутрiformационных брекчий. По нашему мнению, отложения следует относить к обстановке открытого шельфа рампового типа (слабо наклонной карбонатной платформы), с глубиной моря 20—50 м, в зоне волнового влияния и действия штормов при тектонически нестабильных условиях (землетрясениях). Похожие фации описаны в разрезе скв. 1001 Трудолюбовская (рис. 3, фиг. 4, 6 [11]) и в разрезе скв. 1 Дюртюли (рис. 3, фиг. 8 [17]), положение которых соответствует бортовым зонам прогибов. К этому же типу фаций можно отнести и турнейские отложения в разрезах Сиказа и Усуили на Южном Урале, представленные интракластовыми и биокластовыми известняками (рис. 3, фиг. 9—12) с прослоями карбонатных брекчий и желваками чёрных кремней.

Отложения этого типа мощностью более 200 м выделяют в бортовой тип разреза ККСР. Ранее О.М. Мкртчян [15] отнёс их к зональным клиноформным комплексам промежуточного положения между депрессией и мелководным шельфом, в работе [16] они отнесены к склоновым фациям кремнисто-карбонатного состава с прослоями известняковых брекчий. В бортовой тип разреза включают также толщи светлых известняков и доломитов увеличенной мощности (свыше 200 м), их считают рифами бортовой зоны [3, 4, 14, 15, 17].

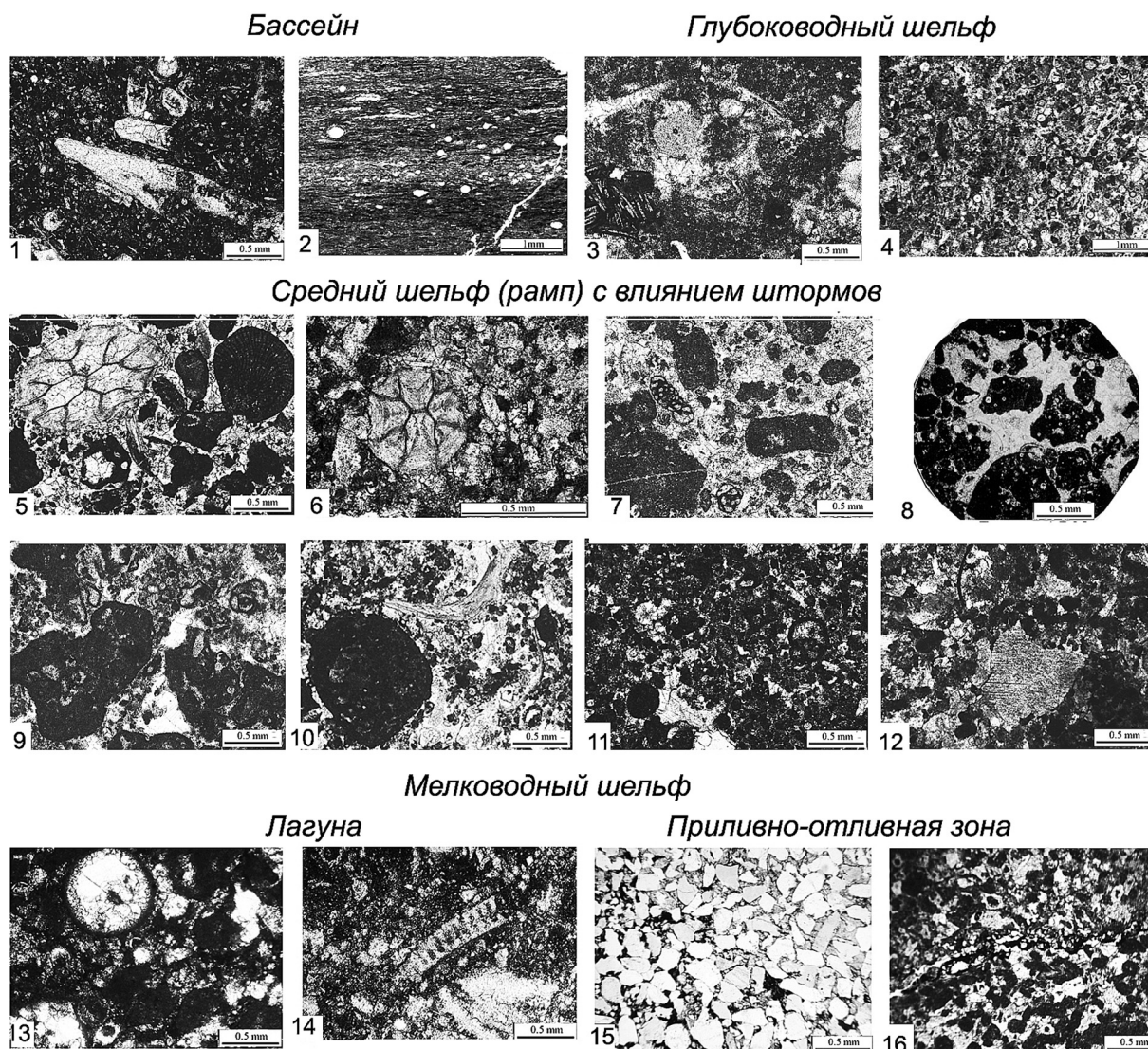


Рис. 3. Основные литофациальные типы известняков из разных зон ККСП. Микрофотографии шлифов, без анализатора: фиг. 1 – вакстоун битуминозный с тентакулитами, D_{3f}, доманиковский горизонт, разрез Сиказа, обр. 2/31; фиг. 2 – вакстоун кремнистый битуминозный с радиоляриями, D_{3fm2}, скв. 1 Мелекесская, шл. 7338; фиг. 3 – вакстоун-пакстоун биокластовый с фрагментом *Rectangulina* sp. (слева внизу), D_{3f}, мендымский горизонт, разрез Сиказа, обр. 2/43; фиг. 4 – вакстоун лито-биокластовый, D_{3fm2}, скв. 1001 Трудолюбовская, обр. 537; фиг. 5 – грейнстоун-рудстоун биокластово-интракластовый с кораллом, D_{3fm3}, разрез Сиказа, обр. 35/20; фиг. 6 – вакстоун биокластовый с кораллом, D_{3fm2}, скв. 1001 Трудолюбовская, обр. 536; фиг. 7 – пакстоун-грейнстоун интракластовый, D_{3fm2}, разрез Сиказа, обр. 31/15; фиг. 8 – пакстоун-грейнстоун интракластовый, D_{3fm1}, скв. 1, Дюртюли, обр. 4; фиг. 9 – пакстоун-грейнстоун интракластовый, C_{1t}, черепетский горизонт, разрез Сиказа, обр. 13/42; фиг. 10 – пакстоун-грейнстоун биокластово-интракластовый, C_{1t}, кизеловский горизонт, разрез Сиказа, обр. 16/50; фиг. 11 – пакстоун водорослево-биокластовый, C_{1t}, кизеловский горизонт, разрез Усуйли, обр. 214; фиг. 12 – пакстоун водорослево-криноидный, C_{1t}, черепетский горизонт, разрез Усуйли, обр. 58А; фиг. 13 – пакстоун сферово-сгустковый, D_{3fm2}, скв. 102 Западно-Оренбургская, обр. 119; фиг. 14 – вакстоун-пакстоун с водорослями Катаена, D_{3fm3}, скв. 102 Западно-Оренбургская, обр. 104; фиг. 15 – алевролит кварцевый с карбонатным цементом, D_{3f}, мендымский горизонт, скв. 2 Рустамовская, обр. 21-1; фиг. 16 – пакстоун пеллоидно-водорослевый, D_{3f}, мендымский горизонт, скв. 2 Рустамовская, обр. 21-6; Фотографии шлифов из скв. 1 Мелекесская и 1001 Трудолюбовская приведены по материалам Е.Л. Зайцевой [11], из скв. Дюртюли 1 – из работы А.З. Сюндюкова [17], из разрезов Сиказа и Усуйли – по материалам Е.И. Кулагинной и Е.Н. Горожаниной [11]

Фации мелководного карбонатного шельфа (глубина моря менее 20 м — выше базиса обычных ветровых волн, мощность 50—200 м) относят к сводовому (шельфовому) типу разреза [17]. Они часто представлены сферово-сгустковыми пакстоунами и каменовыми вакстоунами (рис. 3, фиг. 13, 14) лагунной зоны. Выделяются также фации приливо-отливной зоны мелководного шельфа с тер-

ригенной примесью (рис. 3, фиг. 15, 16), мощностью 50—150 м. Они распространены на Башкирском своде (орловские слои) и на склоне Восточно-Оренбургского сводового поднятия (колганская толща).

Особенностью распределения фаций турнейского яруса нижнего карбона является превышение их мощности (60—160 м) по сравнению с фа-

менскими отложениями в бортовой и осевой зонах прогибов (рис 4). Вероятно, это связано с подъёмом сводов, размывом отложений и накоплением относительно глубоководных фаций и штормовых осадков только в прогибах между ними. Последующая тектоническая перестройка в начале визейского века привела к изменению границ впадин и формированию горстовидных поднятий как в бортовой, так и осевой зонах, что фиксируется на сейсмопрофилях (рис. 2).

Сопоставление разрезов

Анализ распределения фаций верхнего девона при сопоставлении разрезов (рис. 4) показывает, что первоначально прогибы ККСП, вероятно, имели пологие борта в виде широких наклонных рампы с постепенным переходом от депрессионной зоны к глубоководному и мелководному шельфу с банками, биогермами, лагунами (рис. 5). При переходе от прогиба к зоне сводов в разрезах отмечается

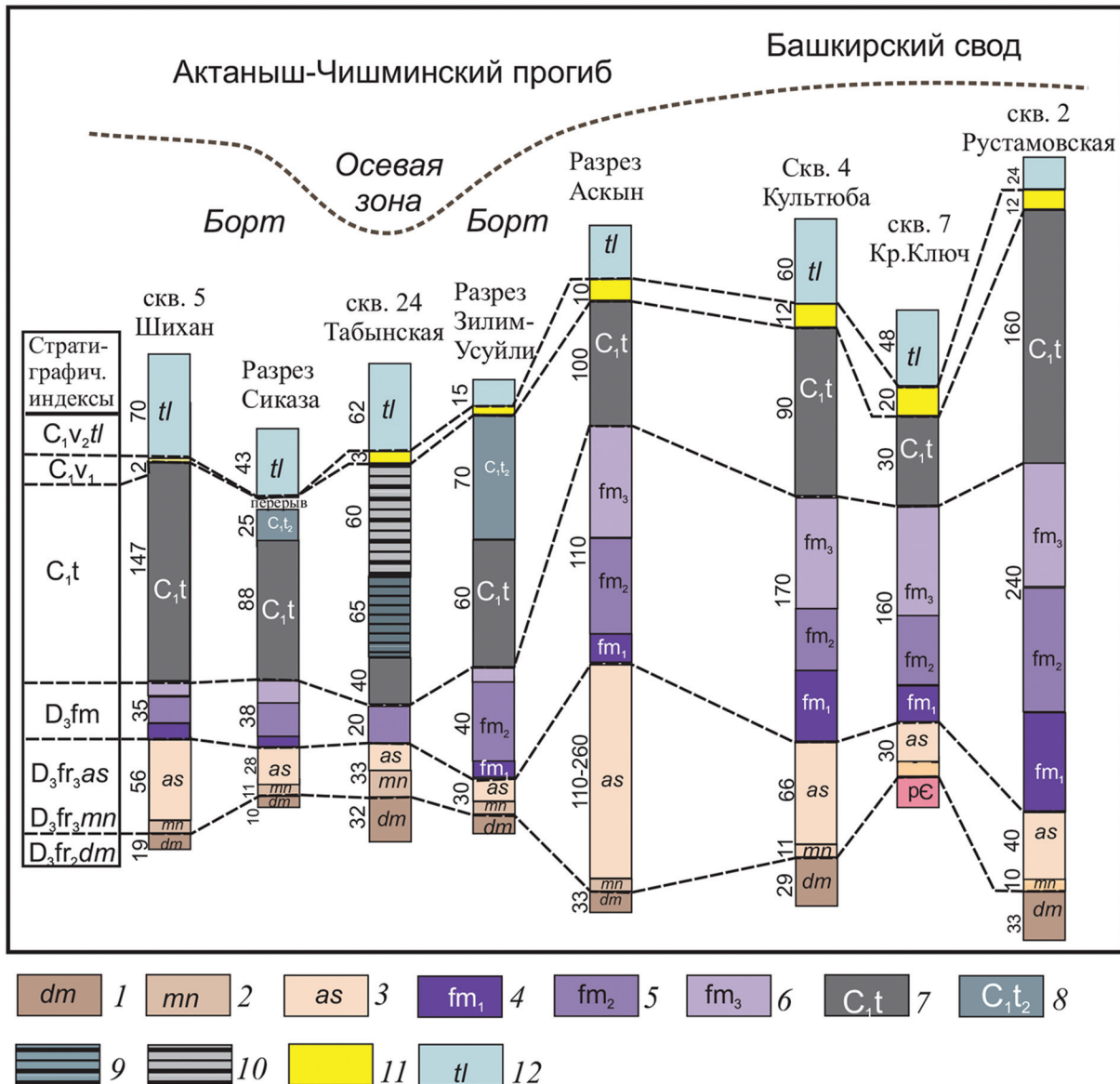


Рис. 4. Схема сопоставления разрезов уральского продолжения Актаныш-Чишминского прогиба ККСП и Башкирского свода (составлена с использованием фондовых материалов Стерлитамакской геолого-поисковой и Ишимбайской промыслово-геофизической контор за 1959—1971 гг. из архива А.З. Сюндюкова, строение разрезов Сиказа, Уйсули-Зилим и Аскын — по материалам А.П. Тяжевой, И.И. Сеницына, З.А. Сеницыной, А.Н. Абрамовой, Н.М. Кочетковой, В.Н. Пазухина, Е.И. Кулагина и данным [11]; цифры сбоку — мощности отложений в м; положение разрезов и скважин дано на рис. 1): 1—6 — отложения верхнего девона: 1 — кремнистые и карбонатные породы доманикового горизонта ($D_3f_2 dm$); 2 — карбонатные породы мендымского ($D_3f_3 mn$) и 3 — аскынского горизонтов ($D_3f_3 as$); 4—6 — карбонатные породы фаменского яруса (D_3fm): 4 — нижнего (D_3fm_1), 5 — среднего (D_3fm_2), 6 — верхнефаменского (D_3fm_3) подъярусов; 7—12 — отложения нижнего карбона: 7 — карбонатные породы турнейского яруса (C_{1t}) и 8 — верхнетурнейского подъяруса (C_{1t_2}); 9 — переслаивание известняков и аргиллитов C_{1t_2} ; 10 — аргиллиты C_{1t_2} ; 11 — терригенные породы нижневизейского подъяруса (C_{1v1}); 12 — карбонатные породы тульского горизонта верхневизейского подъяруса ($C_{1v2} tl$)

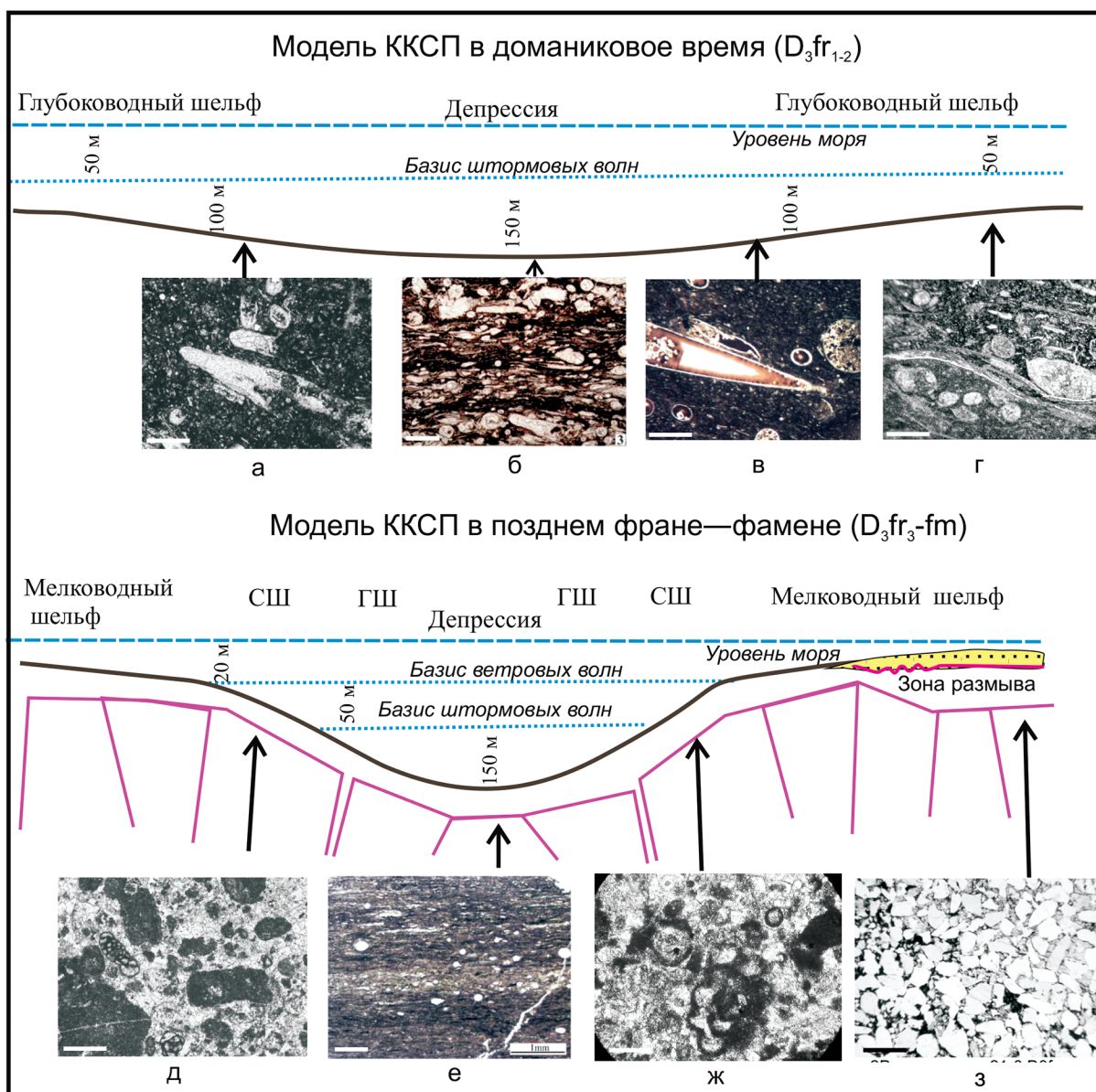


Рис. 5. Палеогеографическая схема-модель (реконструкция) строения Актаныш-Чишминской ветви ККСП в позднем девоне и примеры типовых микрофаций (положение разрезов и скважин показано на рис.1): ГШ — глубоководный шельф, СШ — средний шельф, красные контуры — блоки фундамента; микрофотографии шлифов, без анализатора, масштабная линейка 0,5 мм: а — вакстоун с раковинами тентакулит, разрез Сиказа, обр. 2/31; б — углеродистая карбонатно-кремнистая порода с ориентированными раковинами тентакулит, скв. 1 Мелекесская [18]; в — углеродистый вакстоун с раковинами тентакулит, выполненными халцедоном внутри (светлое) с буроватой каемкой УВ, скв. 100 Югомаш; г — вакстоун с раковинами тентакулит, скв. 2 Рустамовская, обр. 24-2; д — пакстоун-грейнстоун интракластовый, разрез Сиказа, D_3fm_2 , обр.31/15; е — углеродистая порода с радиолариями, скв. 1 Мелекесская, D_3fm_2 , шл. 7338 [18]; ж — пакстоун интракластовый с архисферами и фораминиферой (внизу в центре), разрез Усуили, D_3fm_2 , обр. 8; з — алевролит кварцевый с карбонатным цементом, скв. 2 Рустамовская, D_3f_3 , мендымский горизонт, обр. 21-1

резкое увеличение мощности франских и фаменских карбонатных отложений, представленных фациями мелководного шельфа. Наиболее простым объяснением этого являлось присутствие биогермно-рифовых построек большой мощности [14, 15]. Карбонатные тела, которые обычно относят к рифовым постройкам бортовой зоны, сложены разными биокомплексами: либо цианобактериальными сообществами (ренальцисами, гирванеллами и др.), образующими банки (луга), либо лагунными сферово-стустковыми или водоросле-

выми (каменовыми) фациями, или криноидно-водорослевыми биокластовыми и интракластовыми известняками [17]. Эти комплексы формировали пологий ровный шельф с отдельными лоскутными биогермами и холмами [1]. Например, биогермные кораллово-строматопоровые фации известняков франско-фаменского интервала широко развиты вне бортовой зоны Муханово-Ероховского прогиба (Землянская площадь в Бузулукской впадине). Выделяемые в зоне прогибов высокоамплитудные куполовидные структуры высотой

200—300 м часто сложены крупнозернистым вторичными доломитами (Хилковский «риф» [4]). Повышенная мощность франско-фаменских отложений (свыше 300 м) отмечается в разрезе Аскын на Южном Урале. Наши наблюдения показывают присутствие строматолитовых известняков в этом разрезе, которые относятся к фации мелководного шельфа. По мощности фаменские отложения в разрезе Аскын сопоставимы с таковыми в скв. Культюба 4, Кр. Ключ 7 и Рустамовская 2, где они представлены вторичными крупнокристаллическими доломитами.

К началу раннего карбона область развития депрессионных битуминозно-глинистых осадков значительно сузилась и сместилась к центральной части прогибов ККСП. В Актаныш-Чишминском прогибе отложения турнейского яруса представлены в бортовых зонах известняками, в центральной зоне — глинистыми и окремнелыми известняками. Уменьшение мощности, а также отсутствие и размыв турнейских отложений наблюдаются на отдельных участках в зоне сводов и их склонов [17].

Терригенная толща нижнего карбона формировалась в условиях смены трансгрессивного цикла на регрессивный этап, обусловленной подъемом сводов и активизацией тектонических движений по границам сводовых поднятий. Наблюдается неравномерное распределение нижневизейских терригенных отложений (рис. 4). В центральных зонах прогибов ККСП терригенные косьвинско-бобринские отложения ($C_{1t2}-C_{1v1}$) достигают мощности 70—80 м. На Табынской площади они представлены глинистыми осадками (аргиллитами) мощностью до 60 м, мощность перекрывающих песчаников не превышает 3 м. На сводах распространены песчаные осадки мощностью до 20 м. В скв. 2 Рустамовская отложения пограничного бобринско-тульского интервала представлены кварцевыми алевропесчаниками с характерными текстурами биотурбирования и тонкими чёрными глинистыми слоями (сдвоенные слойки), свидетельствующими о приливно-отливном характере осадконакопления.

Терригенные осадки нижнего карбона заполнили неровности в рельефе карбонатных пород фамена и турне (карстовые впадины) и прогибы ККСП. Каньонообразное строение впадин, заполненных терригенными отложениями, отмечается многими исследователями. Это свидетельствует о тектонической перестройке территории — образовании грабенов и горстов как в зоне прогиба, так и на склонах сводов.

Роль сдвиговой тектоники

Прогибы ККСП по кровле фамена в настоящее время имеют корытообразную форму с крутыми бортами и относительно широким пологим дном.

Трогообразная форма прогибов ККСП указывает на тектоническую природу бортов и не даёт основания отождествлять их с первичными фациальными границами шельфа. Совпадение положения центральных зон прогибов с руслами основных рек указывает на реактивацию зон разломов, контролирующих ККСП на неотектоническом этапе. На тектоническую природу выделенных границ указывают следующие признаки: относительная их прямолинейность, совпадение с простираем элементов структурного плана по нижележащим и перекрывающим горизонтам, резкая смена мощности горизонтов, которую принято объяснять наличием рифов. Характер системы разломов, контролирующих ККСП, соответствует системе трещин, образующихся при сдвигах. Основное нарушение имеет северо-восточное простираение и совпадает с Усть-Черемшанским прогибом и его продолжением на северо-восток — Нижнекамским, Сарапульским прогибами [7]. Оно имеет ответвления юго-восточного направления в виде Актаныш-Чишминского, Муханово-Ероховского прогибов, и северо-западного направления — Можгинского прогиба (рис. 1).

Главным фактором, повлиявшим на первичное распределение фаций позднего девона при формировании ККСП, был тектонический подъём сводов. Движение (вероятно, поворот) блоков фундамента привело к формированию сдвигово-раздвиговых зон, отмеченных прогибами на границах поднимающихся блоков. Дальнейшее движение блоков (реактивация в раннем карбоне) нарушило фациальные границы. Резкое изменение мощности отложений в бортовой зоне может быть связано не столько с резкой фациальной сменой, сколько с флексурным строением этой зоны, осложненной взбросо-сдвиговой тектоникой и присдвиговыми горстовидными поднятиями, сложенными перекристаллизованными и доломитизированными шельфовыми известняками. Выделенные большинством авторов в ККСП три зоны: центральная, бортовая и сводовая, отражают структуру прогибов, сформировавшуюся после турне, вероятно, на стадии заложения визейских грабенов. Отложения на сводах и их склонах в раннем карбоне могли быть выведены выше уровня моря и подвергаться разрушению, эрозии, карстованию, что фиксируется наличием стратиграфических перерывов и другими признаками. В косьвинско-радаевско-бобринское время происходило накопление терригенных отложений во впадинах (грабенах) центральной зоны прогиба и эрозионных ловушках на склонах сводов.

Новый — альпийский этап тектонической активизации платформы также повлиял на строение ККСП [7]. По времени он соответствует коллизионным процессам в Альпийско-Гималайском складчатом поясе [9], которые отразились активи-

зацией разломных зон на платформе. На сейсмических профилях можно видеть, что осадочные толщи от девона до перми деформированы однотипно (рис. 2), что указывает на молодой (послепермский) возраст деформаций. Тектонические движения, вероятно, происходили путём реактивации древних разломов по границам прогибов. Ранее было показано, что на последнем этапе активизации имел место прирост амплитуды структурных ловушек углеводородов (УВ), местами достигающий 80% [10].

Структурно-тектонический фактор проявляется в приуроченности залежей УВ к линейным зонам разломов, контролирующим обрамление сводов, в том числе и разломов вдоль зоны ККСП. На территории Башкирии установлены тектонические зоны северо-восточного и северо-западного простираний, которые называются грабенообразными прогибами [12]. Линейные зоны северо-восточного простирания относятся к кыновским (раннефранским) конседиментационным, а оперяющие их северо-западные разломы считаются более поздними. Вероятно, обе системы разломов являются постседиментационными сдвигами [19]. Вместе с выделенными флексурами северо-западного простирания вдоль или вблизи бортов Актаныш-Чишминского прогиба они образуют характерную ромбовидную сетку разломов, контролирующую вершину Южно-Татарского свода и находящееся на нем Ромашкинское месторождение. Это было подмечено О.М. Мкртчяном [15]. Формирование структур такого типа связано со сдвигово-блоковыми движениями фундамента в течение всей истории геологического развития территории ВУП. Зоны разломов и трещиноватости могут быть каналами циркуляции растворов и УВ, вызывающих вторичные метасоматические преобразования карбонатных пород (перекристаллизацию, доломитизацию, выщелачивание, окварцевание, сульфатизацию и др.), широко проявленные в зонах месторождений.

Заключение

Таким образом, дана новая интерпретация обстановок формирования карбонатных отложений в ККСП. Выделены отложения среднего шельфа

(рампа) полого погружающегося в сторону бассейна, где накапливались слоистые отложения, представленные биокластовыми и интракластовыми (комковатыми) известняками и карбонатными брекчиями, образованными под влиянием штормов. Это означает, что прогибы ККСП были сформированы в конце девона как впадины с пологими шельфовыми зонами. Выделяемые в строении прогибов ККСП три структурно-фациальные зоны: центральная, бортовая и сводовая, отражают структуру прогибов, возникшую в результате тектонической перестройки в начале визейского века и реактивированную на неотектоническом этапе. Поднятия бортовой зоны, принимаемые за рифовые массивы, по-видимому, являются горстовидными структурами приразломных зон. Эти особенности позволяют рассматривать структуру ККСП как сформированную в результате палеотектонических процессов, обусловивших подъём сводов и распределение мелководных и глубоководных фаций, впоследствии изменённую в результате реактивации разломов фундамента.

Выделяются три тектонических этапа, повлиявшие на формирование ККСП. В конседиментационный этап ($D_3fr_3 - C_1t_2$) произошло заложение ККСП, имевшее место в результате раскола края платформы и подъёма сводов в стадию позднедевонской активизации Восточно-Европейской платформы. Движение (поворот) блоков фундамента привел к формированию сдвиго-раздвиговых зон между ними, маркированных прогибами, обрамлёнными шельфовой зоной. Постседиментационный этап (C_1v_1) — реактивация разломов за счёт активизации движения по границам сводов, подъём сводов в зону эрозии, образование придвиговых поднятий и грабенов, заполненных терригенным материалом. Альпийский — неотектонический ($N - Q_{IV}$) этап — активизация движений блоков фундамента, возникновение флексурных зон, складчатых деформаций чехла и ромбовидной (планетарной) сетки разломов, контролирующей многие месторождения УВ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ООО «Газпромнефть НТЦ» и частично в рамках госзаданий по темам № 0246-2019-0118, № 0252-2017-0016 ИГ УФИЦ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антошкина А.И. Рифообразование в палеозое (север Урала и сопредельные области). Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 303 с.
2. Валеев Р.Н. Горизонтальные сдвиговые движения земной коры востока Русской платформы // Новые данные по геологии и нефтеносности Волго-Камского края. Казань, 1970 (Тр. Геологического института, вып.30). С. 90–98.
3. Геология и нефтегазоносность Камско-Кинельских прогибов. (Труды совещания, Казань, сентябрь, 1969) / Ред. В.И. Тропольский. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1970. 307 с.
4. Грачевский М.М. Стратиграфические и палеогеографические предпосылки поисков новых залежей нефти в Камско-Кинельской впадине // Геология и нефтегазоносность юго-востока Русской платформы / Ред. Р.Б. Сейфуллы-Мулюков. Гос. науч.-тех. изд-во нефт. и горно-топл. лит-ры, 1963 (Тр.НИЛНЕФТЕГАЗ, вып. 10). С. 79–97.
5. Гутман И.С., Потемкин Г.Н., Волк Е.Ю., Папухин С.П. Особенности геологического строения нижнекаменноугольных отложений в пределах южной части Камско-Кинельской системы прогибов // Недропользование XXI век. 2011. № 5. С. 20–25.

6. Зайдельсон М.И., Вайнбаум С.Я., Копрова Н.А. и др. Формирование и нефтегазоносность доманикоидных формаций. М.: Наука, 1990. 79 с.
7. Колодяжный С.Ю. Структура и эволюция Сурско-Камской зоны сдвига в кайнозой (Волго-Уральская антеклиз Восточно-Европейской платформы) // Геотектоника. 2015. № 4. С. 30–53.
8. Колодяжный С.Ю. Долгоживущие структурные ансамбли Восточно-Европейской платформы. Статья 3. Тектоника плитного чехла // Изв. вузов, сер. Геология и разведка. 2018. № 4. С. 5–16.
9. Копп М.Л. Мобилистская неотектоника платформ Юго-Восточной Европы (Тр.ГИН РАН, вып. 552). М.: Наука, 2004. 340 с.
10. Корнева Л.А. К вопросу о времени формирования нефтяных и газовых месторождений Пермского Прикамья // Стратиграфия и нефтегазоносность карбона западного Урала и Приуралья. Пермь: РИО ППИ, 1973. С. 162–168.
11. Кулагина Е.И., Степанова Т.И., Зайцева Е.Л., Горожанина Е.Н., Гибшман Н.Б., Иванова Р.М., Вевель Я.А., Пономарева Г.Ю., Филимонова Т.В. Атлас фораминифер и микрофаций верхнедевонских и каменноугольных отложений Северной Евразии. Электронное издание. М.: Издательство ПИН РАН, 2018. 220 с. http://ig.ufaras.ru/File/mono/Atlas_2018.pdf / (дата обращения — 13.03.2019).
12. Лозин Е.В. Геология и нефтеносность Башкортостана. Уфа: БашНИПИнефть, 2015. 704 с.
13. Мирчинк М.Ф., Хачатрян Р.О., Мкртчян О.М. Тектоника и происхождение Камско-Кинельской системы прогибов // Вопросы тектоники нефтеносных областей. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 86–101.
14. Мкртчян О.М. Верхнедевонские рифы и их роль в формировании нефтеносных структур востока Урало-Поволжья. М.: Наука, 1964. 118 с.
15. Мкртчян О.М. Закономерности размещения структурных форм на востоке Русской плиты. М.: Наука, 1980. 135 с.
16. Ступакова А.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А., Богомолов А.Х., Кирюхина Т.А., Коробова Н.И., Шарданова Т.А., Суслова А.А., Сауткин Р.С., Полудеткина Е.Н., Козлова Е.В., Митронов Д.В., Коркоц Ф.В. Поисковые критерии нефти и газа в доманиковых отложениях Волго-Уральского бассейна // Георесурсы. 2015. №2 (61). С. 77–86.
17. Сюндюков А.З. Литология, фации и нефтегазоносность карбонатных отложений Западной Башкирии (верхний девон, карбон, нижняя пермь). М.: Наука, 1975. 174 с.
18. Фортунатова Н.К., Зайцева Е.Л., Кононова Л.И., Баранова А.В., Бушуева М.А., Михеева А.И., Афанасьева М.С., Обуховская Т.Г. Литолого-фациальная и биостратиграфическая характеристика верхнедевонских отложений опорной скважины I Мелекесская (Мелекесская впадина, Волго-Уральская область) // Бюлл. МОИП, 2018. Т. 93. № 5–6. С. 3–49.
19. Хатянов Ф.И., Петрыкина Л.Б. Сейсмогеологическое прогнозирование нефтегазоконтролирующих структурных парагенезов транспрессии и транстензии // Нефтегазовое дело. 2012. № 1. С. 290–297.
20. Шаргородский И.К., Либерман В.Б., Казаков Э.Р., Зинатова М.Ф., Гирин И.Н., Зиганшин А.А. Составление тектонической схемы центральных районов Приволжского федерального округа // Георесурсы. 2004. № 1. С. 12–15.
21. Flügel, E. Microfacies of carbonate rocks. Berlin: Springer-Verlag, 2010. 984 p.

REFERENCES

1. Antoshkina A.I. *Riftoobrazovanie v paleozoe (sever Urala i sopredel'nye oblasti)*. [A reef-formation during Paleozoic (the north of the Urals and neighbor regions)], Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2003, 303 p. (In Russian).
2. Valeev R.N. *Horizontāl'nye sdvigovye dvizheniya zemnoj kory vostoка Russkoj platformy*. [The horizontal strike-slip motions of the earth crust at the east of the Russian Platform] *Novye dannye po geologii i neftegosnosti Volgo-Kamskogo kraja*. [New data on the geology and oil-bearing of the Volga-Kama region] *Trudy Geologicheskogo instituta* (g. Kazan) [Proc. of the Geological Institute (Kazan city)], Kazan, Kazan Publ., 1970, no. 30, pp. 90–98. (In Russian).
3. *Geologija i neftegazonosnost' Kamsko-Kinel'skih progibov* [Geology and oil-gas-bearing of the Kama-Kinel throughs]. *Trudy soveshhanija*, Kazan, sentjabr', 1969. Red.: V.I.Troepol'skij [Proc. of the conference, Kazan, September 1969, ed. V.L. Troepolsky], Kazan, Kazan University Publ., 1970, 307 p. (In Russian)
4. Grachevsky M.M. *Stratigraficheskie i paleogeograficheskie predposylki poiskov novyh zalezhej nefi v Kamsko-Kinel'skoj vpadine* [Stratigraphic and paleogeographic preconditions of new oil pools searching in the Kama-Kinel through]. *Geologija i neftegazonosnost' jugo-vostoка Russkoj platformy*. Red. R.B.Sejful'-Muljukov [Geology and oil-gas-bearing at the south east of the Russian Platform. Ed. R.B. Sejful'-Muljukov] Leningrad, Gos. nauch.-teh. izd-vo nefi. i gorno-topl. lit-ry, 1963 (Trudy NILNEFTEGAZ, vyp. 10) [Trudy NILNEFTEGAZ, no. 10], Leningrad, Gostoptechizgat Publ., 1963, pp.79–97. (In Russian)
5. Gutman I.S., Potemkin G.N., Volk E.Ju., Papuhin S.P. *Osobennosti geologicheskogo stroenija nizhnjekamennougol'nyh otlozhenij v predelakh juzhnoj chasti KamskoKinel'skoj sistemy progibov* [The peculiarities of the geological structure of the Lower Carboniferous deposits in the limits of the southern part of the Kama-Kinel trough system] *Nedropol'zovanie XXI vek* [Mineral resources development XXI century], 2011, no5, pp. 20–25. (In Russian)
6. Zaydelson M.I., Vainbaum S.Ja., Koprova N.A. et al. *Formirovanie i neftegazonosnost' domanikoidnyh formacij*. [Forming and oil-gas-bearing of the Domanik Formation], Moscow, Nauka Publ., 1990, 79 p. (In Russian)
7. Kolodyazhny S.Ju. *Struktura i jevoljucija Sursko-Kamskoj zony sdviga v kajnozoe (Volgo-Ural'skaja antekliza Vostochno-Evropejskoj platformy)* [Structure and evolution of the Sura-Kama strike-slip zone in the Cenozoic (Volga-Ural anticline of the East-European Platform)]. *Geotektonika* [Geotectonics], 2015, no 4, pp. 30–53. (In Russian)
8. Kolodyazhny S.Yu. Long-lived structural ensembles of the East European platform. Article 3. Tectonics of the platform cover. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka* [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], 2018, no. 4, pp. 5–16. (In Russian)
9. Kopp M.L. *Mobilistkaja neotektonika platform Jugo-Vostochnoj Evropy* [The mobilistic neotectonics of the platforms of the south-eastern Europe]. *Trudy GIN RAN*, vyp. 552. [Proc. GIN RAN, no.552.]. Moscow, Nauka Publ., 340 p. (In Russian)
10. Korneva L.A. K voprosu o vremeni formirovanija nefjanyh i gazovyh mestorozhdenij Permskogo Prikam'ja. [To the question on the forming time of the oil and gas deposits at the Permian Pre-Kamian]. *Stratigrafija i neftegazonosnost' karbona zapadnogo Urala i Priural'ja* [Stratigraphy and oil-gas-bearing of the Carboniferous in the Western Urals and Pre-Uralian]. Perm, RIO PPI Publ., 1973, pp. 162–168. (In Russian)
11. Kulagina E.I., Stepanova T.I., Zaitseva E.L., Gorozhanina E.N., Gibshman N.B., Ivanova R.M., Vevel Ja.A., Ponomareva G.Ju., Filimonova T.V. *Atlas foraminifer i mikrofacij verhnedevoevskih i kamennougol'nyh otlozhenij Severnoj Evrazii*. [Atlas of foraminiferas and microfacies of the Upper Devonian and Lower Carboniferous sediments of the Northern Eurasia], Moscow, PIN RAN Publ., 2018, 200 p. Available at: http://ig.ufaras.ru/File/mono/Atlas_2018.pdf / 13.03.2019 (In Russian)
12. Lozin E.V. *Geologija i neftegosnost' Bashkortostana*. [Geology and oil-bearing of the Bashkortostan] Ufa, BashNIPIneft Publ., 2015, 704 p. (In Russian)
13. Mirchink M.F., Hachatryan R.O., Mkrтчян O.M. *Tektonika i proishozhdenie Kamsko-Kinel'skoj sistemy progibov* [Tectonics and genesis of the Kama-Kinel through system] *Voprosy tektoniki neftegosnyh oblastej* [The questions of the tectonics of the oil-bearing areas], Moscow, AN SSSR Publ., 1962, pp. 86–101. (In Russian)
14. Mkrтчян O.M. *Verhnedevoevskie rify i ih rol' v formirovanii neftegosnyh struktur vostoка Uralo - Povolzh'ja*. [The Upper Devonian reefs and their role in the forming of the oil-bearing structures at the east of the Ural-Volga region], Moscow, Nauka Publ., 1964, 118 p. (In Russian)
15. Mkrтчян O.M. *Zakonomernosti razmeshhenija strukturnykh form na vostoке Russkoj plity*. [The regularities of the structural forms

- locations at the east of the Russian Plate], Moscow, Nauka Publ., 1980, 135 p. (In Russian)
16. Stoupakova A.V., Fadeeva N.P., Kalmykov G.A., Bogomolov A.H., Kiryukhina T.A., Korobova N.I., Shardanova T.A., Suslova A.A., Sautkin R.S., Poludetkina E.N., Kozlova E.V., Mitronov D.V., Korkots F.V. Poiskovye kriterii nefti i gaza v domanikovykh otlozheniyakh Volgo-Ural'skogo bassejna [Criteria for oil and gas search in Domanic deposits of the Volga-Ural basin] *Georesursy* [Georesources], 2015, no. 2 (61), pp.77–86. (In Russian)
 17. Sjundjukov A.Z. *Litologiya, facii i neftegazonosnost' karbonatnykh otlozhenij Zapadnoj Bashkirii*. [Lithology and facies of the oil-gas-bearing carbonate deposits of the Western Bashkiria], Moscow, Nauka Publ., 1975, 174 p. (In Russian)
 18. Fortunatova N.K., Zaitseva E.L., Kononova L.I., Baranova A.V., Bushueva M.A., Mikheeva A.I., Afanasieva M.S., Obukhovskaya T.G. Litologo-facial'naja i biostratigraficheskaja harakteristika verhnedevonskikh otlozhenij opornoj skvazhiny 1 Melekesskaya (Melekesskaya vpadina, Volgo-Ural'skaya oblast') [Upper Devonian lithology and biostratigraphy of reference borehole 1 Melekess (Melekess Depression, Volga-Ural Region)] *Bull. MOIP, Geological Series*, 2018, v. 93, part 5–6, pp. 3–49. (In Russian)
 19. Khatyanov F.I., Petrykina L.B. Sejsmogeologicheskoe prognozirovanie neftegazokontrolirujushhih strukturnykh paragenezov transpressii i transtenzii. [Seismic-geological predicting of oil-gas control structural transtension and transpression paragenesis] *Neftegazovoe delo* [Oil-gas work], 2012, no. 1, pp. 290–297. (In Russian)
 20. Shargorodskiy I.K., Liberman V.B., Kazakov Je.R., Zinatova M.F., Girina I.N., Ziganshin A.A. Sostavlenie tektonicheskoy shemy central'nykh rajonov Privolzhskogo federal'nogo okruga. [Tectonic scheme composing for the Cenral regions of the Volga Federal District] *Georesursy* [Georesources], 2004, no. 1, pp. 12–15. (In Russian)
 21. Flügel, E. *Microfacies of carbonate rocks*. Berlin, Springer-Verlag, 2010, 984 p.
-

МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОГРАФИЯ, ЛИТОЛОГИЯ
MINERALOGY, PETROGRAPHY, LITHOLOGY

УДК 624.131.1. (571.5)

ОСАДКИ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ШЕЛЬФА ОХОТСКОГО МОРЯ НА УЧАСТКЕ
ЮЖНО-КИРИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ:
МИКРОСТРУКТУРА, МИНЕРАЛЬНЫЙ, ХИМИЧЕСКИЙ
И МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВЫ

Т.Г. РЯЩЕНКО¹, С.И. ШТЕЛЬМАХ¹, Н.Н. УХОВА¹, Г.С. ЛОНШАКОВ², С.С. КОЛЕСНИКОВ²

¹Институт земной коры СО РАН
128, Лермонтова ул., г. Иркутск 664033, Россия
e-mail: ryashenk@crust.irk.ru, fotina78@gmail.com, nat_ukhova@crust.irk.ru

²Иркутский национальный исследовательский технический университет
83, Лермонтова ул., г. Иркутск 664074, Россия
e-mail: grinki.i@mail.ru

Рассмотрены результаты изучения микроструктуры, минерального, химического и микроэлементного составов осадков северо-восточного шельфа Охотского моря в районе о. Сахалин, на участке Южно-Киринского месторождения углеводородов. Образцы осадков отобраны в процессе бурения скважин со специального судна «Триас» до глубины 25—30 м от поверхности дна (при глубине моря 200—220 м). Поинтервальный отбор керна (через 1 м) проводился методом вдавливания. Аналитические исследования выполнены для 30 воздушно-сухих образцов (прочные цементированные цилиндры диаметром 4 см, высотой 3 см, массой 50—70 г) из скважины 49 глубиной 30 м. По литологическим признакам в разрезе толщи выделены три интервала, представленные глинистыми песками (0,0—4,0 м), глинами песчаными, пылеватыми (4,0—21,0) и глинами (21,0—30,0). Для каждого интервала получены РЭМ-изображения микроструктуры осадков с помощью сканирующего микроскопа JEOL JIB-Z4500 (x1000—6000); съёмка выполнялась для 10 тонких ненарушенных пластинок с верхней части воздушно-сухого образца-цилиндра, обнаружены остатки фауны и микропоры. По методу «Микроструктура» определены содержание агрегатов, первичных (свободных) частиц и величина реальной глинистости. На основе этих данных с помощью программы кластерного анализа Q-типа выполнено группирование образцов, подтвердившее выделенные интервалы в изученном разрезе. Методом порошковой дифракции установлены изменения минерального состава в толще осадков: с глубиной уменьшается содержание кварца и увеличивается — глинистой фазы, в составе которой преобладает гидрослюда и отмечается почти полное отсутствие каолинита. Содержание породообразующих оксидов (метод силикатного анализа) и статистическая обработка данных показали однородное распределение по разрезу оксидов кремния, алюминия и калия, коэффициент вариации (V , %) составил всего 1—3 %; повышение изменчивости зафиксировано для Fe_2O_3 (V 12). Значения геохимических коэффициентов и статистическая обработка данных выявили их незначительную изменчивость по разрезу (V 3—8); заметные изменения характерны для соотношения оксидов кальция и магния (V 16); установлена слабая степень химических преобразований осадков. Содержание 23 микроэлементов определено рентгенофлуоресцентным методом с помощью спектрометра S8TIGER. По величине специального показателя (Z_c), рассчитанного для группы токсичных компонентов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As), толща осадков имеет критический уровень загрязнения. На основе полученной информации сделаны выводы о зональном строении толщи осадков, особенностях микроструктуры, минерального и химического составов, а также степени загрязнения токсичными микроэлементами.

Ключевые слова: Охотское море; шельф; осадки; микроструктура; минеральный состав; химический состав; микроэлементы; показатель загрязнения; коэффициент концентрации.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-3-21-31

SEDIMENTS OF NORTHEASTERN SHELF OF THE SEA OF OKHOTSK IN THE AREA OF SOUTH KIRIN HYDROCARBON DEPOSITS: MICROSTRUCTURE, MINERAL, CHEMICAL AND TRACE ELEMENT COMPOSITION

T.G. RYASHCHENKO¹, S.I. SHTEL'MAKH¹, N.N. UKHOVA¹, G.S. LONSHAKOV², S.S. KOLESNIKOV²

¹*Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk
128, Lermontova St., Irkutsk 664033, Russia
e-mail: ryashenk@crust.irk.ru, fotina78@gmail.com, nat_ukhova@crust.irk.ru*

²*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk
83, Lermontova St., Irkutsk 664074, Russia
e-mail: grinki.i@mail.ru*

The study results of the microstructure, mineral, chemical and trace element composition of the northeastern shelf sediments in the area of the South Kirin hydrocarbon deposits of the Sea of Okhotsk in the Sakhalin region are considered. Sediment samples were taken during well drilling from the «Trias» special vessel at the depth of 25–30 m from the bottom surface (by the sea depth of 200–220 m). Interval coring (every one meter) was carried out by the pressing-in method. Analytical studies were performed for 30 air-dry samples (firmly cemented cylinders with a diameter of 4 cm, a height of 3 cm, and a weight of 50–70 g) of well No. 49 (30 m). According to lithological characteristics, three intervals are distinguished in the section which are represented by clay sands (0,0–4,0 m), sandy, silty clays (4,0–21,0) and clays (21,0–30,0). REM images of the sediment microstructure were obtained using a scanning microscope JEOL JIB-Z4500 (x1000–6000) for each interval. The scientific imaging was performed for ten thin undisturbed plates from the top part of air-dry sample-cylinder. Fauna residues and micropores were found. The content of aggregates, primary (free) particles and the volume of real clay content were determined by the «Microstructure» method. On the basis of these data, grouping of samples was carried out using the Q-type cluster analysis program which confirmed the picked intervals in the studied section. Changes in the mineral composition were determined by powder diffraction in the sediment thickness. The quartz content decreases with depth, and the clay phase increases in which hydromica dominates, and the almost complete absence of kaolinite is noted. The content of rock-forming oxides (method of silicate analysis) and statistical data processing showed a homogeneous distribution of silicon, aluminum and potassium oxides in the section, the coefficient of variation (V , %) was only 1–3 %. Augmentation of variability was found for Fe_2O_3 (V 12). Values of geochemical coefficients and statistical data processing revealed their insignificant variability in the section (V 3–8). Noticeable changes are characteristic for the ratio of calcium and magnesium oxides (V 16). A lesser degree of chemical transformations of sediments was established. The content of 23 trace elements was determined by the X-ray fluorescence method using an S8 TIGER spectrometer. The sediment thickness has the critical level of pollution by values of the pollution index (Z_c) calculated for a group of toxic elements (V , Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As). Based on the obtained information, the conclusions were drawn about the zonal structure of the sediment thickness, the features of their microstructure, mineral and chemical composition, as well as the degree of contamination by toxic trace elements.

Keywords: Sea of Okhotsk; shelf; sediments; microstructure; mineral composition; chemical composition; trace elements; pollution index; concentration coefficient.

Изучение донных осадков озёр и морей относится к задачам морской геологии. Широко известны результаты Международного проекта «Байкалбурение», когда в 1993–1999 гг. проводились исследования осадков оз. Байкал по глубоким (до 100 м) скважинам [3]. Некоторый опыт изучения микроэлементного состава озёрных осадков, представленных биогенно-терригенными илами и подстилающими глинами, был получен при исследовании воздушно-сухих образцов из верхней зоны (0–100 см) в районе Академического хребта на оз. Байкал [11]. В одном из последних сборников материалов научной конференции «Сергеевские чтения», проведённой в рамках года экологии в России, опубликована статья по осадкам глубоководной части Баренцева моря в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения [6]. О геоэкологическом мониторинге в районах освоения морских месторождений полез-

ных ископаемых приводятся сведения в [1], где для осадков рекомендуется определять гранулометрический состав и ряд геохимических параметров, в том числе содержание микроэлементов.

Таким образом, представленные в статье материалы о микроструктуре, минералогии, химическом и микроэлементном составов осадков северо-восточного шельфа Охотского моря в районе о. Сахалин на участке Южно-Кириного месторождения углеводородов попадают в рамки указанных выше исследований.

Образцы осадков отобраны в процессе бурения скважин со специального судна «Триас» до глубины 25–30 м от поверхности дна (при глубине моря 200–220 м); поинтервальный отбор керна проводился методом вдавливания.

При изучении микроструктуры и состава осадков скважина 49 использованы аналитические воз-

возможности Центра коллективного пользования (ЦКП) «Геодинамика и геохронология» и лаборатории инженерной геологии и геоэкологии Института земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН) и Байкальского центра нанотехнологий Иркутского национально-го исследовательского технического университета (ИРНТУ).

Объекты исследования

Аналитические исследования выполнены для 30 воздушно-сухих образцов керна скважины 49 глубиной 30 м, отобранных через 1 м. Это были прочно сцементированные цилиндры диаметром 4 см, высотой 3 см, массой 50—70 г. Детальное визуальное описание образцов проводилось по свежим сколам с использованием 4-кратной лупы. Фиксировались следующие признаки: цвет, пылеватость, прочность кусочков, характер поверхности их излома, наличие на этой поверхности микропор, микротрещин, включений.

По указанным признакам в разрезе скважины 49 выделены три интервала (три зоны): верхний (0,0—4,0 м) — глинистые пески; средний (4,0—21,0) — глины песчаные, пылеватые; нижний (21,0—30,0) — глины.

В верхней зоне залегают глинистые пески светло-серого (дымчатого) или серого цвета, пылеватые; мелкие кусочки с небольшим усилием ломаются руками; поверхность излома овально-бугристая, видны тонкие горизонтальные слойки, микропоры.

Следующий интервал — глины песчаные, пылеватые, серые и светло-серые, редко с палевым оттенком; с трудом можно отломить небольшой остроугольный кусочек, который с заметным усилием растирается пальцами в пыль; поверхность излома — тонкоплитчатая, слоисто-ребристая; видны округлые углубления, «соты-точки» (это, возможно, микропоры, возникшие при высыхании осадка) и горизонтальные трещинки длиной до 3—4 мм, встречаются остатки ракушек (на глубине 11 и 17 м).

Нижний интервал (21,0—30,0 м) представлен глинами преимущественно серого цвета; от образца с большим трудом можно отломить небольшой остроугольный кусочек, который невозможно растереть пальцами в пыль; на изломе видны углубления (иногда до 1—2 мм), «соты-точки», поверхность излома ребристая, плитчатая (толщина плиток 2—3 мм) или тонкоплитчатая (толщина плиток-листочков 0,1—0,2 мм), заметны горизонтальные трещинки длиной 2—3 мм.

Методы и подходы

Микроструктурные параметры. Использовался метод «Микроструктура», разработанный в лаборатории инженерной геологии и геоэкологии ИЗК

СО РАН для глинистых и лёссовых отложений [5, 9], который является оригинальной разработкой, основан на результатах гранулометрического анализа глинистых и лёссовых отложений, поэтому ниже приведены некоторые разъяснения относительно микроструктурных параметров.

Для 30 образцов скважины 49 (отбор через 1 м) выполнен гранулометрический анализ пипеточным методом с тремя способами подготовки (агрегатный — I, полудисперсный-стандартный — II, дисперсный — III), в результате которого получены три строки данных о содержании шести фракций (0,50—0,25; 0,25—0,05; 0,05—0,01; 0,01—0,002; 0,002—0,001; <0,001 мм) для расчёта содержания основных микроструктурных параметров — их всего 28 [5, с. 75]. В нашем случае (скв. 49) определялись коэффициенты микроагрегатности для каждой фракции (Кма), содержание агрегатов (А) и их разновидностей по размерам (А2, А3), первичных (свободных) частиц (М3, М4, М6) и реальная глинистость (М8).

Коэффициент микроагрегатности представляет собой разность содержаний каждой фракции, полученных при дисперсной и агрегатной подготовке образца к анализу. Значения коэффициентов с отрицательным знаком показывают количество агрегатов соответствующей размерности (содержание фракции уменьшается за счёт их разрушения), поэтому можно получить общее содержание агрегатов и их распределение по размерам. Содержанию первичных частиц соответствует разность между их общим содержанием в образце и в составе агрегатов. Реальная глинистость — это общее количество частиц <0,002 мм, которые находятся в агрегатах и свободном состоянии. Тип микроструктуры устанавливается по общему содержанию агрегатов: А<10 % — скелетный, А=10—25 — агрегированно-скелетный, А=25—40 — скелетно-агрегированный, А>40 — агрегированный. При обработке полученных материалов по микроструктурным параметрам осадков использованы программы «Стандартная статистика» и «Кластерный анализ Q-типа».

РЭМ-изображения микроструктуры осадков получены для образцов верхнего, среднего и нижнего интервалов разреза скважины 49. Съёмка выполнена С.С. Колесниковым на сканирующем микроскопе JEOL JIB-Z4500 (увеличение 1000—6000) для десяти тонких ненарушенных пластинок из верхней части воздушно-сухого образца-цилиндра.

Минеральный состав. Образцы исследовались методом порошковой дифракции на дифрактометре ДРОН-3.0; рентгенограммы идентифицированы с помощью программы поиска фаз, количественные соотношения компонентов рассчитаны по корундовым числам методом RIR, пробы готовились по стандартной методике [13]. Полученные соотношения фаз носят приближенный характер.

Условия съемки следующие: аппарат ДРОН-3.0, излучение $\text{Cu K}\alpha$, Ni-фильтр, $V = 25 \text{ кВ}$, $I = 20 \text{ мА}$, $2\theta 3\text{--}65^\circ$ со скоростью измерения — $1^\circ/\text{мин}$. Определения выполнены для семи образцов инженером М.Н. Рубцовой.

Химический состав. Содержание порообразующих оксидов определено методом силикатного анализа [10] с последующими расчётами различных геохимических коэффициентов (K_i , BA , K_z , K_k , K_h , ICV) [2]. Химический состав установлен для десяти образцов глинистых осадков верхнего, среднего и нижнего интервалов разреза.

Микроэлементный состав. Содержания микроэлементов определены для 28 образцов рентгенофлуоресцентным методом с помощью спектрометра S8 TIGER (Германия, фирма Брукер) [8]. Установлены содержания (г/т) V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As, Sn, Ba, La, Ce, Nd, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ga, S, Cl, U, Th.

Для группы токсичных компонентов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As) рассчитан показатель (Z_c), который характеризует степень загрязнения ими: $Z_c = \sum [K_d - (n - 1)]$, где K_d — коэффициент концентрации i -элемента в образце, равный для Co, Ni, Cu, Zn отношению концентрации токсичного элемента к фоновому содержанию, для Pb, As отношению их содержаний к предельно допустимым концентрациям (ПДК); n — число учитываемых элементов ($n = 6$) [7].

Кроме того, для токсичных компонентов установлены коэффициенты концентрации (K_c), представляющие собой отношение содержания (среднего или максимального) микроэлемента к значению кларка (по А.П. Виноградову). К этой группе относятся также фтор и олово, но содержание фтора не определялось, олова $< 4 \text{ г/т}$.

Результаты исследований

Характеристика микроструктурных параметров (метод «Микроструктура»). После определения содержания основных параметров выполнена ста-

тистическая обработка данных для всего разреза скважины (по каждому интервалу расчеты не проводились) (табл. 1). На основе этих материалов установлены общие особенности глинистых осадков толщи. Микроструктура осадков является скелетно-агрегированной ($A = 36$), распределение агрегатов по разрезу относительно равномерно ($V 16 \%$); преобладают тонко—мелкопесчаные ($0,25\text{--}0,05 \text{ мм}$) и крупнопылеватые ($0,05\text{--}0,01 \text{ мм}$) разновидности. При этом для крупнопылеватых характерна высокая степень изменчивости в вертикальном разрезе толщи ($V 81$). Среди первичных (свободных) частиц первое место занимают крупнопылеватые, в составе агрегатов их нет, на втором месте находятся мелкопылеватые, содержание которых явно завышено и приближается к крупной «пыли». Толща осадков по реальному содержанию фракции $< 0,002 \text{ мм}$ (среднее значение M_8 составляет 39%) относится к глинам. Особенностью разреза является почти полное отсутствие в осадках средних песчаных ($0,50\text{--}0,25 \text{ мм}$) первичных частиц, только в верхней части (интервал $0\text{--}4 \text{ м}$) их количество достигает 30% (здесь выделены при визуальном описании глинистые пески).

Распределение общего содержания агрегатов, их разновидностей, а также первичных частиц и значений реальной глинистости в толще осадков представлено на графиках, где можно проследить тип их изменчивости. Особенно выделяется нижняя зона, где заметны уменьшение тонко-мелкопесчаных агрегатов за счёт крупнопылеватых (рис. 1), а также возрастание реальной глинистости и увеличение содержания первичных мелкопылеватых частиц за счёт крупнопылеватых (рис. 2). Частными признаками для выделенных интервалов разреза являются количество агрегатов различных размеров (A_2 , A_3) и содержание первичных частиц (M_3 , M_4).

С помощью кластерного анализа Q -типа проведено группирование объектов по микроструктурным параметрам (n — число образцов, m — число признаков). По вертикальной оси расположены

Таблица 1

Результаты статистической обработки данных о параметрах микроструктуры осадков шельфа (скв. 49, $n=30$)

П	Содержание параметров микроструктуры, %						
	A	A2	A3	M3	M4	M6	M8
$\bar{X}$	36,0	25,0	9,5	28,0	19,6	8,1	39,0
$\bar{X}_{\min}$	18,2	11,7	0,0	15,1	12,0	2,6	17,0
$\bar{X}_{\max}$	44,9	41,3	27,8	42,5	31,2	22,2	47,1
σ	5,574	7,804	7,663	7,700	4,939	4,409	6,675
$V, \%$	16	31	81	27	25	54	17

Примечание. П — статистические показатели: $\bar{X}$, $\bar{X}_{\min}$, $\bar{X}_{\max}$ — среднее, минимальное и максимальные значения содержания параметра; σ — стандартное отклонение; V — коэффициент вариации; n — число образцов (здесь и в табл. 3, 4, 5). Параметры микроструктуры: A — общее количество агрегатов, A2, A3 — в том числе тонко-мелкопесчаных и крупнопылеватых разновидностей; M3, M4, M6 — содержание первичных (свободных) крупнопылеватых, мелкопылеватых, тонкоглинистых частиц; M8 — реальная глинистость.

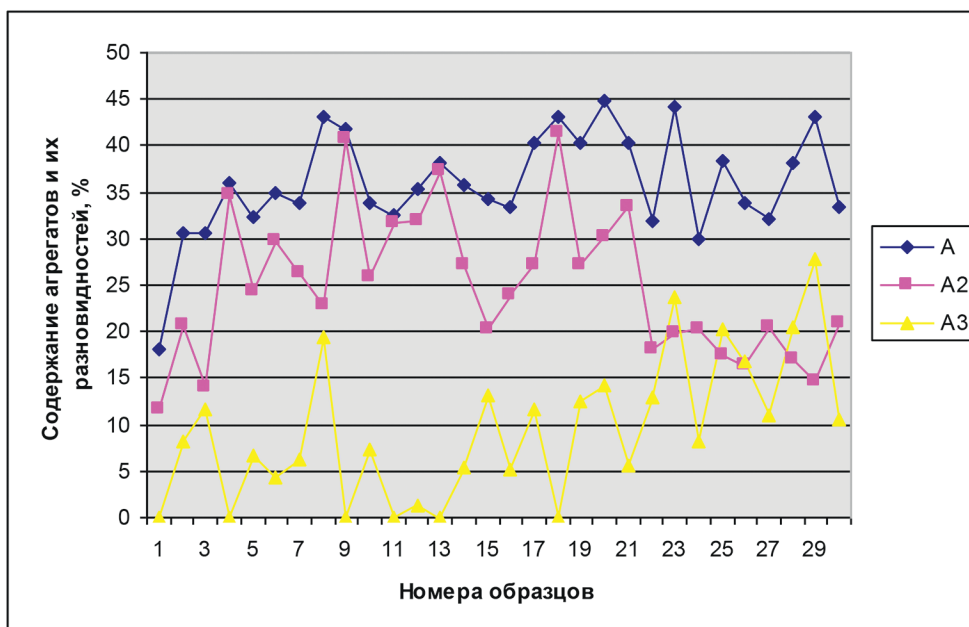


Рис. 1. Распределение агрегатов (A) и их разновидностей (A2, A3) в осадках скв. 49, n — число образцов (30)

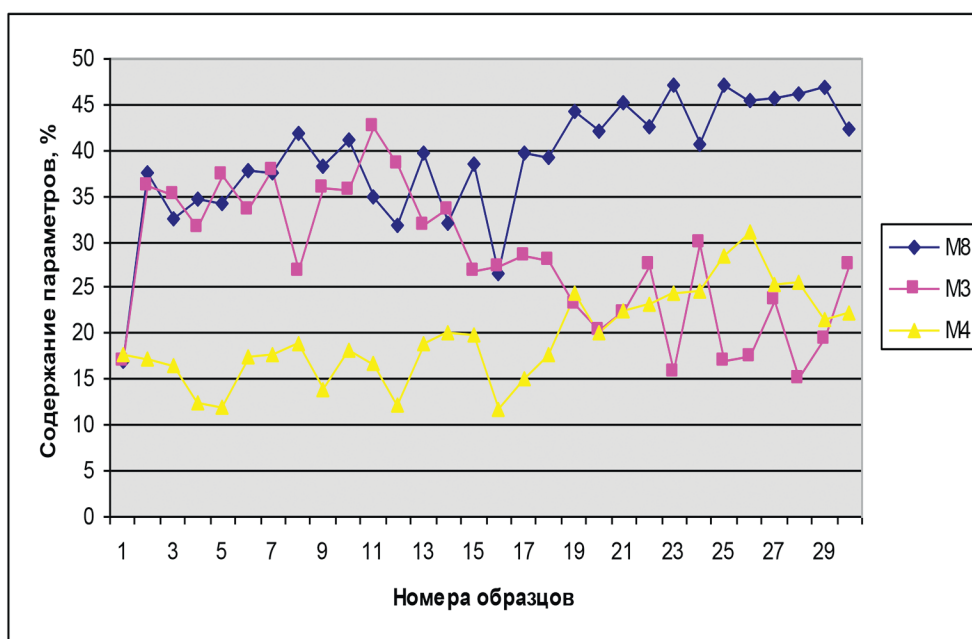


Рис. 2. Распределение первичных пылеватых частиц (M3, M4) и значений реальной глинистости (M8) в осадках скв. 49; n — число образцов ($n = 30$)

номера образцов, которым соответствует глубина их отбора, по горизонтальной — указано евклидово расстояние (r), характеризующее степень близости объектов (образцов) по микроструктурным параметрам. В первом варианте при использовании A, A2, A3 на диаграмме зафиксированы две группы: первая включает 13 образцов, девять из них отобраны в нижней зоне (21–30 м), вторая — 16, все они соответствуют средней зоне (4–21 м); группы между собой связаны слабо ($r = 0,54$); обособленное место занимает образец с глубины 1 м —

уровень его сходства с другими объектами толщи весьма незначителен ($r = 0,80$) (рис. 3). Во втором варианте группирование выполнено по M3, M4, M8, при этом результат получился аналогичным.

Следовательно, группирование образцов по параметрам микроструктуры подтвердило выделение среднего и нижнего интервалов (зон) в толще осадков.

Микроструктура воздушно-сухих образцов (РЭМ-изображения). Впервые полученные РЭМ-изображения микроструктуры воздушно-сухих образцов

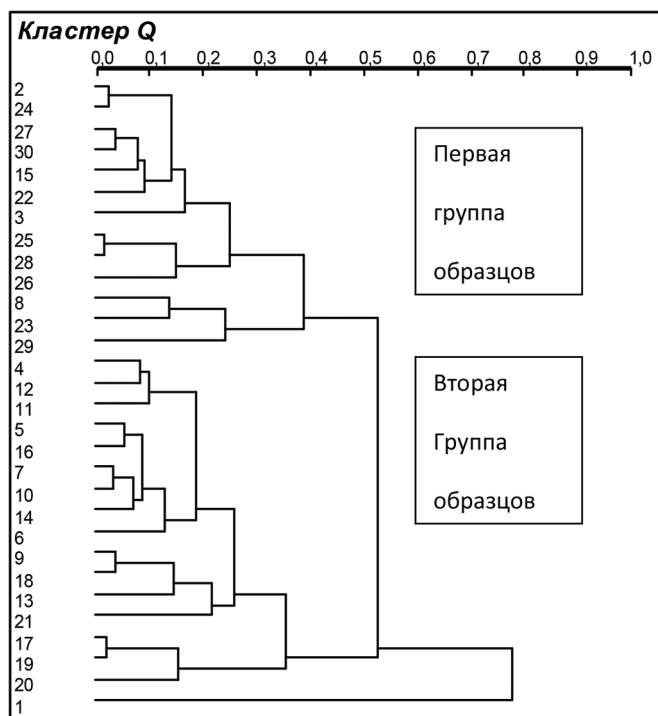


Рис. 3. Группирование образцов скв. 49 по общему содержанию агрегатов (А) и их разновидностей (А2, А3); вертикальная ось — номера образцов и соответствующая им глубина отбора, м; горизонтальная — евклидово расстояние, отражающее степень близости образцов по микроструктурным параметрам ($n = 30$, m — число признаков, равное 3)

глинистых осадков шельфа Охотского моря на участке Южно-Кириного месторождения углеводородов (скв. 49) являются своеобразной «микрокартиной» строения. Это качественные, без какой-либо количественной оценки фотографии, на

которых можно увидеть остатки фауны, различной формы частицы и агрегаты, микропоры.

Для осадков верхнего интервала (обр. 49—0,1 м) характерны многочисленные включения остатков фауны, крупные угловатые частицы и хлопьевидные агрегаты (рис. 4). В глинах среднего интервала (обр. 49—8,0 м) частицы и агрегаты образуют своеобразную «черепитчатую поверхность», на фоне которой располагаются «микропоры-провалы» (рис. 5). В глинах нижнего интервала (обр. 49—26 м) отсутствуют крупные включения фауны, но видны многочисленные игольчатые формы; агрегаты имеют пластинчатое строение (рис. 6).

Минеральный состав определен методом порошковой дифракции для семи образцов, которые являются представителями верхнего, среднего и нижнего интервалов разреза. Содержание кварца, полевых шпатов и глинистой составляющей (фазовый состав образца) получены с приближением $\pm 5\%$; представлен минеральный состав глинистой ($<0,002$ мм) фракции (глинистая фаза) (табл. 2).

Установлено, что с глубиной уменьшается содержание кварца и увеличивается количество глинистой фракции, в составе которой преобладает гидрослюда. Для верхнего интервала типичен полиминеральный состав глинистой фазы (гидрослюда, смектит, хлорит, каолинит, смешанослойные минералы), для нижней — преобладание гидрослюда и смектита несовершенной структуры; в средней зоне отмечен хлорит. Особенностью разреза является почти полное отсутствие каолинита — встречается только в виде следов за исключением верхнего интервала толщи.

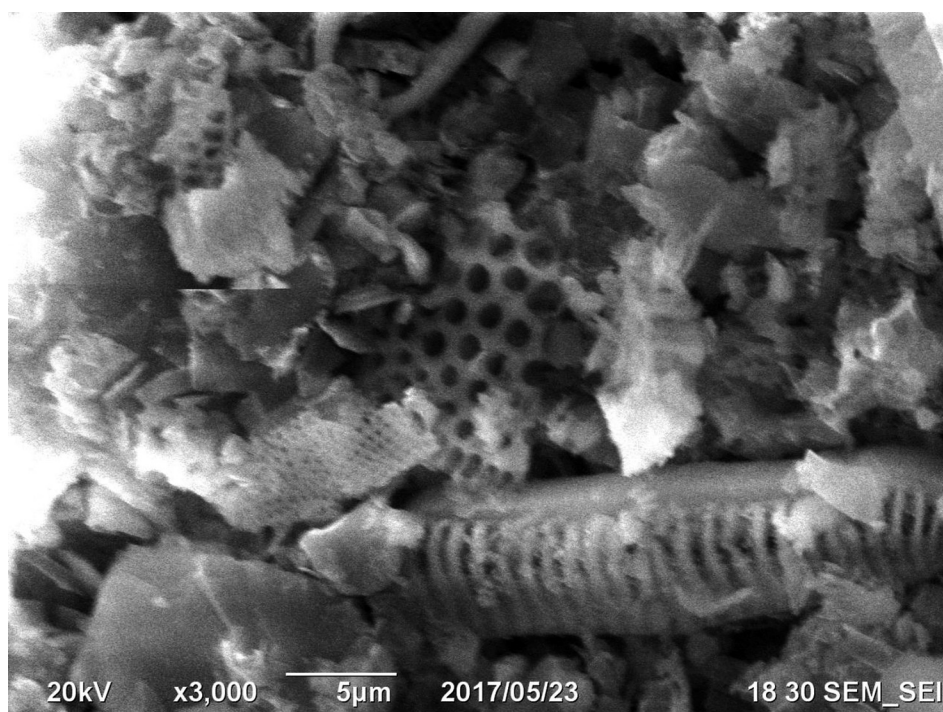


Рис. 4. РЭМ-изображение микроструктуры воздушно-сухого образца из верхнего интервала разреза скв. 49 (обр. 49—0,1 м).

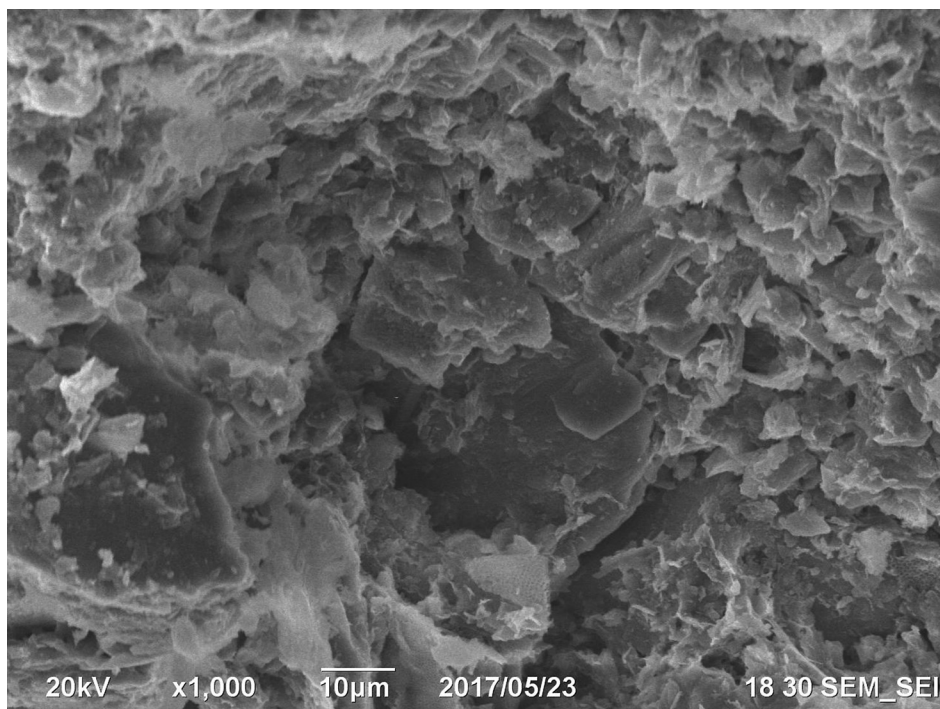


Рис. 5. РЭМ-изображение микроструктуры воздушно-сухого образца из среднего интервала разреза скв. 49 (обр. 49–8,0 м)

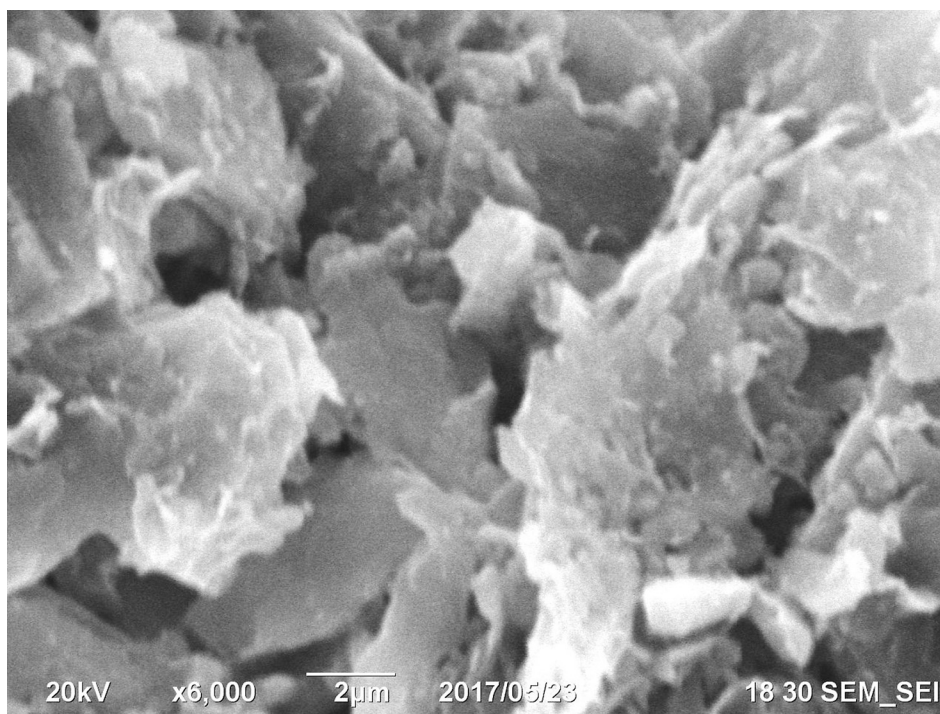


Рис. 6. РЭМ-изображение микроструктуры воздушно-сухого образца из нижнего интервала разреза скв. 49 (обр. 49–26,0 м)

Данные о минеральном составе глинистых осадков шельфа Охотского моря на участке Южно-Киринского месторождения углеводородов (скв. 49), равно как и материалы о параметрах микроструктуры, показали, что изученная 30-метровая толща

характеризуется закономерными зональными изменениями.

Химический состав. Содержание основных породообразующих оксидов определено для 10 образцов; проведена статистическая обработка данных

(табл. 3). Содержание MnO постоянно находится в пределах 0,03—0,04 %, P_2O_5 — 0,10—0,14 %, поэтому в расчёты эти оксиды не включались. При статистической обработке данных характер распределения (изменчивости) по разрезу толщи определя-

ется величиной коэффициента вариации (V , %). Наиболее однородное распределение отмечено для оксидов кремния, алюминия и калия (V 1—3), повышение изменчивости (увеличение коэффициента вариации) зафиксировано для Fe_2O_3 (V 12).

Таблица 2

Результаты определения минерального состава осадков шельфа (скв. 49, $n = 7$)

ОБ	Фазовый состав, %			Состав глинистых минералов
	Кварц	Полевые шпаты	Глинистая фракция	
1	40	46	14	Гс, С, Х, К, Гс-С
5	42	42	16	Гс, Х, Гс-С, следы С, К
10	31	52	7	Гс, следы С, Х, К
15	38	48	14	Гс, С, Х
20	32	40	28	Гс, С, Х, Гс-С
25	35	45	30	Гс, С, следы Х, К
29	13	57	30	Гс, С, Х, следы К, Гс-С

Примечание. ОБ — номер образца и соответствующая номеру глубина отбора, м; глинистые минералы: Гс — гидрослюда, С — смектит, Х — хлорит, К — каолинит, Гс-С — смешанослойные минералы.

Таблица 3

Результаты статистической обработки данных химического состава осадков шельфа (скв. 49; $n=10$)

П	Основные породообразующие оксиды, масс. %									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	ппп	H_2O^+
$\bar{X}$	58,51	17,14	4,87	1,79	1,00	3,44	3,11	0,69	6,62	1,34
X_{min}	56,74	16,85	4,09	1,53	0,89	3,07	3,04	0,65	3,37	1,14
X_{max}	60,21	17,74	5,97	2,04	1,16	3,87	3,18	0,73	8,03	1,78
σ	1,66	0,23	0,61	0,15	0,07	0,24	0,04	0,03	1,34	0,32
V , %	3	1	12	8	8	7	1	4	20	24

Таблица 4

Результаты статистической обработки данных о величине геохимических коэффициентов осадков шельфа (скв. 49; $n=10$)

П	Геохимические коэффициенты					
	Ki	Kz	BA	Kk	Kh	ICV
$\bar{X}$	3,41	4,98	0,44	0,55	0,90	0,87
X_{min}	3,27	4,46	0,42	0,45	0,81	0,80
X_{max}	3,54	5,54	0,46	0,76	1,03	0,94
σ	0,109	0,358	0,013	0,090	0,072	0,054
V , %	3	7	3	16	8	6

Таблица 5

Результаты статистической обработки данных о содержании токсичных микроэлементов в осадках шельфа (скв. 49; $n=28$)

П	Микроэлементы, г/т								Zc
	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	As	
$\bar{X}$	105	65	11	31	27	89	24	7	17
X_{min}	94	59	8	23	15	63	19	6	13
X_{max}	124	73	14	39	36	112	28	10	21
σ	9,82	4,25	1,57	4,92	3,85	15,68	1,80	0,98	2,14
V , %	9	7	14	16	14	18	7	13	13

Примечание. Zc — показатель загрязнения [7].

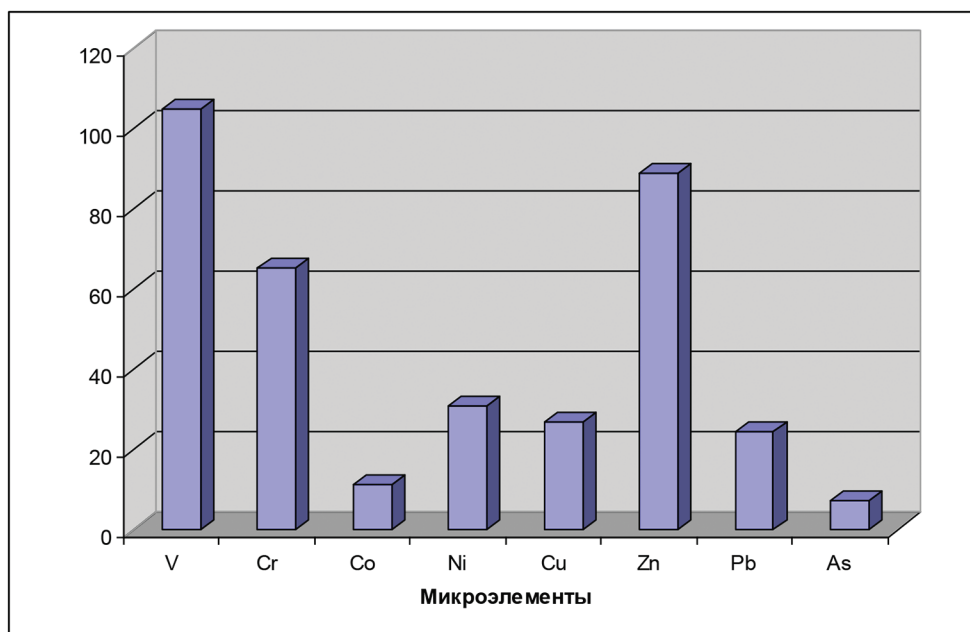


Рис. 7. Содержание токсичных элементов в осадках шельфа; вертикальная ось — средние значения (ppm) по разрезу скв. 49

Относительно разнородное распределение свойственно органике (ппп) и H_2O^- (V 20—24). Анализ данных по интервалам разреза выявил следующие особенности: для верхней части (образцы № 3, 4) характерно повышенное содержание SiO_2 (59,64—60,16 %) и пониженное Fe_2O_3 (4,09—4,19 %); в нижней части толщи (образцы № 21, 23, 27) наблюдаются обратные соотношения — содержание оксида кремния уменьшается (56,40—56,86 %), но увеличивается количество Fe_2O_3 (5,32—5,97 %).

Рассчитаны геохимические коэффициенты: $Ki=SiO_2/Al_2O_3$; $Kz=Al_2O_3/Na_2O$; $BA=[CaO+K_2O+Na_2O]/Al_2O_3$; $Kk=CaO/MgO$; $Kh=K_2O/Na_2O$; $ICV=[Fe_2O_3+K_2O+Na_2O+CaO+MgO+TiO_2]/Al_2O_3$; проведена статистическая обработка данных (табл. 4). Изменчивость этих коэффициентов по разрезу слабая (V 3—8), заметные изменения характерны для соотношения оксидов кальция и магния (V 16). Наиболее информативен коэффициент (модуль) ICV , который отражает степень химической зрелости отложений [2]. В нашем случае $ICV < 1$ (0,80—0,94), следовательно, осадки, вскрытые скв.

49 и содержащие глинистую фракцию преимущественно гидрослюдистого состава, можно отнести к группе разновидностей средней степени химической зрелости.

Микроэлементный состав. Содержание 23 микроэлементов в осадках определено для 28 образцов. В группе токсичных компонентов, к числу которых относятся V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, As [8], проведена статистическая обработка данных и рассчитан специальный показатель Zc (табл. 5). Преобладающими (средние значения) в токсичной группе оказались ванадий, цинк и хром (рис. 7). Наиболее однородное распределение в вертикальном разрезе отмечено для хрома, свинца и ванадия (V 7—9).

Показатель Zc позволяет оценить степень загрязнения осадков шельфа. Выделяются следующие уровни экологической ситуации: удовлетворительный ($Zc < 16$), критический (16—32), чрезвычайный (32—128) и катастрофический (> 128) [4, 12]. По величине среднего (17) и максимального (21) значений показателя (Zc) толща осадков имеет критический уровень загрязнения.

Таблица 6

Коэффициенты концентрации токсичных микроэлементов в осадках шельфа (скв. 49, $n = 28$)

П	Микроэлементы															
	V		Zn		Cr		Ni		Cu		Pb		Co		As	
	Хср	max	Хср	max	Хср	max	Хср	max	Хср	max	Хср	max	Хср	max	Хср	max
С	105	124	89	112	65	73	31	39	27	36	24	28	24	28	7	10
Сkl	90		83		83		58		47		16		18		1,7	
Кс	1,17	1,38	1,10	1,35	0,78	0,88	0,53	0,67	0,57	0,77	1,50	1,75	1,50	1,75	4,12	5,88

Примечание. С — содержание микроэлемента (среднее и максимальное значения, ppm); Сkl — кларк по А. П. Виноградову (г/т); Кс — коэффициент концентрации (С/Сkl).

Для той же группы токсичных микроэлементов рассчитан коэффициент концентрации (Кс), представляющий отношение содержания (среднего или максимального) компонента к величине его кларка (по А.П. Виноградову) (табл. 6). Установлено, остальные микроэлементы отличаются пониженной концентрацией ($K_c < 1$).

Группа преобладающих микроэлементов (содержание >100 ppm) включает Ba, Sr, Zr, Rb (103—626 ppm), второстепенных (< 50 г/т) — La, Ce, Nd, Nb, U, Y, Ga, Sn, в числе которых радиоактивные уран и торий, соответственно содержания составляют 3,1—5,2 и 10—12 г/т. Кроме того, осадки шельфа обогащены серой и хлором (2182—11791 г/т).

Выводы

На основе количественных данных о содержании микроструктурных параметров (метод «Микроструктура») в глинистых осадках шельфа (скв. 49) по количеству агрегатов установлен скелетно-агрегированный тип микроструктуры; характер распределения параметров в вертикальном разрезе 30-метровой толщи показал уменьшение тонко-мелкопесчаных агрегатов за счёт крупнопылеватых, возрастание реального содержания фракции $<0,002$ мм и увеличение содержания первичных мелкопылеватых частиц за счёт крупнопылеватых.

Выделение по визуальным признакам верхнего, среднего и нижнего интервалов в разрезе скв. 49 подтвердилось данными группирования образцов

(кластерный анализ Q-типа) по микроструктурным параметрам; РЭМ-изображения микроструктуры осадков указанных интервалов также отличаются по количеству остатков фауны, форме частиц и агрегатов.

Минеральный состав осадков характеризуется присутствием трёх компонентов — кварц, полевые шпаты (плагноклаз + калиевые полевые шпаты) и глинистая фаза ($<0,002$ мм), представленная преимущественно гидрослюдами; для нижнего интервала толщи среди глинистых минералов отмечена примесь смектита, каолинит практически отсутствует.

Химический состав осадков шельфа достаточно однороден (изменчивость содержаний основных оксидов по разрезу характеризуется коэффициентом вариации $< 10\%$), к числу особенностей можно отнести более высокую изменчивость в содержании общего железа, а также органики (ппп) и гигроскопичности (H_2O^-); по величине геохимического коэффициента (модуля) ICV (<1) исследованные осадки можно отнести к группе разновидностей средней степени химической зрелости.

При изучении микроэлементного состава осадков скв.49 определено содержание (г/т) 23 компонентов; по группе токсичных компонентов при расчёте специального показателя (Zc) установлен критический уровень загрязнения толщи; повышенные (>1) коэффициенты концентрации (Кс) имеют ванадий, цинк, свинец и кобальт; особенно высок этот коэффициент для мышьяка — 4,12—5,88.

ЛИТЕРАТУРА

- Ефрекин И.М., Снопина Е.М., Холмянский М.А. Комплексный мониторинг районов освоения морских месторождений полезных ископаемых // Сергеевские чтения. Вып. 19. М.: Изд-во РУДН, 2017. С. 297—302.
- Интерпретация геохимических данных / Е.В. Складов, Д.П. Гладкочук, Т.В. Донская и др. М.: Интермет Инженеринг, 2001. 288 с.
- Коллектив участников проекта «Байкал-Бурение». Высоко-разрешающая осадочная запись по ядру глубоководного бурения на Посольской банке в озере Байкал (ВДР-99) // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 2. С. 163—193.
- Критерии оценки экологической обстановки территории для выявления зон экологической ситуации и зон экологического бедствия. М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации, 1992.
- Лёссовые грунты Монголо-Сибирского региона / Т.Г. Рященко, В.В. Акулова, Н.Н. Ухова, С.И. Штельмах, Н.Н. Гринь. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2014. 241 с.
- Мищенко А.В., Иванов Г.И. Оценка качества донных осадков центральной глубоководной части Баренцева моря (Штокмановское газоконденсатное месторождение) // Сергеевские чтения. Вып. 19. М.: Изд-во РУДН, 2017. С. 317—322.
- Порядин А.Ф., Хованский А.Д. Оценка и регулирование качества окружающей природной среды. М: Издательский дом «Прибой», 1996. 350 с.
- Ревенко А.Г. Физические и химические методы исследования горных пород и минералов в Аналитическом центре ИЗК СО РАН // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5 (1). С.101—114.
- Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. 287 с.
- Рященко Т.Г., Ухова Н.Н. Химический состав дисперсных грунтов: возможности и прогнозы (Восточная Сибирь). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2008. 131 с.
- Рященко Т.Г., Штельмах С.И., Вологина Е.Г. Микроэлементный состав донных осадков озера Байкал (район Академического хребта) // Отечественная геология. 2017. № 2. С. 59—67.
- Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. Геохимия окружающей среды. М: Недра, 1990. 335 с.
- Hubbard C.R., Snuder R.I. RIR — Measurement and Use in Quantitative XRD // Powder Diffraction.1988. V. 3. P. 74—77.

REFERENCES

- Efremkin I.M., Snopova E.M., Kholmyanskiy M.A. *Integrated monitoring of development areas of offshore mineral deposits. Sergeyev readings*. 19 Issue. Moscow: Russian University of Peoples Friendship, 2017, pp. 297—302. (In Russian).
- Interpretation of geochemical data*. E.V. Sklyarov, D.P. Gladkochub, T.V. Donskaya et al. Moscow, Intermet Engineering Publ., 2001, 288 p. (In Russian)
- Collective of participants of the project «Baikal-Drilling». High-resolution sedimentary record by core of deepwater drilling (underwater mountain uplift) in lake Baikal (VDR-99). *Geology and Geophysics*, 2004, vol. 45, no. 2, pp. 163—193. (In Russian).
- Criteria for assessing of the ecological setting of territory for identification the areas of the ecological situation and environmental emergency zones*. Moscow, Ministry for the Protection of the

- Environment and Natural Resources of the Russian Federation, 1992. (In Russian).
5. *Loessial soils of the Mongolian-Siberian region*. T.G. Ryashchenko, V.V. Akulova, N.N. Ukhova, S.I. Shtel'makh, N.N. Grin'. Irkutsk, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 2014, 241 p. (In Russian).
 6. Mishchenko A.V., Ivanov G.I. Qualitative assessment of bottom sediments of the central deepwater part of the Barents Sea (The Shtokman gas and condensate field). *Sergeyev readings, 19 Issue*. Moscow, Russian University of Peoples Friendship, 2017, pp. 317–322. (In Russian).
 7. Poryadin A.F., Khovanskiy A.D. *Assessment and natural environment quality regulation*. Moscow, Publishing House «Priboy», 1996, 350 p. (In Russian).
 8. Revenko A.G. Physical and chemical research methods of rocks and minerals in the Analytical Center of the Institute of the Earth's Crust, SB RAS. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2014, vol. 5, no. 1, pp. 101–114.
 9. Ryashchenko T.G. *Regional soil science (Eastern Siberia)*, Irkutsk, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 2010, 287 p. (In Russian).
 10. Ryashchenko T.G., Ukhova N.N. *Chemical composition of dispersive soils: possibilities and forecasts (Eastern Siberia)*, Irkutsk, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 2008, 131 p. (In Russian).
 11. Ryashchenko T.G., Shtel'makh S.I., Vologina E.G. Microelemental composition of bottom sediments of the Baikal lake (the Academic ridge area). *Domestic geology*, 2017, no. 2, pp. 59–67. (In Russian).
 12. Sayet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geochemistry of the environment*. Moscow, Nedra Publ., 1990, 335 p. (In Russian).
 13. Hubbard C.R., Snuder R.I. RIR – Measurement and Use in Quantitative XRF. *Powder Diffraction*, 1988, v. 3, pp. 74–77.

УДК 553.494(234.83):[543.429.3+543.429.22+548.75]

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МАГНИТНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ТИТАНОВЫХ РУД ПИЖЕМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ПОЗИЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

В.П. ЛЮТОЕВ¹, А.Б. МАКЕЕВ²

¹Институт геологии Коми НЦ УрО РАН (им. Академика Н.П.Юшкина)
54, Первомайская ул., Сыктывкар 167982, Россия
e-mail: vlutoev@geo.komisc.ru

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
35, Старомонетный пер., Москва 119017, Россия
e-mail: abmakeev@igem.ru

Исследованы четыре магнитные фракции из мелких классов (0,05–0,125 мм) концентратов представительной технологической пробы, выделенные из пижемских титаноносных песчаников средней толщи малоручейской свиты: общая проба (Т-2) и три частные (Т-1 а, б, в), полученные из неё методом гравитационного разделения в тяжелой жидкости в три плотностных интервала (3,3–3,5; 3,5–3,7; 3,7–3,9 г/см³). Показано, что магнитная фракция мелких продуктивных классов состоит в основном из псевдорутила, ильменита, сидерита и граната. С помощью нормативного пересчёта данных химических анализов, а также методов Мёссбауэровской спектроскопии, инфракрасного (ИК) поглощения и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), достоверно установлен фазовый состав железо-титановых фаз. Рассчитано соотношение псевдорутила, ильменита, сидерита и сопутствующих редких и редкоземельных минералов — монацита-куларита и циркона, накапливающихся в соответствующих гравитационных классах. Рекомендуется применение операций доводки концентратов (извлечение циркона и монацита) до операции обескремнивания, а также их очистки от сидерита.

К л ю ч е в ы е с л о в а: Пижемское титановое месторождение; гравитационные концентраты; Мёссбауэровская спектроскопия; инфракрасное (ИК) поглощение; электронный парамагнитный резонанс (ЭПР); рентгеноструктурный фазовый анализ.

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF THE MAGNETIC CONCENTRATES OF THE TITANIUM ORES AT PIZHEMSKY DEPOSIT FROM THE POINT OF VIEW OF THE TECHNOLOGICAL MINERALOGY

V.P. LYUTOEV¹, A.B. MAKEYEV²

¹*Institute of Geology of the Komi Science Center of the Ural Branch RAS (IG KOMI SC UB RAS)
54, Pervomajskaja st., Syktyvkar 167982, Russia
e-mail: vlutoev@geo.komisc.ru*

²*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (IGEM RAS)
35, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia
e-mail: abmakeev@igem.ru*

Four magnetic fractions of small classes concentrates (0,05–0,125 mm) of a representative technological sample have been separated from titanium-bearing medium thickness sandstones of Malorucheysky unit (Pizhensky titanium deposit). They have been studied: general sample (T-2) and three partial (T-1 a, b, c) ones obtained by gravitational separation in heavy liquid in three density intervals (3,3–3,5; 3,5–3,7; 3,7–3,9 g/cm³). It has been demonstrated that the magnetic fraction of the small productive classes consists mainly of pseudorutile, ilmenite, siderite (ironstone) and garnet. The phase composition of iron-titanium phases has been reliably established by the means of normative recalculation of chemical analysis data, as well as methods of Mossbauer spectroscopy, infrared (IR) absorption and electron paramagnetic resonance (EPR). The ratio of the pseudorutile, ilmenite, siderite and associated rare earth minerals monazite-kularite and zircon accumulated in the respective gravity classes, has been computed. It has been recommended to use the methods of recovery of the concentrates (extraction of zircon and monazite) before the operation of desilication, as well as their purification from siderite.

К е у в о р д s: Pizhensky titanium deposit; gravity concentrates; Mössbauer spectroscopy; infrared (IR) absorption; electron paramagnetic resonance (EPR); x-ray phase analysis.

Представляемое исследование продолжает проведенное ранее изучение в части технологической минералогии [4, 6] и направлено на улучшение показателей обогащения титановых руд Пижемского месторождения (Средний Тиман). Эти исследования выполняются в интересах технологии обескремнивания лейкоксена и псевдорутила для получения товарного промышленного продукта искусственного рутила и направлены на получение наиболее достоверных сведений о фазовом составе магнитной железо-титановой фракции выделенной из коллективного концентрата. Титановые фазы и минералы Пижемского месторождения являются нестандартными (в отличие от стандартных рутила и ильменита) и не могут напрямую использоваться в технологическом переделе (методом хлорирования), поскольку содержат большое количество сингенетичных включений кварца (рис. 1). Поэтому лейкоксен, содержащий 18–33% SiO₂, и псевдорutile, содержащий 9–18% SiO₂, должны пройти предварительную химическую автоклавную стадию обескремнивания [4]. Схема получения коллективных концентратов титановых минералов из пижемских руд включала: дробление, оттирку, обесшламливание, гравитационное обогащение, классификацию и магнитную сепарацию. При этом лейкоксен, циркон и вторичный рутил накапливаются в немагнитной фракции, а ильменит, Fe-рутил, псевдорutile, сидерит, монацит-куларит и некоторые другие — в электромагнитной фракции. Чистота отделения минералов во фракции должна контролироваться во избежание потери ценных компонентов.

Цель данной работы — определение фазового состава концентратов пижемских титановых руд узких гравитационных классов с использованием комплекса методов: химического рентгенофлуоресцентного и рентгеноструктурного фазового анализа, Мёссбауэровской спектроскопии, инфракрасного поглощения и электронного парамагнитного резонанса, ранее успешно примененных для аналогичных исследований как ильменит-лейкоксеновых, так и массивных титано-магнетитовых руд различного генезиса [2, 3, 6, 15].

Объект исследования

С целью изучения гравитационных свойств и химического состава рудных и аксессуарных минералов технологической пробы средней пачки малоручейской свиты в сероцветных титаноносных песчаниках (отобранной из керна 170 рядовых проб 21 разведочной скважины, общим весом 250 кг) коллективный концентрат пробы был разделён на центрифуге по плотностным свойствам в тяжёлой жидкости на 9 гравитационных фракций через интервал 0,2 (от 2,7 до 4,3 и > 4,3 г/см³). Каждая полученная гравитационная фракция разделялась по магнитным свойствам ручным магнитом МРМ-1 на: 1) сильно электромагнитную (ЭМ), 2) слабо электромагнитную (СЭМ), 3) немагнитную фракции (НМ). Всего по пробе было получено 30 фракций. Из каждой полученной фракции отбирались по 20–25 представительных зёрен, которые запрессовывались в брикеты и изучались в МГУ при по-

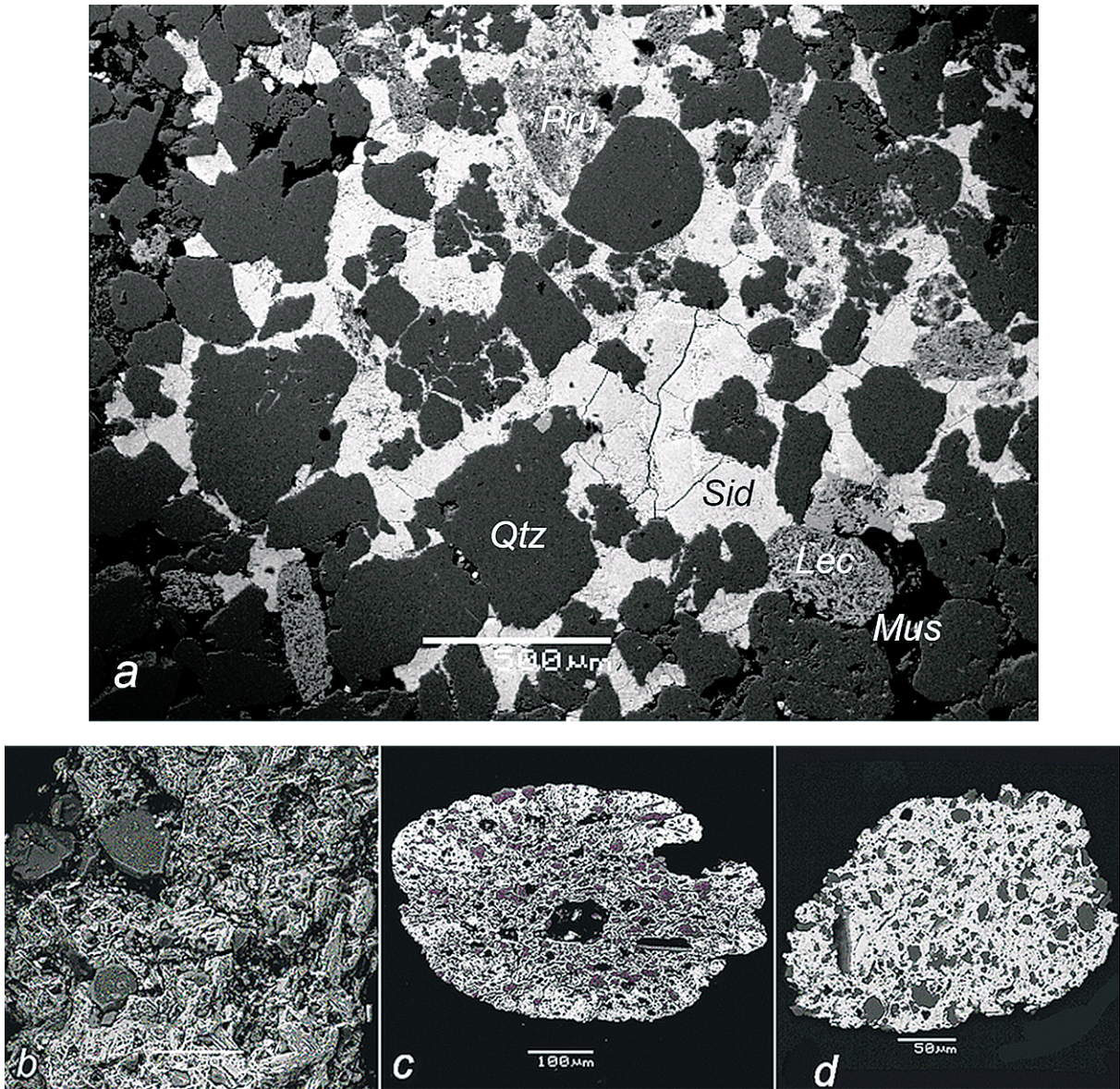


Рис. 1. ЭМ изображения титановой руды (a) и отдельных фаз (b-d) из коллективных концентратов пижемских руд. b – лейкоксен (двухфазная фаза, состоящая из сагенитовой решетки рутила и многочисленных зерен и кристаллов кварца), c – псевдорутил, d – монацит-куларит. Все три фазы содержат многочисленные включения кварца и мусковита (тёмно-серые и черные выделения). Qtz – кварц, Sdr – сидерит, Mus – мусковит, Lec – лейкоксен, Pru – псевдорутил

Таблица 1

Минералогическая характеристика объектов исследования

Проба	Фракция			Выход ЭМ фракции, %
	ЭМ	СЭМ	НЭМ	
Т-1а 3,3–3,5	Псевдорутил (23)	Псевдорутил (28), Лейкоксен (1)	Лейкоксен (26)	18,6
Т-1б 3,5–3,7	Псевдорутил (30), Сидерит (2)	Пирит (1)	Лейкоксен (11), Рутил (12)	21,4
Т-1с 3,7–3,9	Псевдорутил (33), Ильменит (8), Монацит-куларит (19)	Псевдорутил (2), Герцинит (15), Fe-рутил (5)	Лейкоксен (26), Рутил (3), Циркон (5)	15,4
Т-2	Псевдорутил (20), Ильменит 3, Гранат (1)	Монацит-куларит (4)	Халькопирит (1), Сфалерит (1)	55,4

Примечание. В скобках — количество микрозондовых анализов.

мощи сканирующего электронного микроскопа «Jeol JSM-6480LV». Результаты микрозондовых химических анализов минералов опубликованы [4].

В процессе детальных исследований (более 700 микрозондовых анализов зёрен из всех фракций, 150 ЭМ в BSE изображений) диагностировано более 25 минеральных фаз, подробно изучена морфология зёрен, внутреннее строение и химический состав: ильменит, пикроильменит, рутил, Fe-рутил (нигрин), псевдорутит, Nb-рутил (ильменорутит), Ta-Nb-рутил (стрюверит), лейкоксен, монацит, куларит, ксенотим, флоренсит, хромит, алюмохромит, хромпикотит, герцинит, турмалин (шерл, дравит), амфиболы (5 разновидностей — чермакит, феррочермакит, феррочермакитовая роговая обманка, железистая роговая обманка и магнезиальная роговая обманка), гранат (ряда кноррингит—пироп—мейджорит—альмандин), слюда ФАСИ (ряда флогопит—аннит—сидерофиллит—истонит), ферросилит. Ранее в ИГЕМ РАН с использованием петрографических, минералогических и микрозондовых (энергодисперсионный электронный микроскоп JSM-5610LV) исследований в пижемских титановых рудах диагностированы более 17 минералов: кварц, каолинит, мусковит-серицит, гранат (гроссуляр-альмандин), пирит, халькопирит, арсенипирит, сфалерит, колумбит, сидерит, циркон, рутил, гематит, гетит, апатит, муассанит (SiC), золото, самородное железо. Таким образом, диагностировано и охарактеризовано более 40 минералов и их разновидностей.

Среди них присутствуют надёжные минералы-спутники алмаза: пикроильменит, кноррингит—пироп—мейджорит—альмандин, высокохромистый хромит, муассанит (SiC), ферросилиций (FeSi).

Часть аксессуарных минералов титановых руд Пижемского месторождения по типохимическим особенностям совпадают с пороодообразующими и аксессуарными минералами лампрофиров Четласского камня [4, 5]. К таким индикаторным минералам относятся: Mn-ильменит, Nb-рутил, монацит, хромит, герцинит, турмалин, амфиболы, гранат (кноррингит—пироп—мейджорит—альмандин), слюда ФАСИ, апатит и др. Этот факт указывает на то, что лампрофиры, подобные четласским, могли быть одним из коренных источников титановых руд Пижемского месторождения.

Конкретным объектом для количественного минералогического анализа железо-титановых фаз выбраны четыре фракции, которые в дальнейшем будут подвергаться обескремниванию для получения товарного продукта: общая проба (Т-2), отделённая с помощью электромагнита от коллективного концентрата и классифицированная до размерности 0,125—0,05 мм для исключения влияния сростков с кварцем, и три частные (Т-1 а, б, с), полученные из общей (методом гравитационного разделения на центрифуге в тяжёлой жидкости) на

три плотностных интервала (3,3—3,5; 3,5—3,7; 3,7—3,9 г/см³). Минералогическая характеристика этих проб представлена в табл. 1. Как показали результаты проведенных исследований, эти фракции были разделены не достаточно чисто.

Аппаратура, методы

Спектроскопическое изучение проб выполнено на оборудовании ЦКП «Геонаука» ИГ Коми НЦ УрО РАН. Химический состав определён в ИГЕМ РАН количественным рентгенофлуоресцентным методом (РФХА) с учётом потерь на прокаливании с помощью рентгенофлуоресцентного вакуумного спектрометра последовательного действия (с дисперсией по длине волны), модель Axios mAX Advanced, производства компании PANalytical (Нидерланды). Качественная оценка фазового состава проб проведена методом ИК-спектроскопии и рентгеновского фазового анализа (РФА). Инфракрасные спектры в диапазоне 400—4000 см⁻¹ были получены на Фурье-спектрометре ИК-поглощения Люмекс ФТ-02. Препараты готовились в виде пресованных таблеток (0,8 г KBr и 1,7 мг растёртого образца). РФА выполнено в порошках с помощью дифрактометра Shimadzu XRD-6000 (CuK α , 30 мА, 30 кВ, Ni-фильтр, шаг сканирования 2 θ 0,05°, 1 град/мин.). Для уточнения диагностики минеральных фаз концентрата Т-1с отдельные зёрна проанализированы с помощью рамановской спектроскопии. Диагностические спектры этих минеральных зёрен были получены на высокоразрешающем рамановском спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon) с возбуждающим Ar⁺-лазером (515 нм).

Мёссбауэровские (ЯГР) спектры записывались в режиме тонкого поглотителя на спектрометре MS-1104Em в диапазоне скоростей -11 ÷ +11 и -4 ÷ +4 мм/с с разрешением в 1024 канала при комнатной температуре препарата. Для устранения в спектрах эффектов текстурирования образца готовились в виде сильно истертых в порошок препаратов. Изомерный сдвиг определялся относительно α -Fe. При обработке спектров использовалось стандартное программное обеспечение спектрометра «Univem».

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) проб изучался методом порошков (навеска около 100 мг) на радиоспектрометре X-диапазона SE/X-2547 («RadioPAN», Польша). Регистрация спектров производилась при комнатной температуре в виде первой производной на частоте ВЧ модуляции 100 МГц с амплитудой 0,1 мТ и мощности СВЧ поля 7 мВт. Калибровка g-факторов была произведена по стандартному образцу ДФПГ. Предварительно пробы были дополнительно измельчены в яшмовой ступке для получения изотропного характера спектральной кривой, т. е. неизменности

спектра при вращении и встряхивании ампулы с образцом. При моделировании спектров порошков использован пакет программирования EasySpin для MathLab [19].

Микронзондовые исследования химического состава минералов проводились в МГУ при помощи сканирующего электронного микроскопа «Jeol JSM-6480LV». Для качественной идентификации спектральных линий с близкими энергиями применялся четырёхкристальный волновой дифракционный спектрометр «INCA Wave-500». Анализ осуществлялся широким зондом (с ребром квадрата от 140 до 280 мкм в зависимости от размера зерна), а также в ИГЕМ РАН с использованием энергодисперсионного электронного микроскопа JSM-5610LV, анализ в точке с диаметром зонда 2 мкм.

Результаты

По данным РФХА (табл. 2) все концентраты содержат около 50 мас. % оксида титана. Содержание оксида железа варьирует от 19 до 28 мас.%, максимальное количество в обр. Т-1с (вероятно за счёт большей концентрации ильменита). Данные компоненты формируют оксиды титана (рутил, анатаз) и железистые титанаты (ильменит, псевдорутил). В составе концентратов присутствуют значительные

количества SiO_2 , Al_2O_3 в виде кварца и мусковит-серицита в сростках с оксидами титана и железистыми титанатами. Их содержание падает по мере увеличения плотности концентрата.

Проба Т-1с отличается высоким содержанием ZrO_2 , очевидно, связанного с наличием в концентрате циркона. В концентрате Т-2 обнаружены повышенные содержания ниобия, связанные, очевидно, с Nb-рутилом, а также фосфора, РЗЭ и тория, что свидетельствует о наличии в концентрате монацита и ксенотима. В других концентратах содержание РЗЭ компонентов примерно в два раз ниже. Накопление данных минералов в пробах определяется близкими значениями их плотности к соответствующему плотностному интервалу концентратов $3,3\text{—}3,9 \text{ г/см}^3$. В пробах также обнаружены следы меди и цинка, диагностированные ранее как отдельные зёрна халькопирита и сфалерита. Пересчёт анализов показывает высокое содержание в концентратах примесей (%): мусковит-серицита 5,1—10,4, Nb-рутила — 0,1—0,3, циркона — 0,03—0,56, монацита-куларита — 0,10—0,25, ксенотима — 0,04—0,11, апатита — 0,25—0,52 и др. Средний состав монацита-куларита по данным микронзондовых определений (более 120 анализов) — $(\text{Ce}_{0,44}\text{Nd}_{0,26}\text{La}_{0,15}\text{Pr}_{0,05}\text{Sm}_{0,05}\text{Gd}_{0,02}\text{Eu}_{0,01}\text{Th}_{0,01})\text{PO}_4$, т. е. он относится к церий-неодимовой разновидности [4].

Таблица 2

Химический состав (мас.%) концентратов Тi-руд по данным РФХА

Оксиды	Т-1а	Т-1б	Т-1с	Т-2	Предполагаемые минеральные фазы
SiO_2	16,04	11,38	12,48	18,87	Кварц, силикаты
TiO_2	50,19	51,19	50,46	51,82	Оксиды Ti, Fe-титанаты
Al_2O_3	3,69	3,33	2,47	3,49	Мусковит, каолинит
Fe_2O_3	22,39	27,07	27,89	19,04	Fe-титанаты, сидерит
MnO	1,04	1,23	1,57	1,26	Fe-титанаты, ильменит
MgO	0,22	0,24	0,21	0,27	Хлорит
CaO	0,08	0,08	0,11	0,20	Апатит
K_2O	1,04	0,89	0,63	0,56	Мусковит-серицит
Na_2O	0,08	0,07	0,06	0,05	Силикаты
ZrO_2	0,020	0,023	0,302	0,040	Циркон
P_2O_5	0,05	0,04	0,06	0,18	Монацит, апатит
SO_3	0,12	0,07	0,18	0,02	Флоренсит, пирит
ППП	4,52	4,08	3,21	3,36	Силикаты, сидерит
SrO	0,044	0,037	0,029	0,072	Флоренсит
La_2O_3	0,009	0,024	0,027	0,025	Монацит
Ce_2O_3	0,027	0,067	0,075	0,134	То же
Nd_2O_3	0,019	0,045	0,062	0,092	То же
Pr_2O_3	0,010	0,012	0,013	0,011	То же
ThO_2	0,004	0,005	0,005	0,010	То же
Y_2O_3	0,016	0,016	0,043	0,022	Ксенотим
Nb_2O_5	0,047	0,032	0,027	0,113	Nb-рутил
Cr_2O_3	0,012	0,021	0,031	0,012	Хромит
ZnO	0,010	0,020	0,020	0,090	Сфалерит
CuO	0,012	0,021	0,031	0,010	Халькопирит
Сумма	99,69	99,99	99,99	99,75	

Таблица 3

Интенсивности рефлексов (у. е.) минеральных фаз на дифрактограммах концентратов

Минерал	2θ, град.	hkl	T-1a	T-1b	T-1c	T-2
Рутил	27,5	110	39	21	26	27
Анализ	25,4	101	2,5	8	4	1,5
Псевдорутил	40,8	101	4	5	5	3
Ильменит	32,7	104	5	7	5	34
Кварц	26,7	101	44	30	71	30
Сидерит	32,0	104	13	42	6	Не обн.
Монацит	28,8	120	Не обн.	Не обн.	11	То же
Гранат	34,6	420	То же	То же	2,5	То же
Мусковит	8,86	002	2	1	Не обн.	1

Примечание. у. е. — условные единицы.

Фазовый состав

По данным РФА среди минералов рудных фаз наиболее интенсивные рефлексы дифрактограмм относятся к рутилу (табл. 3). В дополнение к ним присутствуют рефлексы анатаза, особенно интенсивные в пробах Т-1b и Т-1c. Рефлексы ильменита и псевдорутила нечёткие, уширенные, что говорит о низкой упорядоченности данных фаз. Нерудные фазы в основном представлены кварцем и сидеритом, при этом у проб Т-1a, Т-1c, Т-2 наиболее интенсивные рефлексы относятся к кварцу, а у пробы Т-1b — к сидериту (табл. 3). Рефлексы сидерита меньшей интенсивности также обнаружены у проб Т-1a, Т-1c, но не заметны у пробы Т-2. Во всех пробах, кроме Т-1c, присутствуют глинистые минералы. На дифрактограмме пробы Т-1c выделена серия относительно интенсивных рефлексов, соответствующих монациту и следы рефлексов граната. Присутствие многочисленных зёрен граната в концентрате подтверждено рамановской спектроско-

пией. Гранат по данным одного микрозондового анализа определён как альмандин-гроссуляр ($\text{Fe}_{2,05}\text{Ca}_{0,59}\text{Mg}_{0,24}\text{Mn}_{0,12}\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$). Кроме рутила и анатаза, определённых рентгеновским методом, с помощью рамановской спектроскопии в составе этой пробы обнаружены редкие зёрна брукита.

Качественная фазовая рентгеновская диагностика концентратов хорошо согласуется с результатами анализа методом ИК-спектроскопии. Спектры ИК-поглощения всех концентратов содержат очень интенсивную полосу в низкочастотном диапазоне 400—800 см^{-1} , среднечастотную полосу 950—1200 см^{-1} , интенсивность которой почти на порядок ниже, и слабую высокочастотную полосу 1350—1500 см^{-1} (рис. 2). Первая относится к колебаниям Ti—O и Fe—O связей в оксидах титана и в железистых титанатах. Судя по интенсивности данной полосы, все пробы гравитационных концентратов имеют близкое содержание рудных фаз.

Узкие низкоинтенсивные линии, наложенные на данную полосу, относятся к деформационным колебаниям силикатной, карбонатной и, возможно, фосфатной группировок минеральных фаз. Высокочастотное крыло полосы 950—1200 см^{-1} сформировано в основном валентными колебаниями силикатной группировки кварца (1165, 1086 см^{-1}), характерные линии (798, 779, 695, 469 см^{-1}) деформационных колебаний которой хорошо заметны на фоне интенсивных низкочастотных полос колебаний связей Ti—O и Fe—O. Низкочастотное крыло полосы 950—1200 см^{-1} (1034, 1012 см^{-1}) образовано валентными колебаниями силикатной группировки глинистых минералов. Высокочастотная полоса с хорошо выраженным максимумом 1422 см^{-1} относится к валентным колебаниям карбонатной группировки сидерита, её деформационные колебания обуславливают узкие линии 866 и 738 см^{-1} .

Максимальная интенсивность полосы сидерита в соответствии с данными рентгеновской дифракции наблюдалась в ИК-спектре пробы Т-1b, в пробах Т-1a и Т-1c она в 4—5 раз ниже. В спектре пробы Т-2 установлены только следы карбонатной по-

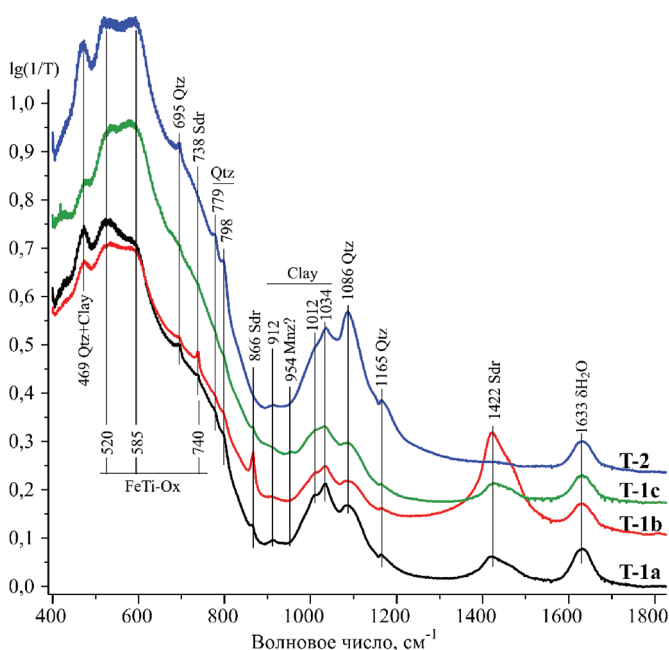


Рис. 2. Спектры ИК-поглощения концентратов. TiFe—Ox — оксиды титана и железистые титанаты, Qtz — кварц, Sdr — сидерит, Clay — глинистые минералы, Mnz — монацит

лосы, в ней зафиксировано максимальное поглощение кварца и глинистых минералов. В ИК-спектре пробы Т-1с присутствует низкоинтенсивная узкая линия 954 см^{-1} , которую можно отнести к Се-Nd-разновидности монацита-куларита. Другие полосы ИК-поглощения куларита в области $1000\text{—}1200$ и $560\text{—}630\text{ см}^{-1}$, вероятно, маскируются в этих диапазонах интенсивными полосами других минеральных фаз.

Распределение железа в концентратах по данным ЭПР и Мёссбауэровской спектроскопии

Спектры ЭПР концентратов в виде первой производной сигнала поглощения СВЧ представлены на рис. 3. Сигналы от ионов Fe^{2+} при комнатной температуре образцов в спектрах ЭПР не проявляются. Главной особенностью спектров является интенсивная широкая полоса, центрованная вблизи g -фактора 2 (табл. 4). Ширина полосы, определённая как расстояние между точками минимума и максимума (ΔB_{pp}), для пробы Т-1с достигает 120 мТ, для остальных проб — около 110 мТ. Центральная часть полосы $g = 2$ в интервале $B_0 - \Delta B_{pp} - B_0 + 1,5\Delta B_{pp}$ (B_0 — резонансное значение магнитного поля в центре линии) хорошо описывается лоренцевой формой. Этот сигнал относится к ионам Fe^{3+} в составе железосодержащих минералов, таких как псевдорутил и, возможно, Fe-рутил [6, 15]. Интегральная интенсивность данной полосы для проб Т-1b и Т-2 примерно в 1,5 раза выше, чем для проб Т-1a и Т-1с.

На низкополевом крыле данной полосы присутствует ряд узких низкоинтенсивных линий. Линии с g -факторами 8,1, 5,6 и 3,4 относятся к изомор-

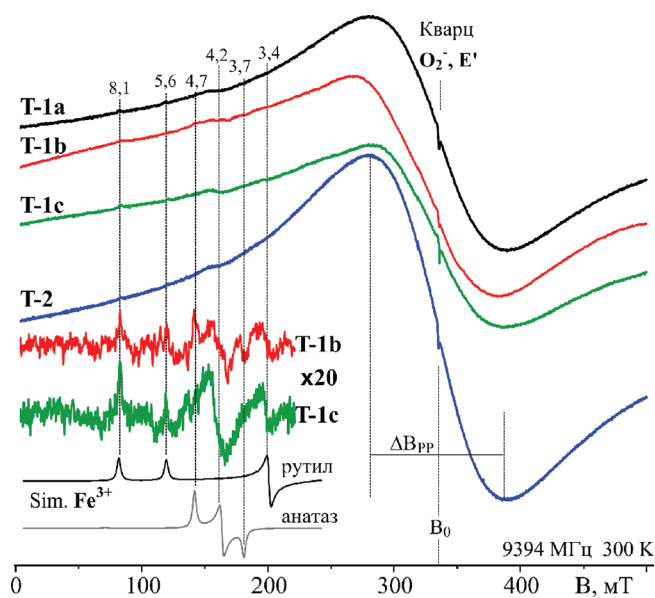


Рис. 3. Спектры ЭПР концентратов. Для проб Т-1b и Т-1с приведены усиленные фрагменты низкополевой части спектра и их сопоставление с расчётными спектрами рутила и анатаза с изоморфной примесью ионов Fe^{3+}

Таблица 4
Интегральные интенсивности (А) линий ЭПР Fe^{3+}

Проба	Псевдорутил			Рутил, $g = 8,1$, у. е.	Анатаз, $g = 4,2$, у. е.
	g	ΔB , мТ	A , у. е.		
Т-1a	2,00	107	2200	3,2	0,5
Т-1b	2,07	120	3000	1,4	0,4
Т-1с	2,02	109	1800	8,2	1,1
Т-2	2,01	108	3300	3,2	0,8

фной примеси Fe^{3+} в структуре рутила, а линии с $g = 4,7, 4,2, 3,7$ к ионам Fe^{3+} в структуре анатаза. Интерпретация основана на результатах компьютерного моделирования спектров ЭПР замещающих ионов Fe^{3+} в решетке данных минералов с параметрами спин-Гамильтониана, представленными в [1, 13, 14]. Максимальные значения интегральных интенсивностей линий Fe^{3+} в структурах рутила и анатаза наблюдаются для пробы Т-1с. Учитывая, что гравитационные концентраты получены из одной технологической пробы титановой руды, можно заключить, что вариации интенсивности сигналов ЭПР Fe^{3+} в решетках рутила и анатаза связаны в основном не с концентрацией этой примеси в минералах, а с содержанием данных минералов в концентратах. Низкая интенсивность данных сигналов, малая ширина линий указывают на низкую концентрацию замещающих ионов Fe^{3+}

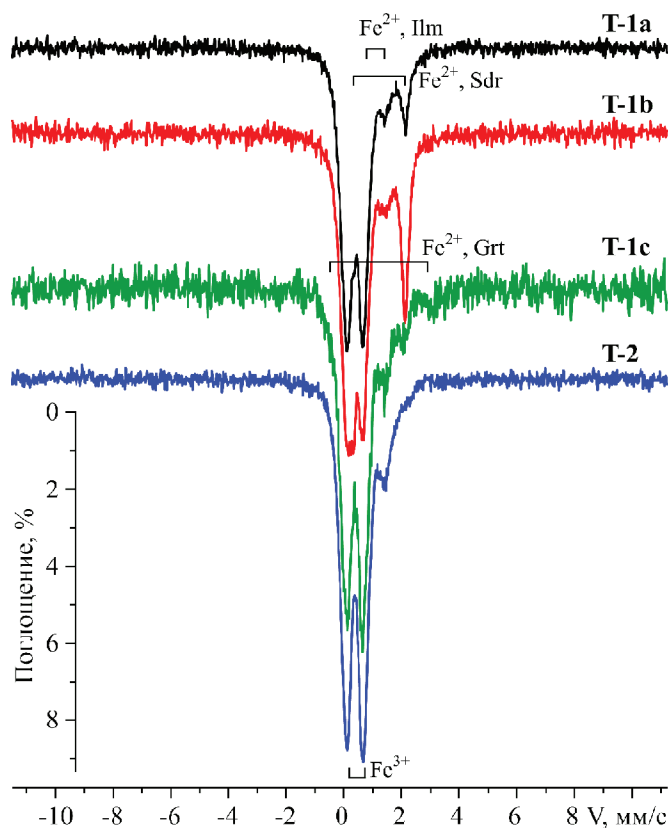


Рис. 4. Обзорные мёссбауэровские спектры концентратов. Показаны дублеты ионов Fe^{3+} псевдорутила, а также ионов Fe^{2+} ильменита (Ilm), сидерита (Sdr) и граната (Grt)

в структуре рутила и анатаза, не превышающих $0, n - 0, 0 n \%$.

В полученных обзорных Мёссбауэровских спектрах наблюдаются только парамагнитные дублетные компоненты, секстетная структура магнитно упорядоченных фаз, таких как магнетит, гематит, гётит и др., не заметна (рис. 4). Доминирует дублет, типичный для кислородной октаэдрической координации ионов Fe^{3+} с величинами изомерного сдвига ($IS \approx 0,4$ мм/с и квадрупольного расщепления ($QS \approx 0,5$ мм/с, которые можно отнести к псевдорутилу. Его крыло со стороны положительных скоростей осложнено высокоскоростными пиками дублетов Fe^{2+} с параметрами, типичными для сидерита ($IS \sim 1,2$, $QS \sim 1,8$ мм/с) и ильменита ($IS \sim 1$, $QS \approx 0,7$ мм/с) [20]. В спектре пробы T-1c присутствует также слабый пик при значении скорости ≈ 3 мм/с, вероятно, относящийся к ионам Fe^{2+} в додекаэдрических позициях граната с высокими значениями $IS > 1$ и $QS > 3$ мм/с [20]. Присутствие граната в данной пробе подтверждено методами рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии.

Детализация композиции Мёссбауэровских спектров, интерпретация и параметры выделенных дублетов представлены на рис. 5 и в табл. 5. Во всех спектрах достаточно уверенно выделяется дублет

ильменита. У стехиометричных разностей минерала квадрупольное расщепление близко к $0,7$ мм/с при изомерном сдвиге $1,1$ мм/с [20]. В нашем случае дублет также имеет значение $IS \approx 1,1$ мм/с, но меньшую величину $QS \approx 0,6$ мм/с, что характерно для ильменита с дефектной нестехиометрической структурой. На дефектность ильменита указывает также большая ширина пиков. Относительный вклад дублета ильменита в общую площадь спектрального контура изменяется от 8 (T-1a, b) и 11 (T-2) до 13 % (T-1c). По данным микронзондовых определений ильменит месторождения, содержит небольшое количество изоморфных ионов марганца, его средний состав описывается кристаллохимической формулой $(Fe_{0,985}Mn_{0,015})TiO_3$ [4].

В спектрах концентратов T-1a и b отчетливо видны оба пика дублета сидерита. В спектрах проб T-1c и T-2 замечен только высокоскоростной пик Fe^{2+} сидерита. Найденные параметры дублета ($IS = 1,23$, $QS = 1,78$ мм/с) соответствуют идеальному сидериту. В спектре пробы T-1b около 30 % площади спектрального контура приходится на сидерит, в спектре проб T-1a и T-1c — соответственно в 2 и 3,5 раза ниже, а проба T-2 почти свободна от сидерита. Аналогичный ряд относительного содержания сидерита в концентратах получен методами ИКС и рентгеновской дифракции. В спектре

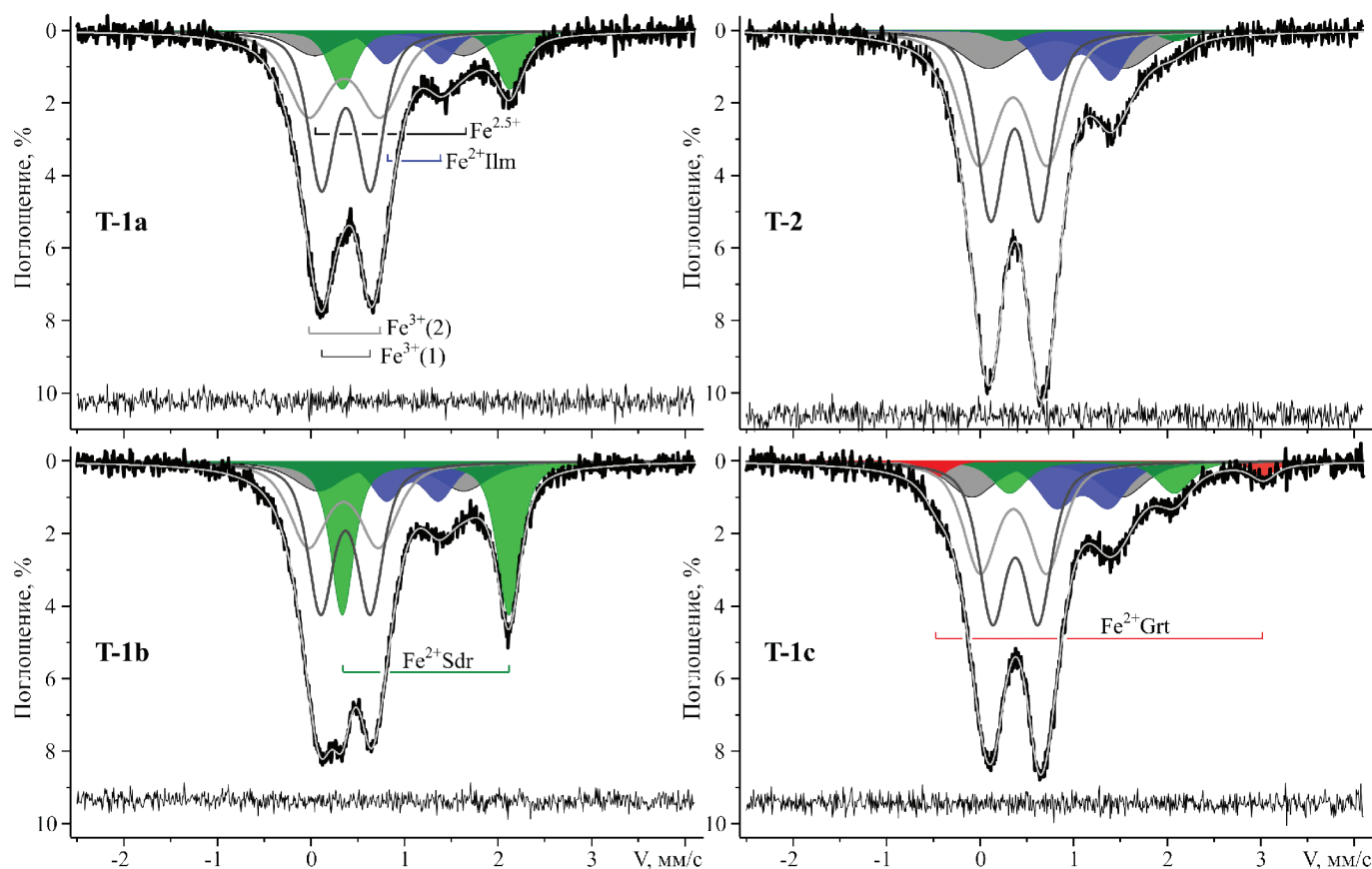


Рис. 5. Парамагнитные части мёссбауэровских спектров концентратов и их декомпозиция. Дублеты сидерита окрашены зеленым, ильменита — синим, граната — красным, два пустых $\{Fe^{3+}(1)$ и $Fe^{3+}(2)\}$ и серые ($Fe^{2,5+}$) отнесены к псевдорутилу. В нижней части приведена разность экспериментального спектра и расчетной суммы выделенных дублетов

Таблица 5

Мёссбауэровские параметры и позиции ионов железа в четырех фракциях концентрата

Параметр	T-1a	T-1b	T-1c	T-2	Позиция Fe
IS, мм/с	0,376 ₅	0,372 ₅	0,38 ₁	0,378 ₃	Псевдорутил ^{VI} Fe ³⁺ (1)
QS, мм/с	0,52 ₁	0,53 ₁	0,49 ₁	0,51 ₁	
Г, мм/с	0,34 ₁	0,33 ₁	0,33 ₂	0,35 ₁	
A, %	37	29	34	36	
IS, мм/с	0,36 ₁	0,35 ₁	0,36 ₁	0,36 ₁	Псевдорутил ^{VI} Fe ³⁺ (2)
QS, мм/с	0,77 ₁	0,75 ₁	0,71 ₃	0,73 ₂	
Г, мм/с	0,54 ₃	0,47 ₁	0,43 ₂	0,48 ₃	
A, %	31	24	29	35	
IS, мм/с	0,84 ₃	0,86 ₃	0,72 ₄	0,82 ₄	Псевдорутил ^{VI} Fe ^{2,5+} (3)
QS, мм/с	1,59 ₅	1,55 ₄	1,6 ₁	1,5 ₁	
Г, мм/с	0,54 ₃	0,63 ₅	0,6 ₁	0,7 ₁	
A, %	10	11	13	15	
IS, мм/с	1,10 ₁	1,09 ₁	1,10 ₂	1,09 ₂	Ильменит ^{VI} Fe ²⁺
QS, мм/с	0,59 ₅	0,56 ₂	0,56 ₄	0,63 ₅	
Г, мм/с	0,60 ₅	0,38 ₂	0,47 ₃	0,41 ₃	
A, %	8	8	13	11	
IS, мм/с	1,23 ₁	1,23 ₁	1,20 ₃	1,2	Сидерит ^{VI} Fe ²⁺
QS, мм/с	1,79 ₂	1,78 ₁	1,8 ₁	1,8	
Г, мм/с	0,34 ₂	0,30 ₁	0,43 ₁	0,4	
A, %	14	28	8	3	
IS, мм/с			1,29 ₁		Гранат ^{VIII} Fe ²⁺
QS, мм/с			3,49 ₃		
Г, мм/с			0,31 ₄		
A, %			3		

Примечание. IS, QS — изомерный сдвиг и квадрупольное расщепление; Г — полуширина пиков; А — относительная площадь компонента.

пробы T-1c выделен также малоинтенсивный дублет с большими значениями изомерного сдвига и квадрупольного расщепления ($IS = 1,29$, $QS = 3,49$ мм/с), как уже отмечалось, этот дублет соответствует додекаэдрическим 8-кислородно координированным позициям ионов Fe^{2+} в структуре граната, единичные микронные определения которого дают состав $(Fe_{2,05}Ca_{0,59}Mg_{0,24}Mn_{0,12})_3Al_2(SiO_4)_3$.

Интенсивный уширенный дублет Fe^{3+} в основном воспроизводится суммой двух дублетов $Fe^{3+}(1)$ и $Fe^{3+}(2)$ с примерно равными относительными вкладами площадей в спектральный контур и близкими изомерными сдвигами 0,38—0,36 мм/с, но с различными значениями квадрупольного расщепления (0,49—0,53 и 0,71—0,77 мм/с) и ширин пиков ($\approx 0,3$ и $\approx 0,5$ мм/с). Величины IS и QS данных дублетов типичны для кислородного октаэдрического окружения ионов Fe^{3+} в псевдорутиле. Дублет $Fe^{3+}(1)$ с меньшим квадрупольным расщеплением и меньшей шириной пиков имеет несколько больший относительный вклад, чем второй $Fe^{3+}(2)$ дублет.

Два дублета Fe^{3+} с аналогичными параметрами нами ранее были выделены в Мёссбауэровских спектрах коллективного концентрата пижемских титановых руд и его полных (без выделения плотностных интервалов) магнитных фракций (0,04—0,5 мм) и отнесены к псевдорутилу [6]. В спектрах этих концентратов был также определён малоин-

тенсивный дублет Fe^{3+} с малыми значениями параметров $IS \leq 0,3$, $QS \approx 0,3$ мм/с, отнесенный к Fe -рутилу. Его представительность в спектрах мелкозернистой магнитной фракции (0,04—0,125 мм/с) не более 4—6 % площади общего спектрального контура. В Мёссбауэровских спектрах концентратов T-1a,b,c и T-2, относящихся плотностному интервалу 3,3—3,9 г/см³ мелкой магнитной фракции (0,125—0,05 мм), присутствие такого компонента не заметно, хотя, возможно, он вносит небольшой вклад в интенсивный дублет $Fe^{3+}(1)$.

В [18] Мёссбауэровский спектр псевдорутила описан одним дублетом с $IS = 0,38$ мм/с, и значением квадрупольного расщепления 0,62—0,69 мм/с, близким к среднему по нашим дублетам $Fe^{3+}(1)$ и $Fe^{3+}(2)$. Структура псевдорутила принадлежит гексагональной сингонии и описана в пространственной группе $P6_322$ [10]. Атомы Ti и Fe занимают две трети от половины доступных октаэдрических позиций со случайным распределением и полностью заполняют вторую половину значительно более симметричных октаэдрических позиций. По степени искажения и расстоянию металл—кислород эти позиции сравнимы с двумя октаэдрическими позициями, имеющимися в структуре псевдобрукита. Этот минерал подробно изучен методом Мёссбауэровской спектроскопии [12]. По аналогии с псевдобрукитом, и учитывая то, что с увеличением QS Fe^{3+} растёт степень искажения октаэдрических по-

зий, дублет $\text{Fe}^{3+}(1)$ можно отнести к упорядоченным октаэдрическим позициям псевдорутила, а дублет $\text{Fe}^{3+}(2)$ — к более искаженным позициям случайного заполнения. В решетке Fe^{3+} -псевдобрукита $\text{Fe}^{3+}_2\text{TiO}_5$ железо с небольшим перевесом заполняет менее искаженные позиции. Такое же распределения следует из табл. 5 для псевдорутила.

Для полной аппроксимации всего спектрально-го контура необходим еще один дублет со средними для октаэдрических ионов Fe^{3+} и Fe^{2+} значением $\text{IS} \approx 0,7\text{--}0,8$ мм/с и примерно вдвое меньшей площадью контура, чем у каждого из дублетов Fe^{3+} (табл. 5). Дублет обусловлен эффективной валентностью железа (+2,5) вследствие обменного взаимодействия Fe^{2+} и Fe^{3+} в соседних октаэдрических позициях. Такая ситуация реализуется в структуре магнетита [20], глауконита [7, 17] и в других минералах с высоким содержанием разновалентного железа (Fe^{2+} и Fe^{3+}). Единственной фазой в концентратах, к которой может быть отнесен дублет $\text{Fe}^{2,5+}$, является псевдорутил. Небольшие содержания Fe^{2+} по литературным данным могут содержаться даже в гидратированных разностях псевдорутила — $\text{Fe}^{3+}_{1,81}\text{Fe}^{2+}_{0,07}\text{Mn}^{3+}_{0,03}\text{Ti}_{3,08}\text{O}_9 \cdot 0,75\text{H}_2\text{O}$ (Южная Австралия), $\text{Fe}^{3+}_{1,34}\text{Fe}^{2+}_{0,26}\text{Mn}^{3+}_{0,15}\text{Ti}_{3,25}\text{O}_9 \cdot 0,48\text{H}_2\text{O}$ (Индонезия) [8, 9].

Допуская наличие в структуре псевдорутила двухвалентного железа, представим состав минерала в виде суперпозиции двух миналов псевдорутила $\text{Fe}^{3+}_2\text{Ti}_3\text{O}_9$ и ферро-псевдорутила $\text{Fe}^{2+}\text{Ti}_4\text{O}_9$: $\text{Fe}_{1+X}\text{Ti}_{4-X}\text{O}_9 = X \cdot \text{Fe}^{3+}_2\text{Ti}_3\text{O}_9 + (1-X) \cdot \text{Fe}^{2+}\text{Ti}_4\text{O}_9$. Аналогичное представление использовалось при изучении методом Мёссбауэровской спектроскопии распределения катионов в решетке псевдобрукита [12]. Если принять, что в псевдорутиле, как и в псевдобруките, ионы Fe^{3+} и Fe^{2+} в различных структурных позициях имеют примерно равные значения Дебая-Валлера, а площадь дублета $\text{Fe}^{2,5+}$ равномерно распределяется по обменным ионам Fe^{2+} и Fe^{3+} , то формульный коэффициент X может быть определен прямо по соотношению относительных площадей под мёссбауэровскими дублетами псевдорутила: $(A_{\text{Fe}^{2,5+}}/2)/[A_{\text{Fe}^{2,5+}} + A_{\text{Fe}^{3+}(1)} + A_{\text{Fe}^{3+}(2)}] = (1-X)/(1+X)$. В соответствии с данными табл. 5, для псевдорутила концен-

трата Т-1а получаем состав $\text{Fe}^{3+}_{1,76}\text{Fe}^{2+}_{0,12}\text{Ti}_{3,12}\text{O}_9$, а для остальных концентратов — $\text{Fe}^{3+}_{1,68}\text{Fe}^{2+}_{0,16}\text{Ti}_{3,16}\text{O}_9$.

При количественной оценке распределения ионов железа по различным минеральным фазам и структурным позициям следует учитывать различия в значениях фактора Дебая-Валлера различных структурных состояний ионов железа. Для псевдорутила используем значение фактора Дебая-Валлера, равное ему в ильмените — 0,650, для сидерита — 0,743 [8], для граната — 0,624 [8, 9]. Расчёты показали, что в пробах Т-1а, б, с и Т-2 соответственно 79; 66; 77 и 86 ат. % Fe локализовано в псевдорутиле, 13; 26; 7; 3 ат. % Fe — в сидерите, 8; 8; 13; 11 ат. % Fe — в ильмените, 3 ат. % Fe приходится на гранат в пробе Т-1с.

Данное распределение железа по минеральным фазам позволяет на основе сведений о химическом составе концентратов (табл. 2) определить весовые содержания рудных и нерудных компонентов. По данным микронзондовых определений [4], ильменит и псевдорутил содержат ионы Mn^{2+} в средних мольных пропорциях $\text{Mn}/\text{Fe} = 0,015$ и 0,09, в гранате в соответствии с его кристаллохимической формулой $\text{Mn}/\text{Fe} = 0,06$. Псевдорутил замещает в гидротермальном процессе ильменит и наследует изоморфное содержание марганца в своей структуре. Если считать, что весь марганец в составе проб (табл. 2) распределён только между этими минералами, с учётом пропорций Mn/Fe в ильмените и гранате, а также Мёссбауэровские данные по распределению железа в минеральных фазах, то получаем следующие расчётные кристаллохимические формулы для псевдорутила: в пробе Т-1а — $(\text{Fe}^{3+}_{1,66}\text{Fe}^{2+}_{0,11}\text{Mn}^{3+}_{0,11})\text{Ti}_{3,12}\text{O}_9$; в пробах Т-1б, с, Т-2 — $(\text{Fe}^{3+}_{1,57}\text{Fe}^{2+}_{0,15}\text{Mn}^{3+}_{0,13})\text{Ti}_{3,15}\text{O}_9$. Как и в [10, 11], мы предполагаем, что ионы марганца в псевдорутиле находятся в окисленной форме. Полученное отношение $\text{Mn}/\text{Fe} = 0,06\text{--}0,08$ близко к микронзондовым определениям. Расчётное весовое распределение рудных и нерудных фаз в концентратах представлено в табл. 6. Здесь весь остаточный диоксид титана отнесен к низкожелезистым фазам рутилу и анатазу (в лейкоксене), проявляющихся в спектрах ЭПР, но «немых» для Мёссбауэровской

Таблица 6

Минеральный состав (вес, %) концентратов

Концентрат		Rt	PsRt	Ilm	Sdr	Grt	Остаток оксидов	В том числе		
Номер	$\Delta\rho$, г/см ³							Mus	Kaol	Qtz
Т-1а	3,3–3,5	16,2	51,2	3,6	4,2	—	24,7	10,4	0	11,2
Т-1б	3,5–3,7	14,5	54,2	4,5	10,4	—	16,4	7,5	1,0	7,5
Т-1с	3,7–3,9	6,1	63,9	7,3	2,9	2,7	17,1	5,7	0,8	9,5
Т-2		18,9	48,6	4,2	0,8	—	27,4	5,1	3,9	14,8

П р и м е ч а н и е. Rt — рутил, PsRt — псевдорутил ($\text{Fe}_{1,77}\text{Mn}_{0,11}\text{Ti}_{3,12}\text{O}_9$ в концентрате Т-1а и $(\text{Fe}_{1,72}\text{Mn}_{0,13})\text{Ti}_{3,15}\text{O}_9$ — в концентратах Т-1б, с и Т-2, Ilm — ильменит ($\text{Fe}_{0,985}\text{Mn}_{0,015}\text{TiO}_3$), Sdr — сидерит FeCO_3 , Grt — гранат ($\text{Fe}_{2,05}\text{Ca}_{0,59}\text{Mg}_{0,24}\text{Mn}_{0,12}\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$), Mus — мусковит, Kaol — каолинит, Qtz — кварц.

спектроскопии. Становится очевидным факт неполного разделения в концентратах немагнитного лейкоксена от магнитного псевдорутила из-за их тесных сростаний и неполноты прохождения реакции превращения псевдорутила в лейкоксен.

После вычета определённых выше рудных минеральных фаз, остаточные компоненты на 80—90 вес.% состоят из оксидов кремния и алюминия, которые не могли быть отделены от зёрен рудных Fe-Ti минералов, поскольку представляют собой примазки и включения кварца, каолинита и мусковит-серицита (рис. 1) внутри зёрен псевдорутила и лейкоксена. Суммарное содержание рудных титановых минералов (рутила, псевдорутила, ильменита) повышается от 71 до 77,3 вес.% по мере увеличения гравитационного класса концентрата до 3,7—3,9 г/см³. Именно в этих трёх гравитационных классах накапливаются циркон, монацит-куларит, ксенотим. Следующая поисковая технологическая задача состоит в обескремнивании нестандартных титановых концентратов Пижемского месторождения для получения востребованных промышленностью товарных продуктов, которая также будет сопровождаться химическими и спектроскопичес-

кими фазовыми исследованиями получаемых продуктов.

Заключение

Показано, что магнитная фракция из мелких продуктивных классов концентратов титановых руд Пижемского месторождения состоит из: псевдорутила, ильменита, сидерита и граната. С помощью нормативного пересчета данных химических анализов, а также спектроскопических методов ИКС, ЭПР, ЯГР достоверно установлен фазовый состав железо-титановых фаз. Рассчитано соотношение псевдорутила, ильменита, сидерита и сопутствующих нерудных, тяжёлых редких и редкоземельных минералов — монацита-куларита и циркона, накапливающихся в соответствующих гравитационных классах. Рекомендуются применение операций доводки концентратов (извлечение циркона и монацита) до операции обескремнивания, а также их очистки от сидерита.

Работа выполнена в рамках Госзадания, по следующим темам: ИГ Коми НЦ УрО РАН — ГР № AAAA-A17-117121270036-7; ИГЕМ РАН — 0136-2018-0020.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власова М.В., Казакей Н.Г., Калинин А.М., Литовченко А.С. Радиоспектроскопические свойства неорганических материалов. Справочник. Киев: Наукова думка, 1987. 719 с.
2. Лютоев В.П., Макеев А.Б., Лысюк А.Ю. Исследование возможности определения минерального состава титаномagnetитовых руд по данным спектроскопии // Обогащение руд. 2017. № 5. С. 28—36.
3. Лютоев В.П., Гонгальский Б.И., Макеев А.Б., Лысюк А.Ю., Магазина Л.О., Таскаев В.И. Титаномagnetитовые руды: минеральный состав и мёссбауэровская спектроскопия // Минералогия. 2017. № 2. С. 43—65.
4. Макеев А.Б. Типоморфные особенности минералов титановых руд Пижемского месторождения // Минералогия. 2016. № 1. С. 24—49.
5. Макеев А.Б., Лебедев В.А., Брянчанинова Н.И. Магматиты Среднего Тимана. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2008. 348 с.
6. Макеев А.Б., Лютоев В.П. Спектроскопия в технологической минералогии. Минеральный состав концентратов титановых руд Пижемского месторождения (Средний Тиман) // Обогащение руд. 2015. № 5. С. 33—41.
7. Симакова Ю.С., Лютоев В.П., Лысюк А.Ю. Кристаллохимические особенности глауконита Каринского месторождения, (Южный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 3(291). С. 41—50. DOI: 10.19110/2221-1381-2019-03-41-50.
8. De Grave E., Van Alboom A. Evaluation of ferrous and ferric Mossbauer fractions // Phys. Chem. Minerals. 1991. V. 18. P. 337—342.
9. Eeckhout S.G., De Grave E. Evaluation of ferrous and ferric Mossbauer fractions. Part II. Phys. Chem. Minerals. 2003. V. 30. P. 142—146.
10. Grey I.E., Reid A.F. The structure of pseudorutile and its role in natural alternation of ilmenite // Amer. Miner. 1975. V. 60. P. 898—906.
11. Grey I.E., Watts J.A., Bayliss P. Mineralogical nomenclature: pseudorutile revalidated and neotype given // Mineralogical Magazine. 1994. V. 58. P. 597—600.
12. Guo W.Q., Malus S., Ryan D.H., Altounian Z. Crystal structure and cation distributions in the FeTi₂O₅ — Fe₂TiO₅ solid solution series // J. Phys.: Condens. Matter. 1999. V. 11. P. 6337—6346.
13. Horn M., Schwerdtfeger C.F. EPR of substitutional and charge compensated Fe³⁺ in anatase (TiO₂) // J. Phys. Chem. Solids. 1971. V. 32. P. 2529—2538.
14. Lichtenberger G.J., Addison J.R. F- and X-band spectroscopy of Fe³⁺ in rutile // Phys. Rev. 1969. V. 184. No 2. P. 381—382.
15. Lyutov V.P., Makeev A.B., Lysyuk A.Yu. Application of Mössbauer, ESR, and FTIR spectroscopy for mineralogical and technological research of titanium ores / In: Votyakov S., Kiseleva D., Grokhovsky V., Shchapova Y. (eds) Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2020. P. 121—127. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00925-0_19 (в печати).
16. McConchie D.M., Ward J.B., McCann V.H., Lewis D.W. A Mössbauer investigation of glauconite and its geological significance // Clays and Clay Minerals. 1979. V.27. No 5. P. 339—348.
17. Saensunon B., Stewart G.A., Pax R. A combined ⁵⁷Fe-Mössbauer and X-ray diffraction study of the ilmenite reduction process in a commercial rotary kiln // Int. J. Miner. Process. 2008. V. 86. P. 26—32.
18. Stoll S., Schweiger A. EasySpin, a comprehensive software package for spectral simulation and analysis in EPR / J. Magn. Reson. 2006. V. 178(1), P. 42—55.
19. Vandenberghe R.E., De Grave E. Application of Mössbauer Spectroscopy in Earth Sciences // Mössbauer Spectroscopy. Tutorial Book (Ed. by Yutaka Yoshida and Guido Langouche). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. P. 91—186.

REFERENCES

1. Vlasova M.V., Kakazei N.G., Kalinichenko A.M., Litovchenko A.S. Radiospektroskopicheskie svoystva neorganicheskikh materialov. Spravochnik. [Radiospectroscopic properties of inorganic materials. Handbook]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1987, 719 p. (In Russian).
2. Lyutov V.P., Makeev A.B., Lysyuk A.Yu. Issledovanie vozmozhnosti opredeleniya mineral'nogo sostava titanomag-

- netitovykh rud po dannym spektroskopii [Exploring a possibility to determine titanium magnetite ores mineral composition by spectroscopy data]. *Obogashchenie rud* [Mineral Processing Journal], 2017, no. 5, pp. 28–36. DOI: 10.17580/or.2017.05.05. (In Russian)
3. Lyutov V.P., Gongal'skii B.I., Makeev A.B., Lysyuk A.Yu., Magazina L.O., Taskaev V.I. Titanomagnetitovye rudy: mineral'nyi sostav i messbauerovskaya spektroskopiya [Titanomagnetite ores: mineral composition and Mössbauer spectroscopy]. *Mineralogiya* [Mineralogy], 2017, no. 2, pp. 43–65. (In Russian)
 4. Makeev A.B. Tipomorfnye osobennosti mineralov titanovykh rud Pizhenskogo mestorozhdeniya [Typomorphic features of minerals of titanium ores from the Pizhenskoe deposit]. *Mineralogiya* [Mineralogy], 2016, no. 1, pp. 24–49. (In Russian)
 5. Makeev A.B., Lebedev V.A., Bryanchaninova N.I. *Magmatity Srednego Timana* [Magmatites of Middle Timan]. *Ekaterinburg: Izd-vo UrO RAN* [Publishing House of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2008, 348 p. (In Russian)
 6. Makeev A.B., Lyutov V.P. Spektroskopiya v tekhnologicheskoi mineralogii. Mineral'nyi sostav kontsentratsionnykh titanovykh rud Pizhenskogo mestorozhdeniya (Srednii Timan) [Spectroscopy in process mineralogy. The Pizhenskoe deposit titanium ores concentrates mineral composition]. *Obogashchenie rud* [Mineral Processing Journal], 2015, no. 5, pp. 33–41, DOI: 10.17580/or.2015.05.06. (In Russian)
 7. Simakova Yu.S., Lyutov V.P., Lysyuk A.Yu. Kristalloghimicheskie osobennosti glaukonita Karinskogo mestorozhdeniya (Yuzhnyi Ural) [Crystal-chemical features of glauconite from Karinskoe deposit (South Urals)]. *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 2019, no. 3 (291), pp. 41–50, DOI: 10.19110/2221-1381-2019-03-41-50. (In Russian)
 8. De Grave E., Van Alboom A. Evaluation of ferrous and ferric Mössbauer fractions. *Physics and Chemistry of Minerals*, 1991, vol. 18, pp. 337–342.
 9. Eeckhout S.G., De Grave E. Evaluation of ferrous and ferric Mössbauer fractions. Part II. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2003, vol. 30, pp. 142–146.
 10. Grey I.E., Reid A.F. The structure of pseudorutile and its role in natural alteration of ilmenite. *American Mineralogist*, 1975, vol. 60, pp. 898–906.
 11. Grey I.E., Watts J.A., Bayliss P. Mineralogical nomenclature: pseudorutile revalidated and neotype given. *Mineralogical Magazine*, 1994, vol. 58, pp. 597–600.
 12. Guo W.Q., Malus S., Ryan D.H., Altounian Z. Crystal structure and cation distributions in the FeTi_2O_5 — Fe_2TiO_5 solid solution series. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1999, vol. 11, pp. 6337–6346.
 13. Horn M., Schwerdtfeger C.F. EPR of substitutional and charge compensated Fe^{3+} in anatase (TiO_2). *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1971, vol. 32, pp. 2529–2538.
 14. Lichtenberger G.J., Addison J.R. F- and X-band spectroscopy of Fe^{3+} in rutile. *Physical Review*, 1969, vol. 184, no. 2, pp. 381–382.
 15. Lyutov V.P., Makeev A.B., Lysyuk A.Yu. Application of Mössbauer, ESR, and FTIR spectroscopy for mineralogical and technological research of titanium ores. In: *Votyakov S., Kiseleva D., Grokhovsky V., Shchapova Y. (eds) Minerals: Structure, Properties, Methods of Investigation. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. 2020, pp. 121–127. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00925-0_19.*
 16. McConchie D.M., Ward J.B., McCann V.H., Lewis D.W. A Mössbauer investigation of glauconite and its geological significance. *Clays and Clay Minerals*, 1979, vol. 27, no. 5, pp. 339–348.
 17. Saensunon B., Stewart G.A., Pax R. A combined ^{57}Fe -Mössbauer and X-ray diffraction study of the ilmenite reduction process in a commercial rotary kiln. *International Journal of Mineral Processing*, 2008, vol. 86, pp. 26–32.
 18. Stoll S., Schweiger A. EasySpin, a comprehensive software package for spectral simulation and analysis in EPR. *Journal of Magnetic Resonance*, 2006, vol. 178(1), pp. 42–55.
 19. Vandenberghe R.E., De Grave E. Application of Mössbauer Spectroscopy in Earth Sciences. In: *Yutaka Yoshida and Guido Langouche (eds) Mössbauer Spectroscopy. Tutorial Book. Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2013, pp. 91–186. DOI: 10.1007/978-3-642-32220-4.

УДК 552.312.5. 552.322.8. 552.321.5

КАМЕННОУГОЛЬНЫЙ ОКРАИННО-КОНТИНЕНТАЛЬНЫЙ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВЫЙ КОМПЛЕКС ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ДАЕК ЗАПАДНО-МАГНИТОГОРСКОЙ ЗОНЫ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

А.В. РЯЗАНЦЕВ¹, И.А. НОВИКОВ², А.А. РАЗУМОВСКИЙ¹

¹Геологический институт РАН
7, Пыжевский пер. г. Москва 119017, Россия
email: avryazan51@mail.ru

²Научно-исследовательский институт глазных болезней
11А, Россолимо, Москва 119021, Россия
email: i.novikov@niigb.ru

На западе аллохтона Магнитогорской зоны, надвинутого на докембрий зоны Уралтау, девонские островодужные комплексы стратиграфически залегают на ордовикских и силурийских кремнисто-базальтовых комплексах и серпентинитовом меланже. Меланж и ордовикская толща прорваны роями даек и пакетами «дайка в дайке», которые сложены породами основного и ультраосновного составов. Преобладают дайки габбро-долеритов, амфиболовых с калиевым полевым шпатом габбро, горнблендитов, пикритов, лампрофиров. Ультраосновные дайки по составу отвечают пикритам и коматиитам. По магматическому амфиболу из габбро $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст комплекса 357 ± 8 млн. лет. Формирование даек связано с раннекаменноугольным этапом рифтогенного магматизма на активной континентальной окраине.

Ключевые слова: комплекс параллельных даек; Урал; пикриты; габбро-долериты; горнблендиты; лампрофиры; коматииты; монзониты; активная континентальная окраина; рифтогенез; карбон; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-3-42-50

CARBONIFEROUS CONTINENTAL MARGIN MAFIC-ULTRAMAFIC SHEETED DYKE COMPLEX IN THE WEST MAGNITOGORSK ZONE (SOUTHERN URALS)

A.V. RYAZANTSEV¹, I.A. NOVIKOV², A.A. RAZUMOVSKIY¹

¹*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences
7, Pyzhevsky street, Moscow 119017, Russia
e-mail: avryazan51@mail.ru*

²*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (IGEM RAS)
35, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia,
e-mail: i.novikov@niigb.ru*

In the West of the allochthon of Magnitogorsk zone thrust onto the Precambrian complexes of the Uraltau zone, the Devonian island-arc complexes overlap stratigraphically the Ordovician and Silurian chert-basalt sequences and serpentine melange. Melange and Ordovician strata are intruded by dyke swarms and sheeted dykes («dyke in dyke») which are composed of mafic and ultramafic rocks. The dykes, composed by gabbro-dolerite, amphibole K-feldspar gabbro, hornblendite, picrite and lamprophyre, predominate. The composition of the ultramafic rocks corresponds to the composition of picrite and komatiite. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the magmatic amphibole from gabbro is 357 ± 8 m.y. The formation of dykes is related to the Early Carboniferous rift-related magmatism on an active continental margin.

Keywords: sheeted dyke complex; Urals; picrite; gabbro-dolerite; lamprophyre; hornblendite; komatiite; monzonite; active continental margin; rifting; Carboniferous; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age.

На Южном Урале вблизи зоны Главного Уральско-го разлома на западе Магнитогорской синформы ордовикский кремнисто-базальтовый комплекс и серпентинитовый меланж прорываются роями даек и пакетами «дайка в дайке», которые сложены породами основного и ультраосновного составов. С дайками связано медное и золотое оруденение. Ранее дайковый и кремнисто-базальтовый комплексы объединялись в офиолитовую ассоциацию, при этом дайковый комплекс рассматривался как индикатор ордовикского спрединга [8, 9, 11]. В результате проведенных исследований установлено, что дайковый комплекс имеет каменноугольный возраст, а состав его пород не типичен для спрединговых комплексов.

Методы аналитических исследований

Содержания петрогенных оксидов определены методом рентгено-спектрального флуоресцентного анализа в Лаборатории химико-аналитических исследований ГИН РАН, редких и рассеянных элементов — методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в АСИЦ ИПТМ РАН (г. Черноголовка) и в ГИН РАН. Изучение химического состава минеральных индивидов и агрегатов проводили в Институте глазных болезней РАН (г. Москва) с помощью сканирующего электронного микроскопа Zeiss EVO LS 10 (Zeiss, Германия) с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-MAX 50 (Oxford, Великобритания), оснащённым кремний-дрейфовым детектором. Определения возраста $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом проводились А.В. Травиным в Лаборатории изотопно-аналитических методов в Институте геологии и минералогии СО РАН в Новосибирске.

Результаты и обсуждение

На юге Урала Главный уральский разлом (ГУР) разделяет структуры палеоконтинентального сектора на западе и палеоокеанического сектора на востоке (рис. 1). В палеоконтинентальном секторе в Западно-Уральской и Центрально-Уральской мегазонах распространены выступы докембрия, перекрытого чехлами палеозойских терригенно-карбонатных и кремнисто-терригенных толщ. В палеоокеаническом секторе (Магнитогорская мегазона (синформа)) распространены комплексы, сформированные в зоне перехода от континента к океану, представленные офиолитами, девонскими островодужными комплексами, граувакками, а на верхнем структурном уровне располагаются рифтогенные каменноугольные вулканы.

На западе Магнитогорской синформы в ядрах антиформ вместе с серпентинитовым меланжем залегает кремнисто-базальтовый комплекс (поляковская свита), возраст которого по конодонтам охватывает стратиграфический интервал от нижнего ордовика (фло) до верхнего ордовика включительно. Здесь же распространены фрагменты дергайшской свиты нижнего силура (базальты, углеродистые сланцы) и сакмарской свиты нижнего силура—нижнего девона (лохков), сложенной углеродистыми сланцами и кремнями [8, 9]. Ордовикские и силурийско-нижнедевонские толщи несогласно перекрыты девонскими островодужными вулканогенными породами. Палеозойские толщи прорваны интрузиями ранне—среднекаменноугольного балбукского комплекса монцодиоритов, сиенитов и лейкогранитов. Породы этого комплекса и метасоматиты экзоконтактов (листвениты) являются источниками коренного и россыпного золота в этом районе.

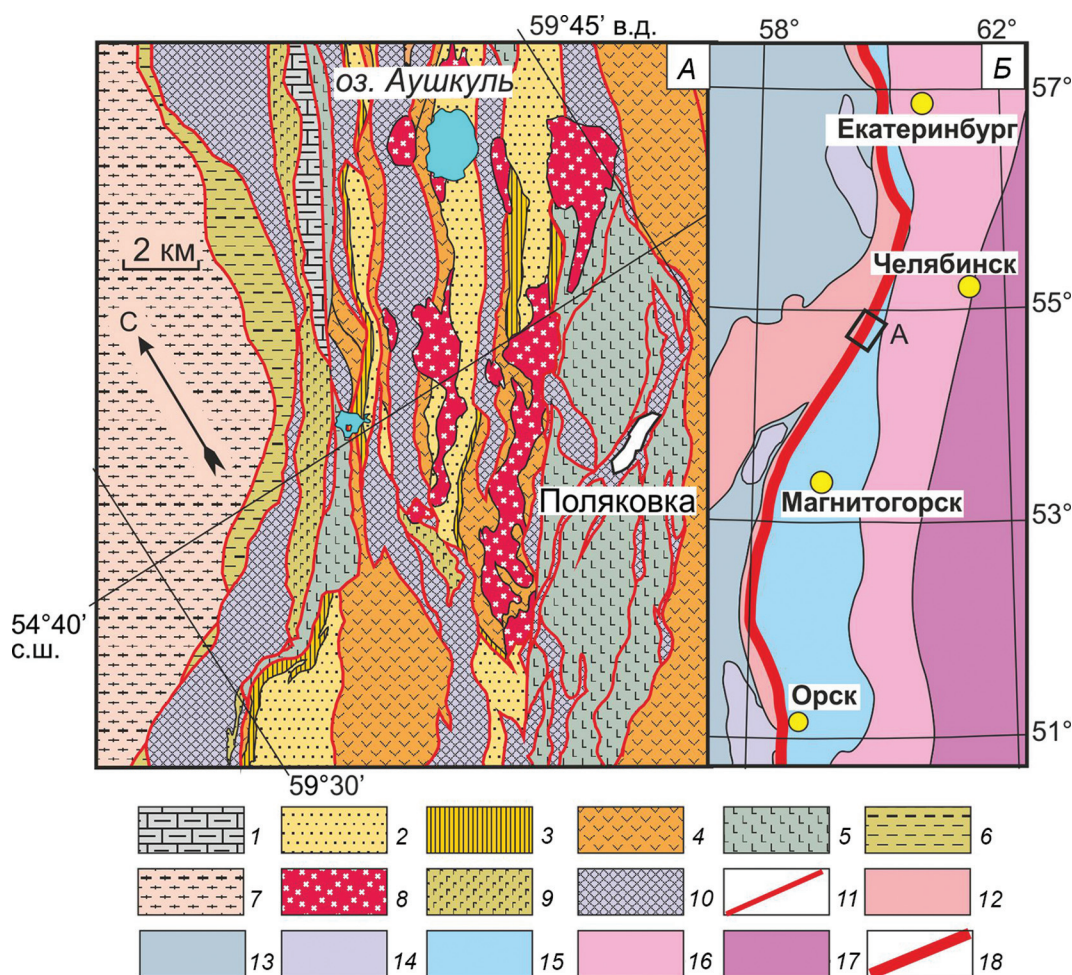


Рис. 1. Геолого-структурная схема зоны ГУР и Западно-Магнитогорской зоны (составлено с использованием данных [4]): 1 – кизильская свита, нижний–средний карбон, известняки, песчаники, алевролиты; 2 – зилайская свита, фаменский ярус, песчаники, алевролиты, туффиты; 3 – мукасовская свита, франкийский ярус, кремни; 4 – толщи вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород, известняков нижнего-верхнего девона; 5 – толщи вулканогенных и кремнистых пород ордовика и силура; 6 – суавнянский комплекс, нижний и средний палеозой, кремни, алевролиты, на уровне среднего девона базальты; 7 – рифейские толщи кварцито-сланцев, кварцитов, доломитов; 8 – балбукский комплекс, ранний–средний карбон, монцодиориты, сиениты, лейкограниты; 9 – нуралинский комплекс, ранний девон, габбро, габбро-диориты, гранодиориты; 10 – массивы офиолитов и серпентинитовый меланж; 11 – тектонические контакты; На врезке (Б): 12 – комплексы докембрийского фундамента Западно-Уральской и Центрально-Уральской мегазон; 13 – палеозойские комплексы терригенно-карбонатного чехла Восточно-Европейской платформы, флиш и молассы Предуральского краевого прогиба; 14 – комплексы краевых аллохтонов; 15 – Тагило-Магнитогорская мегазона; 16 – Восточно-Уральская мегазона; 17 – Зауральская мегазона; 18 – Главный уральский разлом. Прямоугольником показано положение на рис. А

Поляковская свита и серпентинитовый меланж прорываются роями даек и пакетами «дайка в дайке» (рис. 2). В дайковом комплексе (для него предложено название «краснохтинский») преобладают дайки габбро-долеритов, амфиболовых габбро, горнблендитов, пикритов, лампрофиров. Дайки конформны структуре кремнисто-базальтового комплекса и меланжа. Пакеты, состоящие из нескольких однозакальных даек, в средней части прорваны двузакальными дайками (рис. 3). Мощность даек 0,1–2 м. В центре пакетов, как правило, преобладают существенно амфиболовые разности пород, которые неоднородны по составу. Здесь наблюдаются постепенные переходы между меланократовыми и мезократовыми габбро, горнблендитами, меланократовыми лампрофирами. В центре даек

обособляются сегрегации размером 10–20 см лейкократовых вогезитов, имеющих постепенный переход от меланократовых разностей. Серпентиниты на экзоконтактах даек родингитизированы и в них наблюдаются скопления кристаллов везувиана. С дайками и вмещающими породами связано медно-порфировое оруденение прожилково-вкрапленного типа (отработанное Поляковское месторождение) и золоторудные проявления [4].

Дайки краснохтинского комплекса сложены порфировыми породами с первично стекловатой основной массой и полнокристаллическими разностями. Пикриты содержат фенокристаллы серпентинизированного оливина, клинопироксена, редко амфибола и хромшпинелида. Основная масса сложена нематобластовым агрегатом тремолита

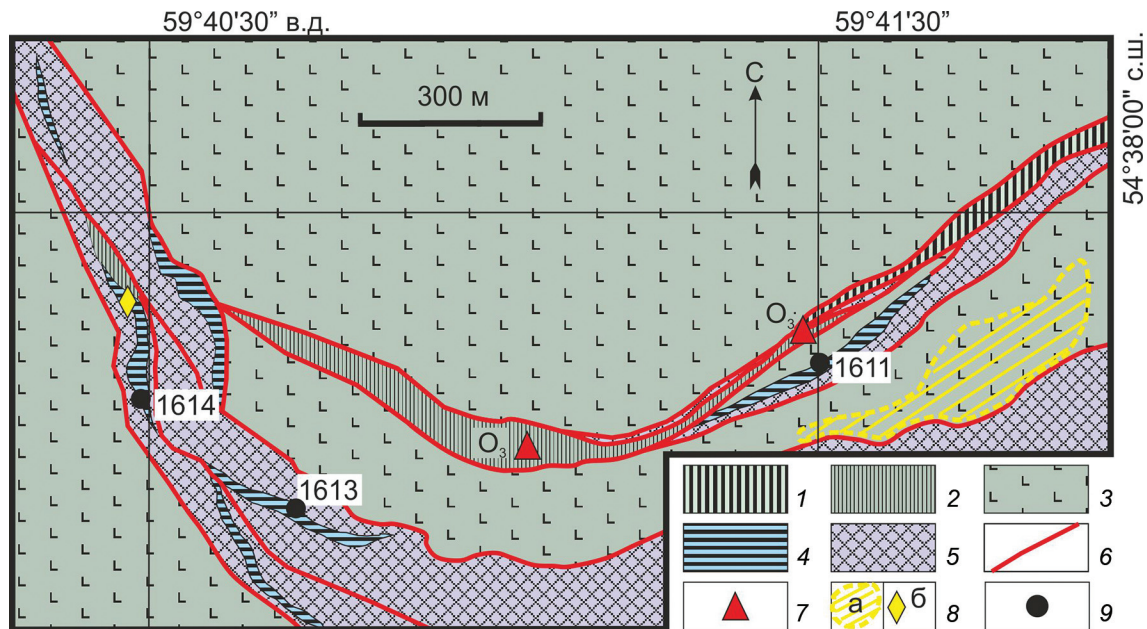


Рис. 2. Схема геологического строения участка распространения краснохтинского дайкового комплекса к северу от с. Поляковка: 1 — сакмарская свита (нижний—верхний силур), углеродистые сланцы и кремни; 2—3 — поляковская свита (нижний — верхний ордовик): 2 — кремни, 3 — подушечные базальты, гиалокластиты, кремни; 4 — краснохтинский дайковый комплекс (ранний карбон), габбро, габбро-долериты, лампрофиры, горнблендиты, пикриты; 5 — серпентиниты; 6 — тектонические контакты; 7 — точки находок конодонтов и их возраст; 8 — площади меднопорфирового (а) и точка золотого (б) оруденения, связанных с дайками; 9 — точки детальных разрезов дайкового комплекса, показанных на рис. 3

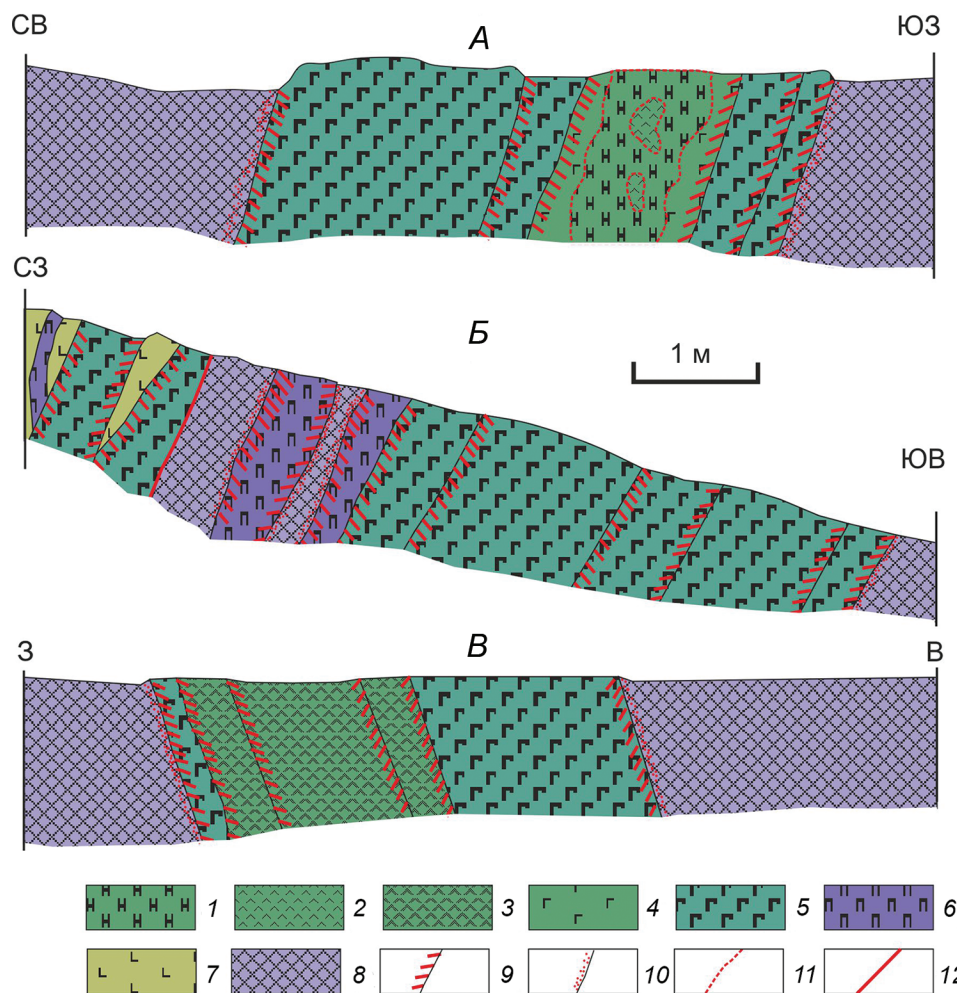


Рис. 3. Схематические разрезы краснохтинского дайкового комплекса к северу от с. Поляковка; А — район точки 1613, Б — район точки 1611, В — район точки 1614 (рис. 2): 1 — амфиболовые габбро, горнблендиты, амфиболовые лампрофиры; 2 — вогезиты; 3 — спессартиты; 4 — амфиболовые габбро; 5 — клинопироксен-амфиболовые габбро, габбро-долериты; 6 — пикриты; 7 — поляковская свита (ордовик), подушечные базальты; 8 — серпентиниты; 9 — закальные эндоконтакты даек; 10 — родингиты на экзоконтакте даек; 11 — контакты с постепенными переходами; 12 — тектонические контакты

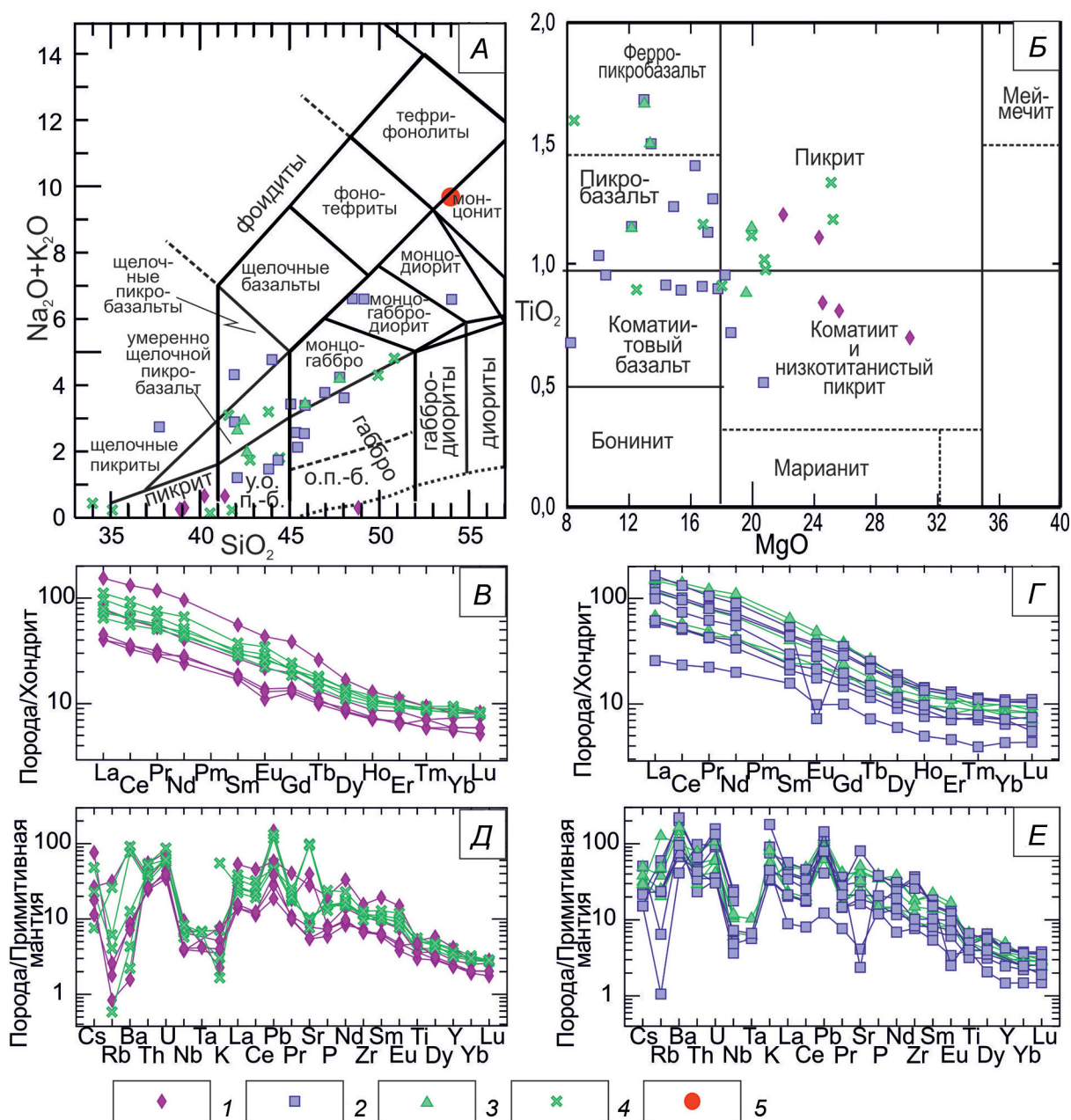


Рис. 4. Геохимические диаграммы для пород краснохитинского комплекса: А – $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (TAS [7, 14]), сокращения: у.о. п.-б. – ультраосновной пикробазальт, о.п.-б. – основной пикробазальт; Б – $\text{TiO}_2 - \text{MgO}$, по [5]; В, Г – хондрит-нормализованные спектры РЗЭ, по [17]; Д, Е – спайдер-диаграммы элементов-примесей, нормированных к примитивной мантии по [17]: 1 – пикриты; 2 – амфиболовые габбро, вогезиты, горнблендиты; 3 – амфибол-порфировые габбро-долериты; 4 – спессартиты; 5 – лейкократовые вогезиты

и хлорита, имеющих вторичное происхождение. Лампрофиры представлены двумя разновидностями: вогеzitами и спессартитами. В вогеzitах вытянутые фенокристаллы амфиболов погружены в основную массу, состоящую из ортоклаза и хлорита, а в спессартитах в основной массе преобладает хлорит. Амфиболовые габбро – полнокристаллические породы, сложенные идиоморфными кристаллами бурого, по краям зелёного амфиболов, аллотриоморфными зёрнами калиевого полевого шпата и редкими идиоморфными выделениями клинопироксена. В горнблендитах содержание амфиболов достигает 90%. Амфиболовые габбро и горнблендиты имеют

пойкилитовую структуру, в них включены мелкие кристаллы клинопироксена и серпентинизированного ортопироксена или оливина. В габброидах содержится много зёрен апатита призматического и игольчатого габитусов. Клинопироксены пикритов и амфиболовых габбро по составу отвечают авгиту (преобладает) и диопсиду. Амфибол габбро, спессартитов и горнблендитов представлен магнезиогастингситом. Шпинелиды горнблендитов на классификационной диаграмме $\text{Al}^{3+} - \text{Cr}^{3+} - \text{Fe}^{3+}$ [6] располагаются в поле субальюмоферрихромитов. Хлориты горнблендитов по составу отвечают кеммерит-пеннину или Cr-клинохлору.

Химический состав пород краснохтинского дайкового комплекса

Номера проб	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SiO ₂	39,1	48,8	34,0	35,1	41,4	45,4	49,2	42,4	41,8	44,4	41,9	38,9	42,6
TiO ₂	0,6	0,8	1,1	1,2	1,02	0,7	1,0	1,5	0,9	0,9	1,4	1,2	1,1
Al ₂ O ₃	9,6	4,4	12,8	12,7	11,3	10,5	14,6	13,6	12,3	13,0	13,4	11,8	10,9
Fe ₂ O ₃	2,9	3,2	4,6	5,7	1,8	3,9	2,1	5,6	2,8	4,4	5,5	3,0	3,8
FeO	5,4	3,9	7,5	7,5	5,4	5,7	6,3	4,7	6,0	4,9	4,5	6,5	6,0
MnO	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
MgO	27,9	24,8	23,1	22,8	22,4	18,0	7,4	13,0	17,5	12,1	12,9	20,5	19,2
CaO	6,4	10,7	8,6	5,3	8,0	10,0	7,5	12,9	14,1	14,7	12,7	10,9	10,0
K ₂ O	0,1	0,2	0,2	0,2	0,5	1,0	5,4	2,8	0,1	1,7	2,7	0,1	1,1
Na ₂ O	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	1,1	1,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,9
P ₂ O ₅	0,1	0,2	0,3	0,5	0,2	0,3	0,4	0,8	0,3	0,3	0,8	0,4	0,8
ппп	6,9	2,3	6,5	8,3	7,1	2,5	4,1	2,0	3,3	2,6	3,3	5,8	2,9
Сумм.	99,4	99, 6	99,2	99,5	99,3	99,4	99,3	99,5	99,4	99,4	99,5	99,3	99,3
V	165	208	280	230	166	174	244	208	200	213	250	210	199
Cr	577	814	781	1070	609	1197	461	133	610	701	408	911	893
Co	40	45	64,3	60,9	42,5	57	42	25	49,4	38	37	64,4	57,6
Ni	539	331	340	442	409	470	172	71	350,1	195	136	626,1	431
Ga	12,0	15,2	16,1	13,2	12,7	13,6	16,5	16,7	14,5	20,3	17,4	13,6	12,1
Rb	1,6	20	2,6	<2	<2	14,9	38	80	0,4	16,6	31	0,5	15,9
Sr	115	833	206	161	117	399	665	1068	2002	2084	1697	586,8	846
Y	10,6	12,9	18,5	н.о.	н.о.	11,2	19,4	17,2	16,5	14,3	19,3	18,9	22,2
Zr	82	118	129	142	74,2	111	411	166	108,8	132	383	174,5	200
Nb	2,8	4,7	5,0	5,9	2,9	3,7	17,6	8,4	6,0	4,1	16,5	6,8	8,0
Cs	0,6	0,2	0,2	н.о.	н.о.	0,2	0,2	0,2	<0,03	0,1	0,1	0,1	0,3
Ba	56	581	88,0	15,5	49,9	471	1405	1490	30,1	641	1532	10,9	505
La	9,6	18,4	17,2	26,4	10,7	14	29	28	23,0	18,8	27	36,6	36,3
Ce	20	38	39,7	57	22	31	62	59	47,8	39	59	80,6	85,5
Pr	2,7	5,0	5,1	7,1	2,8	4,0	7,9	7,4	6,3	5,4	7,6	11,2	11,5
Nd	11,2	19	22,5	31	13,2	15,8	34	31	24,1	21	32	44,7	51,2
Sm	2,6	4,1	4,9	5,7	2,7	3,2	6,9	6,1	4,7	4,3	6,7	8,5	9,8
Eu	0,6	1,3	1,7	2	0,8	1,0	2,2	1,9	1,5	1,3	2,0	2,5	2,8
Gd	2,6	4,0	4,3	5,0	2,7	3,0	6,2	4,9	4,5	3,8	5,9	7,9	7,4
Tb	0,4	0,5	0,7	0,7	0,4	0,4	0,8	0,7	0,6	0,5	0,8	1,0	1,0
Dy	2,1	2,7	3,5	3,5	2,3	2,3	4,3	3,5	3,0	2,8	4,1	4,3	4,6
Ho	0,40	0,5	0,7	0,6	0,4	0,4	0,8	0,7	0,6	0,5	0,8	0,7	0,8
Er	1,13	1,4	1,8	1,6	1,1	1,2	2,1	1,8	1,6	1,5	2,0	1,9	2,0
Tm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,18	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
Yb	1,1	1,2	1,6	1,5	1	1,1	1,9	1,7	1,4	1,40	1,8	1,4	1,7
Lu	0,2	0,2	0,2	0,2	0,15	0,2	0,3	0,2	0,2	0,21	0,26	0,2	0,2
Hf	2,0	2,8	3,8	3,7	2,1	2,7	11,4	4,1	3,1	3,2	10,5	4,9	5,9
Ta	н.о.	н.о.	0,3	0,3	0,2	н.о.	н.о	н.о	н.о	н.о	н.о	н.о	0,4
Pb	1,3	10,4	3,9	3,3	2,7	7,6	5,6	8,1	9,4	8,3	9,0	4,2	8,7
Th	2,1	2,9	3,5	4,4	2,2	3,9	5,5	6,6	4,6	3,22	5,6	4,7	4,7
U	0,9	1,3	1,2	1,3	0,8	1,9	3,3	2,2	1,8	1,4	2,8	1,6	1,3

Примечание. 1 – пикриты; 2 – пикробазальты; 3–5 – спессартиты; 6–7 – вогезиты; 8–11 – габбро; 12 – тремолитизированные габбро-долериты; 13 – габбро-долериты; оксиды, мас. %, микроэлементы, г/т, н.о. – не определялось.

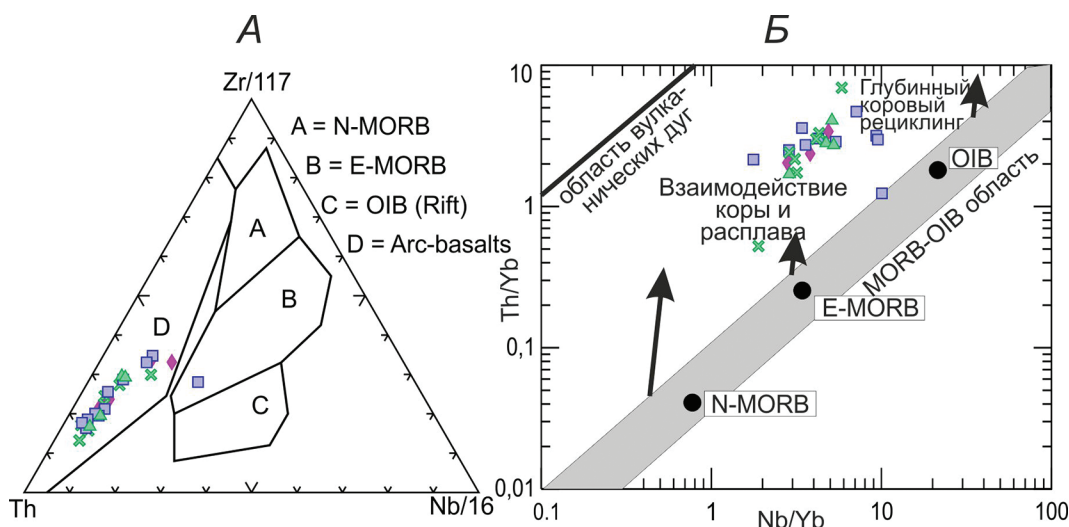


Рис. 5 Диаграммы Th-Zr/117-Nb/16, по [18], и Th/Yb - Nb/Yb, по [15], для пород краснохтинского дайкового комплекса; условн. обознач. см. рис. 4.

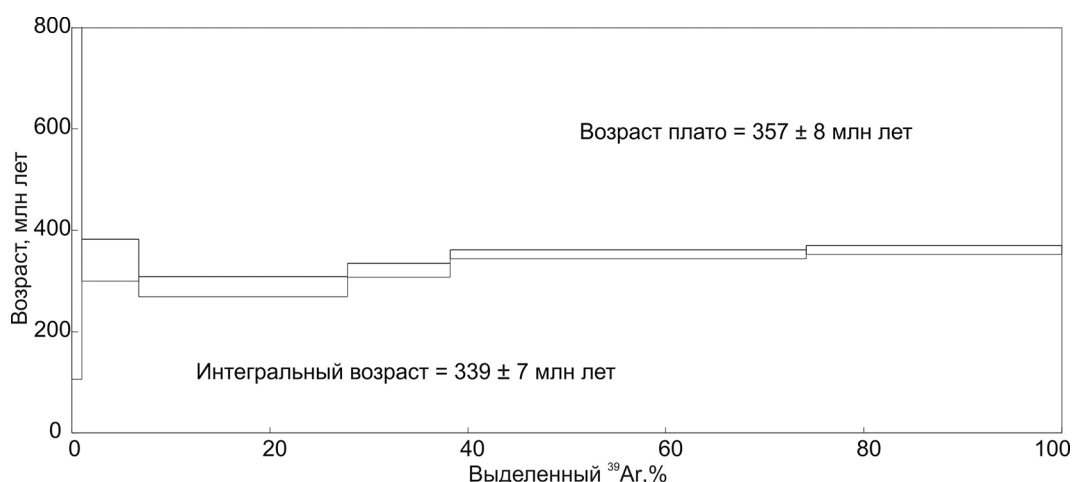


Рис. 6. Возрастные спектры для амфиболов из амфиболовых габбро краснохтинского комплекса по данным $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ анализа

По петрохимической классификации породы краснохтинского комплекса отвечают пикритам, умеренно-щелочным пикритам, пикробазальтам, габбро, монцогаббро, монцо-габбродiorитам, монцодиоритам и монцонитам (рис. 4, А). $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ варьирует от 0,1 в амфиболовых габбро и спессартитах до 16,4 в калиевошпатовых амфиболовых габбро. В сегрегациях среди амфиболовых габбро и горнблендитов обособляются лейкократовые вогезиты, состав которых отвечает монцонитам, с $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ — 39,6. Состав высокомагнезиальных ($\text{MgO} > 16\%$) пород с учётом содержаний TiO_2 варьирует от коматиитов и низкотитанистых пикритов до пикритов, коматиитовых базальтов и пикробазальтов (рис. 4, Б). Часть амфиболовых габбро, горнблендитов и спессартитов являются высококальциевыми породами с $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 > 1$.

Для амфиболовых калиевошпатовых габбро и вогезитов типичны высокие до 2084 г/т содержания Sr. В пробах 12 и 13 (таблица) отмечаются повышенные содержания РЗЭ. Породы имеют фракционированный характер распределения редкоземельных элементов, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ варьирует от 3,9 до 19. Спайдер-диаграммы для всех разностей демонстрируют яркий Ta-Nb минимум (рис. 4), который связан с надсубдукционным генезисом пород (рис. 5), а также с коровой контаминацией, значительный вклад которой демонстрирует диаграмма Th/Yb—Nb/Yb (см. рис. 5). Некоторые горнблендиты и лампрофиры отличаются повышенными содержаниями MgO, Cr, а по распределению элементов, дефициту K и LILE на спайдер-диаграммах имеют сходство с пикритами и, возможно, представляют продукт их метасоматического изменения. По ха-

рактору распределения редкоземельных и рассеянных элементов можно предположить, что породы разных групп в дайковом комплексе образованы в результате эволюции единого расплава.

Определения возраста комплекса было проведено $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом по бурому амфиболу из габбро, отобранному в точке 1631 (рис. 2) с координатами $54^{\circ}37'44,9''$ с.ш., $59^{\circ}40'40,7''$ в.д. Получено плато с возрастом 357 ± 8 млн. лет (рис. 6). Это значение соответствует раннему карбону (турнейский ярус), а с учётом доверительного интервала, возможно, и части фаменского века позднего девона.

Краснохтинский комплекс, согласно полученным данным, связан с каменноугольным этапом эволюции магматизма. Его возраст близок к времени формирования расположенных поблизости интрузий балбукского ранне—среднекаменноугольного комплекса, представленного монцодиоритами, сиенитами и лейкогранитами [1, 2, 4] (рис. 1). Эти два комплекса сближают присутствие таких разностей как монцодиориты и монцониты, а также связанная с обоими комплексами золотоносность. Присутствие лампрофиров в краснохтинском комплексе подтверждает данные о том, что лампрофиры, как правило, ассоциируют с золотоносными комплексами [16], широко распространёнными в данном районе.

В карбоне продолжала развиваться живущая с позднего девона активная континентальная окраи-

на Балтики. В её развитии большую роль играл раннекаменноугольный рифтогенный магматизм с формированием базальт-риолитовых толщ, коагматичных габбро-гранитных интрузий и базитовых даек [13]. Краснохтинский комплекс коррелируется с комплексом параллельных долеритовых даек Прииргизья (Зауральская мегазона), который связан с рифтогенными каменноугольными вулканогенными толщами [3]. Мафитовые и мафит-ультрамафитовые каменноугольные дайковые комплексы и малые интрузии широко распространены в центральной части Магнитогорской синформы [10].

Закключение

Полученные данные о составе и раннекаменноугольном возрасте краснохтинского комплекса свидетельствуют о том, что он не относится к ордовикским офиолитам. Дайки связаны с формированием каменноугольных интрузий балбукского комплекса, сложенных монцодиоритами, сиенитами и лейкогранитами. Образование краснохтинского комплекса происходило в раннем карбоне в обстановке растяжения при рифтогенном магматизме в тыловой части активной континентальной окраины.

Работа выполнена в соответствии с планами фундаментальных исследований ГИН РАН (государственное задание 0135-2019-0048).

ЛИТЕРАТУРА

1. Горюжанин В.М. Первичный изотопный состав строения в магматических комплексах Южного Урала // Магматизм и геодинамика / Под ред. В.А. Коротеева. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1998. С. 98–108.
2. Знаменский С.Е., Холоднов В.В., Даниленко С.А. Rb-Sr данные по околорудным метасоматитам месторождения золота Малый Каран (Южный Урал) // Геологический сборник № 11. Информационные материалы ИГ УНЦ РАН / Под ред. В.Н. Пучкова. Уфа: ДизайнПресс, 2014. С. 202–205.
3. Иванов С.Н., Семенов И.В., Червяковский Г.Ф. Рифтогенез предконтинентальной стадии развития Урала // Доклады АН СССР. 1984. Т. 274. № 2. С. 387–391.
4. Князев Ю.Г., Князева О.Ю., Сначев В.И., Жданов В.А., Каримов Т.Р., Айдаров З.М., Масагутов Р.Х., Арсланова З.Р. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000. Сер. Уральская. Лист N-40-Уфа. 3-е поколение. Объяснительная записка. СПб.: Карт. фабрика ВСЕГЕИ, 2013. 512 с.
5. Куликов В.С., Куликова В.В., Бычкова Я.В. О классификации ультраосновных-основных высокомагнетических вулканитов нормальной и низкой щелочности (новый взгляд на примере Фенноскандии) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Научное издание. Вып. 15 / Под ред. А.И. Голубева и В.В. Щипцова. Петрозаводск: ИГ КарНЦ РАН, 2012. С. 38–44.
6. Павлов Н.В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Тр. Ин-та геол. наук. Сер. Руд. месторожд. Вып. 103 № 3 / Под ред. И.Ф. Григорьева и Г.А. Соколова. М.: Изд-во АН СССР, 1949. 88 с.
7. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / Ред. О.А. Богатиков, А.Ф. Морозов, О.В. Петров. СПб: ВСЕГЕИ, 2009. 196 с.
8. Рязанцев А.В., Белова А.А., Разумовский А.А., Кузнецов Н.Б. Геодинамические обстановки формирования ордовикских и девонских дайковых комплексов из офиолитовых разрезов Южного Урала и Мугоджар // Геотектоника, 2012. № 2. С. 65–96.
9. Рязанцев А.В., Дубинина С.В., Кузнецов Н.Б., Белова А.А. Ордовикские структурно-формационные комплексы в аллохтонах Южного Урала // Геотектоника. 2008. № 5. С. 49–78.
10. Салихов Д.Н., Холоднов В.В., Осипова Т.А., Рахимов И.Р. Каменноугольно-пермский магматизм и связанное с ним оруденение (Магнитогорская и Восточно-Уральская мегазоны Южного Урала) // Литосфера. 2016. № 5. С. 35–57.
11. Семенов И.В. Палеоокеанический спрединговый вулканизм Урала и реконструкция параметров Уральского палеозойского океана. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2000. 362 с.
12. Тевелев Ал.В., Тихомиров П.Л., Дегтярев К.Е., Кошелева И.А., Мосейчук В.М., Правикова Н.В., Сурин Т.Н. Геодинамические обстановки формирования каменноугольных вулканических комплексов Южного Урала и Зауралья // Очерки по региональной тектонике. Т. 1. Южный Урал. Тр. ГИН РАН, вып. 561 / Под ред. С.В. Руженцева и К.Е. Дегтярева. М.: Наука, 2005. С. 213–247.
13. Ферштатер Г.Б. Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 368 с.
14. Шарпенко Л.Н., Костин А.Е., Кухаренко Е.А. TAS-диаграмма сумма щелочей — кремнезем для химической классификации и диагностики плутонических пород // Региональная геология и металлогения. 2013. № 56. С. 40–50.
15. Pearce J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // Lithos. 2008. Vol. 100. P. 14–48.
16. Rock N.M.S., Groves, D., Perring C., Golding S. Gold, lamprophyres, and porphyries: What does their association mean? // Economic Geology Monograph. 1989. N 6. P. 609–625.

17. Sun S.S. and McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. // *Magmatism in the ocean basins* / Ed. A.D Saunders & M.J. Norry. Geological Society of London. London, Special Publications. 1989. Vol. 42. P. 313–345.
 18. Wood D.A. The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province // *Earth and Planetary Science Letters*. 1980. Vol. 50. P. 11–30.
- REFERENCES
1. Gorozhanin V.M. Primary isotopic composition of strontium in magmatic complexes of the southern Urals. *Magmatism and geodynamics* / Eds. V.A. Koroteyev. Ekaterinburg, IGG UB RAS Publ., 1998, pp. 98–108. (in Russian).
 2. Znamensky S.E., Holodnov V.V., Danilenko S.A. [Rb–Sr data on the wall-rock alteration of the gold deposit Maly Karan (the Southern Urals)]. *Geological collected articles No. 11. Information materials IG UFRS RAS* / Eds. V.N. Puchkov, Ufa, DesignPress Publ., 2014, pp. 202–205. (in Russian).
 3. Ivanov C.N., Semyonov I.V., Chervyakovsky G.F. Rifting of the pre-continental stage of development of the Urals. *DAN USSR*, 1984, Vol. 274, no 2, pp. 387–391. (in Russian).
 4. Knyazev Yu.G., Knyazeva O.Yu., Snachev V.I., Zhdanov V.A., Karimov T.R., Masagutov R.H., Arslanova Z.R. *State geological map of the Russian Federation. 1:1 000 000. The Ural Series. Sheet N-40-Ufa. The 3rd generation. Explanatory memorandum*. St. Petersburg, Cart. factory VSEGEI Publ., 2013, 512 p. (in Russian).
 5. Kulikov V.S., Kulikova V.V., Bychkova Ya.V. On the classification of ultramafic-mafic high-Mg normal-and low-alkali volcanics: a new approach with examples from Fennoscandia. *Geology and useful minerals of Karelia*. Iss. 15 / Eds. A.I. Golubev and V.V. Shiptsov. Petrozavodsk, KarRC RAS Inst. of geology Publ., 2012, pp. 38–44. (in Russian).
 6. Pavlov N.V. Chemical composition of chrome spinel in connection with the petrographic composition of rocks of ultrabasic intrusions. *Proc. of the Inst. of Geology. The ore deposit ser.* Iss. 103. N 3 / Eds. I.F. Grigoryev and G.A. Sokolov. M., Acad. Sci. USSR Publ., 1949, 88 p. (in Russian).
 7. *Petrographic code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations* / Eds. O.A. Bogatkov, A.F. Morozov., O.V. Petrov. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2012, 196 p. (in Russian).
 8. Ryazantsev A.V., Belova A.A., Razumovsky A.A., Kuznetsov N.B. Geodynamic formation settings of Ordovician and Devonian dike complexes in ophiolitic sections of the Southern Urals and Mugodzhary. *Geotectonics*, 2012, vol. 46, no. 2, pp. 142–169 (in Russian).
 9. Ryazantsev A.V., Dubinina S.V., Kuznetsov N.B., Belova A.A. Ordovician lithotectonic complexes in allochthons of the Southern Urals, *Geotectonics*, 2008, vol. 42, no 5, pp. 368–395. (in Russian)
 10. Salikhov D.N., Holodnov V.V., Osipova T.A., Rakhimov I.R. Carboniferous-Permian magmatism and associated mineralization (Magnitogorsk and East Uralian megazones Southern Urals). *Lithosfera*, 2016, no 5, pp. 35–57. (in Russian).
 11. Semyonov I.V. *The Urals paleoceanic spreading volcanism and the reconstruction of the Urals pleozoic ocean parameters*. Ekaterinburg, IGG UB RAS Publ., 2000, 362 p. (in Russian).
 12. Tevelev A.V., Degtyarev K.E., Tikhomirov P.L., Kosheleva I.A., Kosarev A.M., Moseichuk V.M., Pravikova N.V., Surin T.N. Geodynamic settings of the Carboniferous volcanic complexes of the Southern Urals and Zauralie. *Essays on the regional tectonics. Vol. 1. Southern Urals*. Proc. of the Geological Inst, vol. 561 / Eds. S.V. Ruzhentsev and K.E. Degtyarev. M., Nauka Publ., 2005, pp. 213–247. (in Russian)
 13. Fershtater G.B.: *Paleozoic Intrusive Magmatism of the Middle and South Urals*. Ekaterinburg, RIO UB RAS Publ., 2013, 368 p. (in Russian)
 14. Sharpenok L.N., Kostin A.E., Kukharensko E.A. TAS — the Total Alkali — Silica Diagram for chemical classification and diagnosis of plutonic rocks. *Regional Geology and metallogeny*, 2013, no 56, pp. 40–50. (in Russian)
 15. Pearce J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 2008, vol. 100, pp. 14–48.
 16. Rock N.M.S., Groves, D., Perring C., Golding S. Gold, lamprophyres, and porphyries: What does their association mean? *Economic Geology Monograph*. 1989, no 6, pp. 609–625.
 17. Sun S.S. and McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the ocean basins* / Ed. A.D Saunders & M.J. Norry. Geological Society of London. London, Special Publications, 1989, vol. 42, pp. 313–345.
 18. Wood D.A. The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, vol. 50, pp. 11–30.

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ
HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

УДК 518:556.33.04

О ВОССТАНОВЛЕНИИ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПОСЛЕ ОТКАЧЕК
ИЗ СЛОИСТЫХ ВОДОНОСНЫХ СИСТЕМ С ПЕРЕТЕКАНИЕМ

М.М. БУРАКОВ, В.Г. БУРКУШ, М.М. ТЫНБАЕВ

*ТОО НППФ «КазГИДЭК»,
43а, ул. Мынбаева, г. Алматы, 050001, Казахстан
e-mail: michael.burakov@gmail.com*

Проанализированы закономерности восстановления пьезометрического уровня подземных вод в опробуемом водоносном горизонте слоистой водоносной системы с перетеканием воды из смежного горизонта после остановки опытной откачки; сформирована и проанализирована физико-математическая модель восстановления пьезометрического уровня. Показано, что восстановление уровня осуществляется точно так же, как и после остановки откачки из напорного изолированного водоносного горизонта. Иными словами, предполагается, что откачка с постоянным дебитом продолжается и после её остановки, а в момент остановки через скважину, из которой осуществляется откачка, начинается нагнетание воды в опробуемый водоносный горизонт с тем же постоянным дебитом. В результате дебит возмущения становится равным нулю, и уровень подземных вод в опробуемом горизонте восстанавливается до невозмущённого положения. В дополнение к этому при опытно-фильтрационном опробовании слоистых систем с перетеканием формирующийся при нагнетании поток подземных вод, направленный из опробуемого горизонта в смежный, полностью «запирает» сформировавшийся при откачке поток подземных вод, перетекающих из смежного горизонта в опробуемый. Соответственно обработка и интерпретация результатов прослеживания восстановления уровня должны выполняться в полном соответствии с имеющимися методическими рекомендациями.

Ключевые слова: слоистая водоносная система; перетекание подземных вод; опытная откачка; восстановление пьезометрического уровня; геофильтрационные параметры.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-3-51-63

ON THE RESTORATION OF THE LEVEL OF UNDERGROUND WATER
AFTER WITHDRAWAL FROM THE LAYERED AQUIFERS WITH OVERFLOW

M.M. BURAKOV, V.G. BURKUSH, M.M. TYNBAYEV

*LP RPDC «KazGIDEK»
of. 506 , 43a, ul. Mynbaeva, Almaty 050008, The Republic of Kazakhstan
e-mail: michael.burakov@gmail.com*

The patterns of restoration of the piezometric level of groundwater in the aquifer under test in a layered aquifer system with the overflow of water from the adjacent horizon after stopping the experimental constant-rate pumping tests, have been analyzed; the physico-mathematical model of piezometric level restoration has been formed and analyzed. It has been shown that the restoration of the level is carried out in the same way as after stopping the pumping from a pressure isolated aquifer. In other words, it has been assumed that pumping with a constant flow rate continues even

after it has been stopped, and at the time of self-stopping through the well from which the pumping is performed, water is pumped into the test aquifer with the same flow rate. As a result, the disturbance flow rate becomes zero, and the groundwater level in the tested horizon is restored to an unperturbed position. In addition to this, during test filtration testing of layered systems with overflow, the groundwater flow formed during the injection, directed from the tested horizon to the adjacent one, completely “locks” the groundwater flow formed during the pumping out of the adjacent horizon to the tested one. Accordingly, the processing and interpretation of the results of tracking the recovery level should be carried out in full compliance with the existing methodological recommendations.

Key words: layered aquifer system; groundwater overflow; experimental constant-rate pumping tests; restoration of the piezometric level; geofiltration parameters.

Далеко не редки случаи опытно-фильтрационного опробования (ОФО) опытными кустовыми откачками слоистых водоносных толщ с перетеканием подземных вод (ПВ) в опробуемый водоносный горизонт из смежного через слабопроницаемый разделяющий слой. Имеется и значительное число методик и способов интерпретации результатов такого ОФО, обеспечивающих обработку результатов прослеживания уровня в наблюдательных скважинах опытных кустов, состоящих из любого их числа, вскрывших либо только тот же опробуемый горизонт, что и возмущающая скважина, либо также и смежный горизонт, из которого происходит перетекание ПВ в опробуемый горизонт. При этом программа наблюдений за уровнем ПВ при откачках очень часто включает, в том числе, и наблюдения за восстановлением уровня в возмущающей и наблюдательных скважинах опытных кустов после остановок откачек.

В настоящее время не существуют методики интерпретации результатов прослеживания восстановления уровня ПВ после завершения опытных откачек в условиях перетекания ПВ из смежных горизонтов. Соответственно весь объём информации о закономерностях восстановления уровня не используется.

Такое положение определяется существующей неопределенностью в физико-математическом представлении восстановления уровня ПВ в опробуемом водоносном горизонте после остановки опытной откачки в условиях перетекания ПВ. Так, для условий восстановления уровня ПВ после откачки из изолированного напорного водоносного горизонта такая интерпретация достаточно проста и понятна. В соответствии с ней полагается, что откачка с постоянным дебитом продолжается и после её остановки, а в момент остановки через скважину, из которой осуществляется откачка, начинается нагнетание воды в водоносный горизонт с тем же постоянным дебитом. В результате дебит возмущения становится равным нулю, и уровень ПВ в опробуемом водоносном горизонте восстанавливается [1, 16, 25]. Аналогичная интерпретация восстановлению уровня после опытной откачки, проводившейся с переменным дебитом, изменяющимся по закону, выраженному гладкой функцией, предложена и апробирована в [2, 5, 6].

Указанная ранее неопределенность в интерпретации процесса восстановления уровня ПВ в усло-

виях их перетекания в опробуемый водоносный горизонт из смежного обусловлена именно наличием процесса перетекания, который накладывается на процесс фильтрации ПВ в опробуемом водоносном горизонте. Возможность учёта этих особенностей фильтрации ПВ в слоистой толще с перетеканием в модели восстановления уровня до настоящего времени попросту не рассматривалась. Соответственно в настоящей работе предпринята попытка построения такой модели и методики интерпретации опытных данных.

Исходная физико-математическая модель фильтрации подземных вод в слоистых водоносных системах с перетеканием

Обоснование модели восстановления уровня воды в скважинах опытного куста после остановки опытной откачки, проведённой с постоянным дебитом в условиях перетекания ПВ в опробуемый водоносный горизонт из смежного, требует хотя бы краткого рассмотрения исходной модели фильтрации ПВ в слоистой толще.

Положим, что два проницаемых слоя — водоносных горизонта, ПВ в которых имеют исходные напоры H_1^0 и H^0 , разделены толщей слабопроницаемых отложений мощностью m_0 . Фильтрационный поток через эту толщу, согласно предпосылке Гириного-Мятеева [11, 14], вертикальный; соотношение напоров, например $H_1^0 > H^0$, предполагает наличие нисходящего потока со скоростью v_z . В этом случае в стационарных условиях распределение напора в слабопроницаемых отложениях линейно [15]:

$$h_z = H_1^0 + \frac{H^0 - H_1^0}{m_0} z,$$

где h_z — напор в произвольной точке слабопроницаемой толщи на глубине z от её кровли.

Необходимо обратить внимание на следующее. Представленная схема взаимодействия водоносных горизонтов для простоты изложения предполагает их горизонтальное залегание. Понятно, что в общем случае, при наклонном залегании слоёв, напоры в них отсчитываются от единой для их всех плоскости сравнения, определяющей энергию положения.

Исходная система уравнений фильтрации ПВ в водоносных горизонтах и слабопроницаемых раз-

деляющих слоях анализировалась во многих работах (обзор их можно найти, в том числе, в работах одного из авторов [3, 4, 7–9, 12, 13, 15–17, 19, 21–24, 27]). При каждой ссылке на эти уравнения приводить перечень публикаций по этой проблеме (к тому же далеко не полный) представляется нецелесообразным. Поэтому в дальнейшем изложении эти уравнения будут даваться без ссылок на литературные источники, при этом очевидно подразумевается, что уравнения выведены не авторами, а взяты из соответствующих источников.

При возмущении одного из водоносных горизонтов (в нашем случае — нижнего) реагирует вся система. В общем случае уравнение упругого режима фильтрации в напорном горизонте, из которого производится откачка, имеет следующий вид:

$$T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial H(r, t)}{\partial r} \right) + v_z = \mu^* \frac{\partial H(r, t)}{\partial t}. \quad (1)$$

Здесь $H(r, t)$ — напор в нижнем (опробуемом) горизонте на расстоянии r от оси возмущающей скважины в момент времени t от начала возмущения, далее будет обозначаться как H ; T и μ^* — соответственно водопроводимость и упругая ёмкость нижнего слоя; $T = Km$; K и m — соответственно коэффициент фильтрации и мощность опробуемого горизонта. Остальные обозначения прежние.

Реакция в смежном водоносном горизонте может проявляться двояко: 1) на протяжении возмущения снижение напора в смежном горизонте не наблюдается; 2) в процессе возмущения фиксируется снижение напора в нём. Во втором случае уравнение движения в смежном (верхнем) проницаемом слое будет иметь вид:

$$T_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial H_1(r, t)}{\partial r} \right) - v_z = \mu_1 \frac{\partial H_1(r, t)}{\partial t},$$

где $H_1(r, t)$ — напор в произвольной точке верхнего (смежного с опробуемым) слоя в момент времени t от начала возмущения, далее будет обозначаться, как H_1 ; T_1 и μ_1 — соответственно водопроводимость и ёмкость смежного слоя; $T_1 = K_1 m_1$; K_1 и m_1 — коэффициент фильтрации и мощность смежного с опробуемым водоносного горизонта.

В большинстве работ, в которых рассматриваются задачи фильтрации в слоистых системах, режим фильтрации в разделяющих слабопроницаемых слоях принимается жёстким, так что скорость фильтрации в этих слоях определяется выражением

$$v_z = k_z \frac{H - H_1}{m_0}. \quad (2)$$

Здесь k_z — коэффициент фильтрации слабопроницаемого разделяющего слоя. Остальные обозначения прежние.

Впоследствии было обращено внимание на существенное проявление упругого режима фильтрации в разделяющих слоях. В этом случае уравнение (1) должно решаться с учётом следующего выражения для скорости на границе водоносного горизонта и слабопроницаемой толщи:

$$v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{z=m_0},$$

где h — напор в разделяющих слабопроницаемых отложениях в назначенном горизонтальном сечении на глубине z от их кровли. При этом уравнение упругого режима фильтрации в разделяющем слое имеет вид:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \chi_0 \frac{\partial^2 h}{\partial z^2}.$$

Здесь χ — пьезопроводность разделяющего слоя.

Обычно при проведении ОФО опытной кустовой откачкой напорного водоносного горизонта для определения параметров этого горизонта, а также и параметров слабопроницаемых разделяющих отложений, используются данные о снижении уровня ПВ преимущественно в опробуемом горизонте, на него оборудуются скважины опытного куста. В этом случае уравнение (1) после очевидных и несложных преобразований с учётом, например, (2), обычно записывается в виде:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial H}{\partial r} \right) + b^2 (H - H_1) = \frac{1}{\chi} \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (3)$$

$$b = \sqrt{\frac{k_z}{m_0 T}},$$

где χ — пьезопроводность нижнего (опробуемого) слоя, $\chi = \frac{T}{\mu^*}$; b — коэффициент перетекания¹.

Остальные обозначения прежние.

Важно отметить, что все приведенные решения уравнения (3) и его аналогов ориентированы на обработку и интерпретацию данных прослеживания исключительно снижения пьезометрического уровня в скважинах опытного куста на этапе откачки. Работы, в которых были бы изложены результаты исследований процесса восстановления

¹ В одной из исходных статей Хантуша [21], в которой дано теоретическое обоснование схем фильтрации с перетеканием через разделяющие слабопроницаемые отложения и решения задач о притоке ПВ к скважинам в слоистых водоносных системах, если судить по переводу этой статьи в [9], параметр $B = \frac{1}{b}$ обозначается как *фактор перетекания*; эта величина используется в зарубежной литературе повсеместно. В отечественной методической литературе в качестве меры интенсивности перетока ПВ через слабопроницаемые разделяющие толщи часто используется *коэффициент перетекания*, определяемый вторым уравнением в (3). Очевидно, что смешивание этих понятий, как и терминов, используемых для их обозначения, принципиально недопустимо.

пiezометрического уровня в водоносных горизонтах в условиях перетекания в них ПВ, автору не известны.

Модель восстановления уровня подземных вод в слоистой системе с перетеканием

В соответствии с современными представлениями прекращение откачки или выпуска (при самоизливе ПВ) и последующее восстановление уровня ПВ является возмущением, которое может рассматриваться как самостоятельный опыт или стадия одного опыта [1]. Обработка этой второй стадии отличается некоторой спецификой по сравнению с обработкой первой стадии — собственно откачки. Прежде всего это относится к необходимости учёта «наследства» первой стадии опыта, которое по существу заключается в нахождении правильного уровня отсчёта повышений.

Как отмечалось, процессу восстановления уровня ПВ после откачки из изолированного напорного водоносного горизонта имеется достаточно простая и понятная интерпретация. В соответствии с ней полагается, что откачка с постоянным дебитом Q продолжается и после её остановки, а в момент остановки через скважину, из которой осуществляется откачка, начинается нагнетание воды в водоносный горизонт с тем же постоянным дебитом Q . В результате дебит возмущения становится равным нулю, и уровень ПВ в опробуемом водоносном горизонте восстанавливается до невозмущённого положения [1, 16, 25].

Рассмотрим этот процесс и его физико-математическую модель как аналог модели восстановления уровня ПВ после остановки откачки из слоистой толщи с перетеканием подробнее.

Как это рассматривалось в многочисленных публикациях (сошлёмся здесь лишь на учебники по динамике ПВ [12, 19]), фильтрация ПВ в изолированном изотропном напорном водоносном горизонте в отсутствие инерционной составляющей движению жидкости (ПВ) описывается дифференциальным уравнением эллиптического типа, записанным в понижениях уровня, вида:

$$T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S(r, t)}{\partial r} \right) = \mu^* \frac{\partial S(r, t)}{\partial t}. \quad (4)$$

Здесь $S(r, t)$ — понижение piezометрического уровня ПВ в опробуемом водоносном горизонте на расстоянии r от оси возмущающей скважины в момент времени t от начала возмущения относительно исходного H^0 (очевидно, что $S(r, t) = H^0 - H(r, t)$), далее понижение уровня будет обозначаться, как S . Остальные обозначения прежние.

Применительно к откачке ПВ из водоносного горизонта с постоянным дебитом Q уравнение (4) должно решаться при следующих граничных и начальных условиях:

$$\begin{aligned} S(r, t)|_{r \rightarrow \infty} &= 0, \\ 2\pi Tr \frac{\partial S}{\partial r} \Big|_{r=r_0} &= -Q, \quad S(r, 0) = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где r_0 — радиус возмущающей скважины.

Решение этой задачи впервые получено Тейсом [28]; оно имеет вид

$$S = \frac{Q}{4\pi T} E_1(-u), \quad u = \frac{r^2}{4\chi t}, \quad (6)$$

где $E_1(-u)$ — интегральная показательная функция (интегральный экспоненциал) [18]. Уравнение (6) имеет логарифмическое асимптотическое представление [1, 12, 13, 16, 17, 19, 20, 26]

$$S = \frac{0,183Q}{T} \lg \frac{2,25\chi t}{r^2} \quad \text{при} \quad \frac{r^2}{4\chi t} \leq 0,1, \quad (7)$$

которое и используется обычно для обработки и интерпретации результатов опытных откачек и выпусков.

Уравнения (6) и (7), представляющие решение исходного уравнения фильтрации (4) при условиях (5), описывают непосредственно только процесс откачки ПВ, на который необходимо наложить процесс нагнетания ПВ в водоносный горизонт через ту же возмущающую скважину. Соответственно исходное уравнение (4) с условиями (5), строго говоря, не описывает процесс нагнетания.

Это обусловлено также и свойствами эллиптического уравнения фильтрации вида (4). В частности, такое уравнение в принципе не может описывать знакопеременное движение ПВ. Поэтому задача нагнетания ПВ в водоносный горизонт на этапе восстановления уровня должна формулироваться как полностью независимая самостоятельная задача, а описание процесса нагнетания — строиться точно так же, как и для описания собственно откачки, т. е. с записи дифференциального уравнения фильтрации ПВ и системы граничных и начальных условий, определяющих особенности задачи.

Нетрудно видеть, что фильтрация ПВ в изолированном изотропном напорном водоносном горизонте в отсутствие инерционной составляющей движению жидкости описывается дифференциальным уравнением эллиптического типа, записанным в повышениях уровня:

$$T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial r} \right) = \mu^* \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial t}. \quad (8)$$

² Понятно, что и исходные дифференциальные уравнения фильтрации ПВ в этом случае записываются в понижениях уровня.

Здесь $S^{**}(r, t)$ — повышение пьезометрического уровня ПВ в опробуемом водоносном горизонте на расстоянии r от оси возмущающей скважины в момент времени t от начала нагнетания относительно исходного H^0 , далее повышение уровня будет обозначаться, как S^{**} . Применительно к нагнетанию ПВ в водоносный горизонт с постоянным дебитом Q уравнение (8) должно решаться при следующих граничных и начальном условиях, практически полностью совпадающих с условиями из (5):

$$S^{**}(r, t)|_{r \rightarrow \infty} = 0, \quad 2\pi T r \frac{\partial S^{**}}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = Q, \quad S^{**}(r, 0) = 0. \quad (9)$$

Решение уравнения (8) с учётом условий из (9) имеет вид, полностью аналогичный (6):

$$S^{**} = \frac{Q}{4\pi T} E_1 \left(-\frac{r^2}{4\chi t} \right), \quad (10)$$

с той же асимптотой вида (7) —

$$S^{**} = \frac{0,183 Q}{T} \lg \frac{2,25 \chi t}{r^2} \text{ при } \frac{r^2}{4\chi t} \leq 0,1. \quad (11)$$

Здесь все обозначения прежние.

Полное дифференциальное уравнение фильтрации ПВ в опробуемом водоносном горизонте на этапе восстановления их пьезометрического уровня (время в этом случае отсчитывается от момента t_0 остановки откачки) с учётом принципа суперпозиции записывается в виде:

$$T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial r} \right) - T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S(r, (T+t))}{\partial r} \right) = \\ = \mu^* \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial t} - \mu^* \frac{\partial S(r, (T+t))}{\partial t}, \quad (12)$$

или

$$T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial r} \right) - T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S(r, (T+t))}{\partial r} \right) = \\ = \mu^* \frac{\partial S^*(r, t)}{\partial t}, \quad (13)$$

где T — продолжительность откачки от её начала до назначенного момента времени t_0 её остановки; $S^*(r, t) = S^{**} - S$ — повышение пьезометрического уровня ПВ в опробуемом горизонте на расстоянии r от возмущающей скважины в момент времени t от начала восстановления уровня относительно максимального понижения уровня на момент остановки откачки, далее повышение уровня будет обозначаться как S^* .

Соответственно асимптотическое представление решения уравнения (13), являющееся алгебра-

ической суммой частных решений — уравнений (7) и (11), имеет окончательно вид:

$$S^* = \frac{0,183 Q}{T} \lg \frac{T+t}{t}. \quad (14)$$

Именно это уравнение используется как основа для обработки и интерпретации результатов прослеживания восстановления пьезометрического уровня ПВ в изолированном напорном водоносном горизонте после остановки откачки, проводившейся с постоянным дебитом Q [1, 17, 25].

Перейдем теперь к физико-математической модели восстановления пьезометрического уровня ПВ в опробуемом водоносном горизонте слоистой толщи с перетеканием, отталкиваясь от уже рассмотренной выше.

Совершенно аналогично предыдущей задаче запишем уравнение фильтрации ПВ в опробуемом водоносном горизонте вида (3) в понижениях следующим образом:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S}{\partial r} \right) - b^2 (S - S_1) = \frac{1}{\chi} \frac{\partial S}{\partial t}, \quad (15)$$

где $S_1(r, t)$ — понижение пьезометрического уровня ПВ в смежном с опробуемым водоносном горизонте на расстоянии r от оси возмущающей скважины в момент времени t от начала возмущения, далее понижение уровня будет обозначаться, как S_1 . Остальные обозначения прежние.

В силу обратимости процессов откачки и нагнетания дифференциальное уравнение фильтрации ПВ эллиптического типа, описывающее их нагнетание в опробуемый водоносный горизонт с учётом перетока воды из опробуемого в смежный водоносный горизонт, в отсутствие инерционной составляющей движению жидкости, записанное в повышениях уровня, имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial r} \right) - b^2 (S^{**}(r, t) - S_1^{**}(r, t)) =$$

$$= \frac{1}{\chi} \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial t}, \quad (16)$$

где $S_1^{**}(r, t)$ — повышение пьезометрического уровня ПВ в смежном с опробуемым горизонте на расстоянии r от оси возмущающей скважины в момент времени t от начала возмущения относительно исходного H_1^0 , далее повышение уровня будет обозначаться, как S_1^{**} .

Очевидно, что, как и в предыдущем случае, полное дифференциальное уравнение фильтрации ПВ в опробуемом водоносном горизонте слоистой водоносной системы с перетеканием на этапе восстановления их пьезометрического уровня (время в этом случае отсчитывается от момента t_0 остановки откачки) на основе принципа суперпозиции записывается в виде

$$\begin{aligned} & T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial r} \right) - T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S(r, (T + t))}{\partial r} \right) - \\ & - b^2 (S^{**}(r, t) - S_1^{**}(r, t)) + \\ & + b^2 (S(r, (T + t)) - S_1(r, (T + t))) = \\ & = \mu^* \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial t} - \mu^* \frac{\partial S(r, (T + t))}{\partial t}, \end{aligned} \quad (17)$$

где все обозначения прежние.

Из уравнения (17) отчетливо следует, что формирующееся с началом нагнетания перетекание ПВ из опробуемого водоносного горизонта в смежный должно либо полностью «запирать» уже сформировавшийся к моменту остановки откачки переток ПВ из смежного горизонта в опробуемый, либо многократно его уменьшить. Это обстоятельство четко отражает алгебраическая сумма третьего и четвертого слагаемых в левой части выражения (17), которая с высокой вероятностью:

$$\begin{aligned} & -b^2 (S^{**}(r, t) - S_1^{**}(r, t)) + \\ & + b^2 (S(r, (T + t)) - S_1(r, (T + t))) \cong 0 \end{aligned}$$

А тогда уравнение (17) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} & T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S^{**}(r, t)}{\partial r} \right) - T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial S(r, (T + t))}{\partial r} \right) = \\ & = \mu^* \frac{\partial S^*(r, t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (18)$$

полностью идентичном виду уравнения в (13).

Как показано, например, в работе [23], система дифференциальных уравнений фильтрации ПВ в опробуемом водоносном горизонте (15) и (16), следовательно, и (18) должны решаться при тех же граничных и начальных условиях для этого горизонта, что и представленные в (5) и (9). Таким образом, мы имеем задачу, полностью идентичную задаче восстановления пьезометрического уровня в изолированном напорном водоносном горизонте после остановки откачки с постоянным дебитом, рассмотренную выше. А раз так, то и решение этой задачи может быть представлено как алгебраическая сумма частных решений вида (6) и (10) с их асимптотическими представлениями (7) и (11). Соответственно асимптотическое представление решения уравнения (18) должно быть полностью идентично выражению (14).

Иными словами, восстановление пьезометрического уровня ПВ в скважинах опытного куста после остановки откачки, проводимой из водоносного горизонта в условиях перетекания воды в него из смежного горизонта, происходит аналогично таковому при откачке с постоянным дебитом из напорного изолированного водоносного горизонта. Восстановление уровня описывается тем же асимптотическим представлением решения задачи вида (14), а обработка и интерпретация ре-

зультатов прослеживания уровня должны выполняться с использованием методических рекомендаций из [1, 13, 17].

Обработка и интерпретация результатов опытной кустовой откачки из слоистой водоносной системы с перетеканием

Рассмотрим обработку и интерпретацию результатов прослеживания восстановления пьезометрического уровня ПВ в скважинах опытного куста на примере опытной кустовой откачки на участке проектируемого производственно-технического водозабора строящегося рудника на урановом месторождении Жалпак в Туркестанской области Южного Казахстана, приуроченного к северо-восточному пологому борту Шу-Сарысусской депрессии на границе с Казахским мелкосопочником [10]. Здесь продуктивный водоносный коньяк-сантонский (инкудукский) горизонт [K_2sn (in)] практически на всей площади своего распространения является напорным и по отношению к участку разведки ПВ прослеживается на значительные расстояния. Для оценки его геофильтрационных параметров выполнено ОФО — опытная кустовая откачка. В качестве возмущающей, центральной, скважины опытного куста использовалась скважина № 8058 (2ц), а в качестве наблюдательных — скважины № 8059 (1ю) и № 8060 (3н).

Опытный куст конструктивно выполнен как однолучевой. Расстояние от центральной скважины № 8058 (2ц) до первой наблюдательной № 8059 (1ю) r_1 составляет 25,80 м, а до второй наблюдательной № 8060 (3н) — $r_2 = 71,20$ м. Продуктивный инкудукский горизонт, представленный разнотекстурными песками с гравием и галькой, вскрыт скважинами опытного куста в интервале глубин 150—180 м. В кровле водоносного горизонта залегает толща плотных глин мощностью более 10 м, отделяющая инкудукский горизонт от рудного жалпакского, а в подошве — слой плотных глин мощностью до 2,5 м, являющихся кровлей подстилающего мынкудукского горизонта. Центральная скважина оборудована фильтром КДФ 118 диаметром $D = 118$ мм (соответственно радиусом $r_0 = 0,060$ м) и длиной $l = 20$ м; фильтр установлен в интервале глубин 160—180 м. Аналогично оборудованы и наблюдательные скважины опытного куста.

Опытная откачка общей продолжительностью $T = 96$ ч проводилась при постоянном дебите, среднее значение которого составило $Q = 2,36$ дм³/с (8,48 м³/ч или 203,6 м³/сут.). По завершении откачки еще на протяжении 24 ч производились наблюдения за восстановлением уровня ПВ в возмущающей и наблюдательных скважинах опытного куста.

На рис. 1 представлены индикаторные кривые временного прослеживания снижения пьезометрического уровня в скважинах опытного куста.

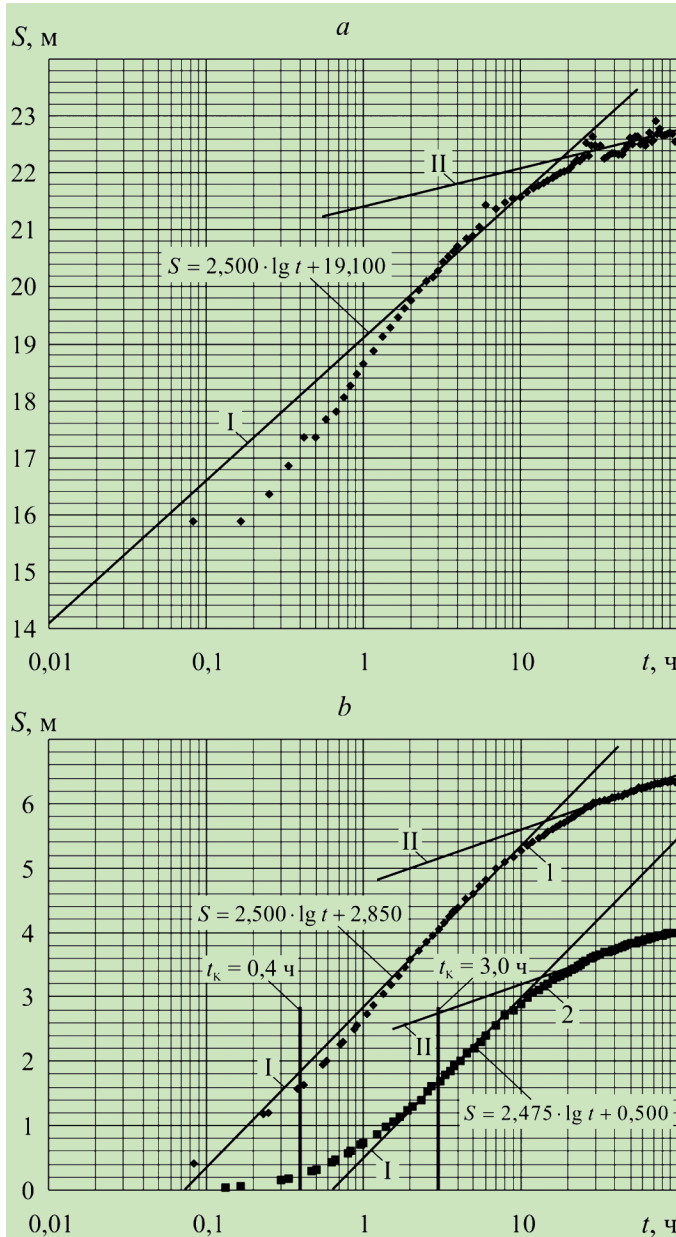


Рис. 1. Индикаторные графики временного прослеживания понижения пьезометрического уровня подземных вод в центральной (а) и наблюдательных (б) скважинах опытного куста при откачке: 1, 2 — измеренные значения понижения уровня соответственно в наблюдательных скважинах № 8059 (1ю) и № 8060 (3н)

Аномалии этих кривых характерны для графиков прослеживания при откачках в условиях перетекания ПВ в опробуемый водоносный горизонт из смежного (или смежных) горизонта слоистой водоносной системы. Так, на графиках прослеживания и по возмущающей скважине № 8058 (2ц), и по наблюдательным скважинам № 8059 (1ю) и № 8060 (3н) достаточно отчётливо фиксируются перегибы, соответствующие началу перетока ПВ из смежного водоносного горизонта через толщу слабопроницаемых разделяющих отложений.

При этом, в соответствии с современными представлениями [1, 17], первые асимптотические прямолинейные участки индикаторных графиков (обозначенные на рис. 1 римской цифрой I) отвечают

условиям фильтрации ПВ в неограниченном в плане изолированном однородном напорном водоносном горизонте, т.е. полагается, что перетекание ПВ из смежного горизонта в закономерностях снижения пьезометрического уровня в опробуемом горизонте на этом этапе откачки еще не проявляется. Соответственно фильтрационные и ёмкостные параметры опробуемого индуктского водоносного горизонта должны рассчитываться только по этим первым асимптотическим участкам графиков временного прослеживания уровня [1, 4, 7, 8, 17].

Вторые, выположенные, асимптотические участки индикаторных графиков прослеживания (обозначенные на рис. 1 римской цифрой II) характеризуют второй этап возмущения, при котором в опробуемый водоносный горизонт начинает поступать вода из смежного горизонта.

Напомним при этом, что расчётные формулы для вычисления геофильтрационных параметров, соответствующие способу временного прослеживания снижения уровня воды в возмущающей и наблюдательных скважинах при откачках, для которого решение задачи о притоке к скважине, вытекающее из исходного дифференциального уравнения фильтрации, аппроксимируется уравнением [1, 13, 17, 20, 26]:

$$S = A_i + C_i \lg t, \quad (19)$$

представляются в виде [3]:

$$T = \frac{0,183Q}{C_i}, \quad C_i = \frac{S_2 - S_1}{\lg t_2 - \lg t_1}, \quad (20)$$

$$\chi = 0,445 \frac{r^2}{t_0} 10^B, \quad B = \frac{A_i}{C_i},$$

где r — радиус возмущающей скважины r_0 или расстояние между возмущающей и i -й наблюдательной скважинами r_i ; i — номер наблюдательной скважины опытного куста, начиная от возмущающей; S_1 и S_2 — понижения уровня в скважинах опытного куста, измеренные соответственно в моменты времени t_1 и t_2 от начала возмущения (откачки); остальные обозначения прежние. Угловой коэффициент C_i и начальная ордината A_i — понижение уровня в момент времени t^0 — снимаются с выделенного асимптотического прямолинейного участка графика прослеживания, при этом время t^0 назначается равным 1 в выбранных единицах измерения, так что $\lg t^0 = 0$.

Отметим, что на рис. 1 вынесены уравнения вида (19) для первых асимптотических прямолинейных участков индикаторных графиков временного прослеживания пьезометрического уровня в скважинах опытного куста. Соответственно результаты промежуточных расчётов по уравнениям (19) и (20) и рассчитанные применительно к этим участкам графиков геофильтрационные парамет-

Таблица 1

Результаты обработки индикаторных графиков прослеживания понижения пьезометрического уровня подземных вод инкудукского водоносного горизонта при откачке

Номер	Параметры возмущения, индикаторных графиков прослеживания и водоносного горизонта	Значения параметров по скважинам опытного куста			
		Временное прослеживание			Комбинированное прослеживание
		8058 (2п)	8059 (1ю)	8060 (3н)	8059 (1ю) — 8060 (3н)
1	Расчётный дебит возмущения Q , м ³ /ч; м ³ /сут.	8,48 203,6	8,48 203,6	8,48 203,6	8,48 203,6
2	Радиус возмущающей скважины r_0 или расстояние от центра возмущения до возмущающей скважины r_1 , м	0,060	25,80	71,20	25,80—71,20
3	Расчётный участок индикаторного графика прослеживания пьезометрического уровня	I	I	I	I
4	Расчётное значение времени t_1 на асимптотическом участке графика, ч	0,01	0,1	1	
5	Расчётное значение приведенного времени $\left(\frac{t}{r^2}\right)_1$, ч/м ²				0,001
6	Расчётное значение понижения пьезометрического уровня S_1 , м	14,10	0,35	0,50	2,30
7	Расчётное значение времени t_2 на асимптотическом участке графика, ч	10	10	100	
8	Расчётное значение приведенного времени $\left(\frac{t}{r^2}\right)_2$, ч/м ²				0,01
9	Расчётное значение понижения пьезометрического уровня S_2 , м	21,60	5,35	5,45	4,85
10	Расчётное значение углового коэффициента асимптотического участка индикаторного графика C_t , м	2,500	2,500	2,475	2,550
11	Расчётное значение начальной ординаты A_0 , м (при $t^0 = 1$ ч)		2,85	0,50	
12	Расчётное значение приведенной начальной ординаты A_K , м (при $\frac{t^0}{r^2} = 1$ ч/м ²)				9,950
13	Водопроницаемость T , м ² /сут.	14,90	14,90	15,05	14,60
14	Расчётное значение параметра В.		1,1400	0,2020	3,9020
15	Пьезопроводности χ , м ² /сут.		$9,81 \cdot 10^4$	$8,62 \cdot 10^4$	$8,55 \cdot 10^4$
16	Контрольное время наступления квазистационарного режима фильтрации t_K , ч	$2,2 \cdot 10^{-6}$	0,4	3,0	
17	Контрольное приведенное время наступления квазистационарного режима фильтрации $\frac{t_K}{r^2}$, ч/м ²				0,0006
18	Расчётное значение упругой ёмкости μ^*		$1,52 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$	$1,71 \cdot 10^{-4}$

ры опробуемого инкудукского водоносного горизонта представлены в табл. 1.

Логарифмическая аппроксимация формулы Тейса справедлива для условий квазистационарного фильтрационного потока [1, 12, 13, 17, 29]; момент наступления квазистационарного режима фильтрации ПВ определяется аналитическим критерием t_K :

$$t_K = \frac{r^2}{0,4\chi}. \quad (21)$$

Контрольное время t_K с учётом округлённого значения пьезопроводности $\chi \cong 10^5$ м²/сут (или 4167 м²/ч) для скважин опытного куста показаны в табл. 1. Значения t_K вынесены также на рис. 1.

Своего рода контроль качества выполненного ОФО слоистой водоносной системы в условиях перетекания ПВ в опробуемый горизонт из смежного обеспечивает комбинированный способ обработки результатов прослеживания пьезометри-

ческого уровня ПВ в наблюдательных скважинах опытного куста. Особенностью индикаторных графиков комбинированного прослеживания, построенных в координатах и $S - \lg \frac{t}{r^2}$, так же, как и

графиков временного прослеживания, является наличие перегибов, ограничивающих прямолинейные асимптотические участки с разным темпом изменения скорости снижения уровня. При этом вторые асимптотические участки по наблюдательным скважинам, удалённым на разное расстояние от центра возмущения, должны отходить от общей для тех же наблюдательных скважин первой асимптоты [1]. Совпадение первых асимптот и является контрольным индикатором качества выполненного ОФО водоносного горизонта в условиях перетекания ПВ.

На рис. 2 представлены индикаторные кривые комбинированного прослеживания пьезометри-

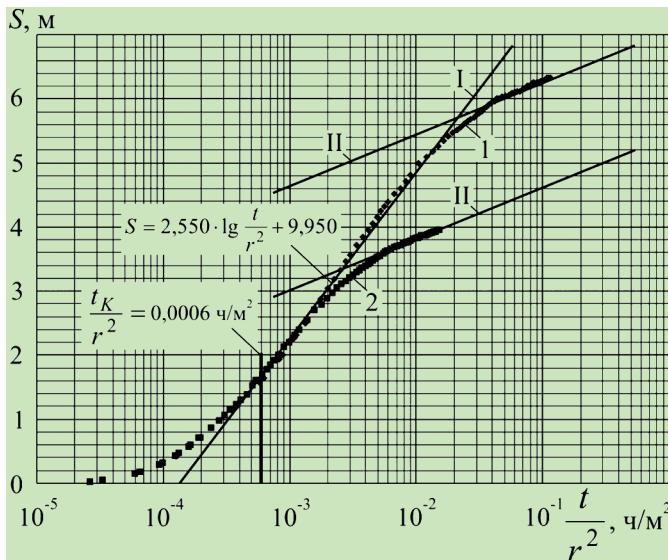


Рис. 2. Индикаторные графики комбинированного прослеживания понижения пьезометрического уровня подземных вод в наблюдательных скважинах опытного куста при откачке: 1, 2 — измеренные значения понижения уровня соответственно в наблюда-

ческого уровня в наблюдательных скважинах № 8059 (1ю) и № 8060 (3н) опытного куста. Как и указывалось ранее, обе эти кривые имеют единую прямолинейную асимптоту, обозначенную на рис. 2 римской цифрой I. Это однозначно свидетельствует о качественном проведении опытной откачки и о достоверности ее результатов. Параметры этой первой асимптоты — угловой коэффициент C_K и начальная ордината A_K — должны обеспечить вычисление действительных геофильтрационных параметров опробуемого инкудукского водоносного горизонта [1, 17].

Как и в предыдущем случае, вторые, выположенные, асимптотические участки индикаторных графиков комбинированного прослеживания (обозначенные на рис. 2 римской цифрой II) характеризуют второй этап возмущения, при котором в опробуемый водоносный горизонт начинают поступать воды из смежного горизонта.

Расчётные формулы для вычисления геофильтрационных параметров, соответствующие способу комбинированного прослеживания уровня воды в наблюдательных скважинах при откачках из изолированного напорного водоносного горизонта, для которого решение задачи о притоке к скважине аппроксимируется уравнением [1, 13, 17, 20, 26]:

$$S = A_K + C_K \lg \frac{t}{r^2}, \quad (22)$$

представляются в виде [3]:

$$T = \frac{0,183Q}{C_K}, \quad C_K = \frac{S_2 - S_1}{\lg\left(\frac{t}{r^2}\right)_2 - \lg\left(\frac{t}{r^2}\right)_1}, \quad (23)$$

$$\chi = 0,445 \cdot 10^B, \quad B = \frac{A_K}{C_K}.$$

Здесь все обозначения прежние.

На рис. 2 выписано уравнение вида (22) для первой (общей) асимптоты индикаторного графика комбинированного прослеживания пьезометрического уровня в наблюдательных скважинах опытного куста. Результаты промежуточных расчётов по уравнениям из (23) и рассчитанные геофильтрационные параметры опробуемого инкудукского водоносного горизонта представлены в табл. 1. В таблицу помещено также значение контрольного приведенного времени наступления квазистационарного режима фильтрации ПВ $\frac{t_K}{r^2}$,

оценка которого выполнена с учётом того же округленного значения пьезопроводности $\chi \cong 10^5$ м²/сут. (или 4167 м²/ч).

Таким образом, результаты обработки и интерпретации данных опытной откачки способом комбинированного прослеживания также обеспечили получение достоверных значений геофильтрационных параметров инкудукского водоносного горизонта на участке производственно-технического водозабора рудника Жалпак. Эти параметры прекрасно согласуются с геофильтрационными параметрами того же горизонта, установленными в результате обработки опытных данных способом временного прослеживания.

Другой важной задачей обработки результатов ОФО инкудукского водоносного горизонта является определение параметров перетока ПВ из смежного горизонта через слой слабопроницаемых разделяющих отложений, в первую очередь, фактора перетекания B .

В [4, 7, 8] предложен метод интерпретации результатов ОФО многослойных систем, для которого значительно сняты ограничения на область существования теоретического решения, положенного в его основу — способ отношения понижений пьезометрического уровня в комбинации с методом подбора. На базе редактора MS Excel в [4, 7, 8] предложен алгоритм реализации метода, обеспечивающий комплексное вычисление водопроводимости опробуемого водоносного горизонта T , его пьезопроводности χ и фактора перетекания B ; Результаты расчетов этих параметров представлены на рис. 3.

При расчётной величине фактора перетекания $B = 341,6$ м и мощности опробуемого инкудукского водоносного горизонта $m = 30$ м получаем, что условие применимости решения Хантуша и Джейкоба [24] и его альтернативного представления из [27], использованного для обработки и интерпретации результатов прослеживания уровня в наблюдательных скважинах опытного куста и имеющего вид:

$$\frac{m}{B} = 0,088 \leq 0,1,$$

безусловно выполняется.

A1														
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
1														
2	Исходные данные							Критериальные оценки						
3			$Q =$	203,6	м³/сут				$S^{(1)}/S^{(2)}$	$K_0(z_1)/K_0(z_2)$				
4			$S^{(1)} =$	6,10	м				1,62667	1,62663				
5			$S^{(2)} =$	3,75	м									
6			$r_1 =$	25,80	м				Расчет водопроницаемости					
7			$r_2 =$	71,20	м				Угловые коэффициенты					
8			$t_1 =$	40,00	ч				C_1	C_2				
9			$t_1 =$	1,666667	сут				2,38658	2,38653				
10														
11	Задаваемое значение фактора перетекания							Водопроницаемость, м²/сут						
12			$B =$	341,6	м				$T^{(1)}$	$T^{(2)}$				
13	Задаваемое значение пьезопроводности								13,6	13,6				
14			$\chi =$	100000	м²/сут									
15									Упругая емкость, м*					
16	Расчеты функций Бесселя								0,00014					
17		$z_1 =$	0,08776			$I_0(z_1) =$	1,00193							
18		$z_2 =$	0,24218			$I_0(z_2) =$	1,01472							
19		$z_1/2 =$	0,04388			$K_0(z_1) =$	2,55596							
20		$z_2/2 =$	0,12109			$K_0(z_2) =$	1,57132							
21		$z_1/3,75 =$	0,02340											
22		$z_2/3,75 =$	0,06458											

Рис. 3. Результаты вычислений геофильтрационных параметров опробуемого индукционного водоносного горизонта способом отношения понижений пьезометрического уровня в комбинации с методом подбора

Из рис. 3 следует, что полученное на основе метода отношения понижений уровня значение водопроницаемости примерно на 7,4–10,7 % (по отношению к определенной методом отношения уровней величине $T = 13,6$ м²/сут.) меньше величин водопроницаемости, определенной по результатам обработки опытных данных способами временного и комбинированного прослеживания понижения пьезометрического уровня ПВ (см. табл. 1). Эти систематические отклонения, как отмечалось в [4, 7, 8], являются следствием достаточно условного предположения о том, что на первых выделенных асимптотических участках графиков прослеживания, отвечающих первому этапу возмущения, не отражается влияние перетекания.

Достаточно подробное изложение выше результатов обработки и интерпретации результатов прослеживания пьезометрического уровня ПВ на этапе откачки имело очевидную цель. Эти результаты необходимы для обеспечения возможности сравнения геофильтрационных параметрах опробуемого индукционного водоносного горизонта с параметрами, полученными по результатам обработки и интерпретации результатов прослеживания восстановления пьезометрического уровня.

Как уже отмечалось ранее, по завершении опытной откачки на участке производственно-технического водозабора рудника Жалпак на протяжении еще 24 ч производились наблюдения за восстановлением пьезометрического уровня ПВ в возмущающей и наблюдательных скважинах опытного куста.

Известно [1, 17], что при условии $t < 0,1 T$ влиянием «наследства» откачки можно пренебречь. В этом случае обработка данных восстановления пьезометрического уровня ПВ производится точно так же, как и для его понижения на этапе откачки, т. е. способами временного, площадного и комбинированного прослеживания.

Если же указанное условие не выполняется, т. е. при $t \geq 0,1 T$, то опытные индикаторные графики прослеживания строятся в координатах $S^* - \lg \frac{t}{T+t}$, а обработка данных прослеживания восстановления уровня производится только способом временного прослеживания [1]. При этом ординатой служит повышение уровня, т. е. разность между динамическими уровнями в данный момент восстановления и в конце откачки. В этом случае выражение (14) аппроксимируется уравнением вида:

$$S^* = C \cdot \lg \frac{t}{T+t}, \quad (24)$$

где C — угловой коэффициент расчетного прямолинейного асимптотического участка индикаторного графика прослеживания восстановления уровня.

Соответственно формулы для вычисления геофильтрационных параметров опробуемого водоносного горизонта имеют вид:

$$T = \frac{0,183 Q}{C}, \quad \chi = 0,445 \frac{r^2}{T} 10 B, \quad B = \frac{S_{\max}}{C}. \quad (25)$$

Здесь $S_{\max}$ — максимальное понижение пьезометрического уровня ПВ, достигнутое на завершающем этапе откачки. Остальные обозначения прежние.

Как было показано ранее, восстановление пьезометрического уровня ПВ в скважинах опытного куста после остановки откачки, проводимой из водоносного горизонта в условиях перетекания воды из смежного с опробуемым горизонта, происходит точно так же, как и при откачке с постоянным дебитом из напорного изолированного водоносного горизонта. Восстановление уровня описывается тем же уравнением (14), а обработки результатов прослеживания уровня выполняется с использованием уравнений (25). Очевидно, что в этом случае в качестве $S_{\max}$ в (25) должны назначаться значения понижения пьезометрического уровня ПВ, полученные в результате экстраполяции первого (I) асимптотического участка индикаторных графиков временного прослеживания снижения пьезометрического уровня в скважинах опытного куста на этапе откачки на момент её остановки.

На рис. 4 представлены индикаторные графики временного прослеживания восстановления пьезометрического уровня ПВ в скважинах опытного куста. На этих графиках выделяется только по одному расчётному прямолинейному асимптотическому участку. Применительно к этим участкам на рисунках выписаны уравнения этих асимптот вида (24), в которых в явном виде представлены их угловые коэффициенты S .

Приведённое ранее условие $t < 0,1 T$ при общей продолжительности откачки в $T = 96$ ч показывает, что пренебрежение «наследством» откачки возможно только для значений времени от момента её остановки $t \leq 9,6$ ч. Очевидно, что расчётный асимптотический участок графика временного прослеживания восстановления пьезометрического уровня ПВ в скважинах опытного куста отстраивается с учетом измеренных значений S^* для моментов времени $t \geq 9,6$ ч. Поэтому обработка опытных данных выполнена на основе графиков временного прослеживания восстановления пьезометрического уровня ПВ в координатах $S^* - \lg \frac{t}{T + t}$ (см. рис. 4).

Результаты расчётов значений водопроницаемости T и пьезопроводности χ по результатам временного прослеживания восстановления пьезометрического уровня сведены в табл. 2.

Вычисленные значения сложного критического времени для наблюдательных скважин опытного куста вынесены на рис. 4; они отчётливо показывают, что выделенные прямолинейные асимптотические участки полностью удовлетворяют условию применимости уравнения (14) для обработки и интерпретации результатов прослеживания восста-

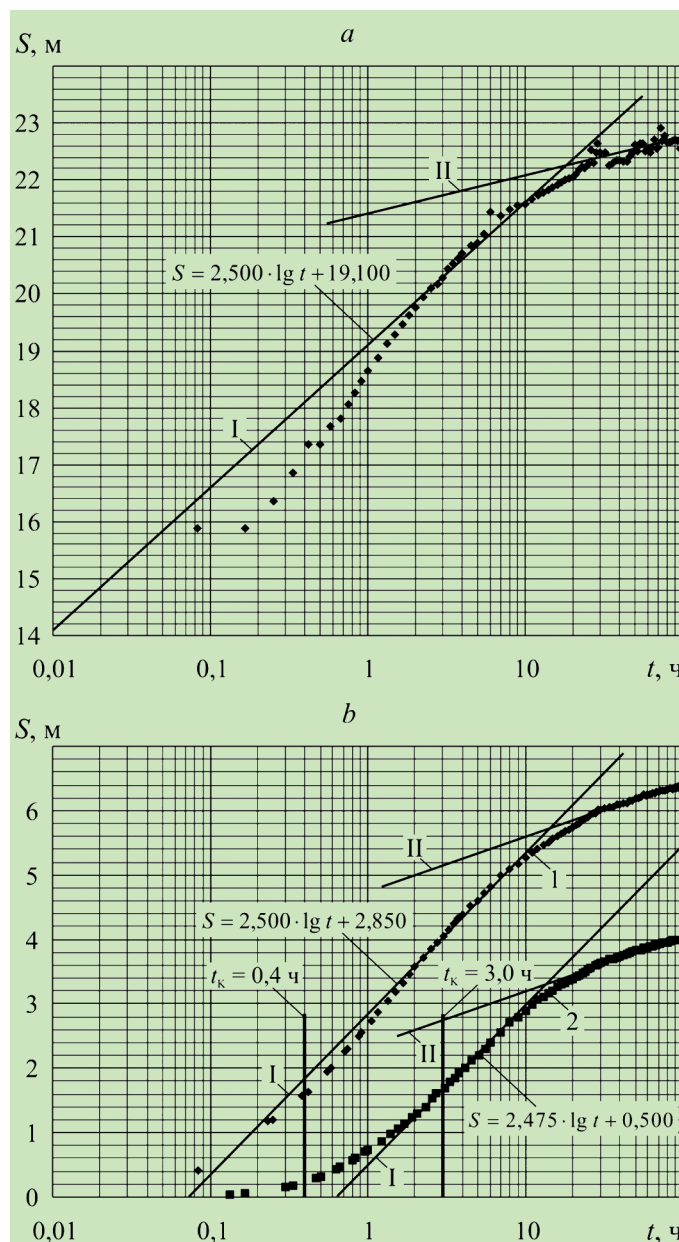


Рис. 4. Индикаторные графики временного прослеживания восстановления пьезометрического уровня подземных вод в центральной (а) и наблюдательных (б) скважинах опытного куста после остановки откачки: 1, 2 — измеренные значения понижения уровня соответственно в наблюдательных скважинах № 8059 (1ю) и № 8060 (3н)

новления пьезометрического уровня ПВ. Соответственно рассчитанные геофильтрационные параметры индукского водоносного горизонта на участке производственно-технического водозабора уранового месторождения Жалпак вполне представительны.

Вычисленные по данным временного и комбинированного прослеживания снижения пьезометрического уровня ПВ в скважинах опытного куста на этапе откачки и методом отношения понижений уровня геофильтрационные параметры индукского водоносного горизонта прекрасно согласуются с теми же параметрами, вычисленными на этапе восстановления пьезометрического уровня

Таблица 2

Результаты обработки индикаторных графиков прослеживания восстановления пьезометрического уровня подземных вод индукционного водоносного горизонта после остановки откачки

Номер пп	Параметры возмущения, индикаторных графиков прослеживания и водоносного горизонта	Значения параметров по скважинам опытного куста		
		8058 (2п)	8059 (1ю)	8060 (3н)
1	Расчётный дебит возмущения Q , м ³ /ч; м ³ /сут.	8,48 203,6	8,48 203,6	8,48 203,6
2	Радиус возмущающей скважины r_0 или расстояние от центра возмущения до возмущающей скважины r , м	0,060	25,80	71,20
3	Расчётное значение сложного времени $\frac{t}{T + t_1}$ на асимптотическом участке графика	0,001	0,001	0,01
4	Расчётное значение повышения пьезометрического уровня S_1^* , м	16,60	0,35	0,60
5	Расчётное значение сложного времени $\frac{t_2}{T + t_2}$ на асимптотическом участке графика	0,1	0,1	1
6	Расчётное значение повышения пьезометрического уровня S_2^* , м	21,60	5,45	5,55
7	Расчётное значение углового коэффициента асимптотического участка индикаторного графика C , м	2,500	2,550	2,475
8	Экстраполированное значение максимального понижения пьезометрического уровня на момент остановки откачки $S_{\max}$, м		7,95	5,55
9	Водопроницаемость T , м ² /сут.	14,90	14,61	15,05
10	Расчётное значение параметра В		3,1177	2,2424
11	Пьезопроводность χ , м ² /сут.		$9,75 \cdot 10^4$	$9,89 \cdot 10^4$
12	Сложное контрольное время наступления квазистационарного режима фильтрации $\frac{t_K}{T + t_K}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	0,0043	0,031
13	Расчётное значение упругой ёмкости μ^*		$1,50 \cdot 10^{-4}$	$1,52 \cdot 10^{-4}$

по данным временного прослеживания его повышения (см. табл. 1 и 2). Это является прямым свидетельством корректности предложенной интерпретации процессу восстановления уровня после остановки откачки, проведенной в условиях перетекания ПВ из смежного горизонта в опробуемый.

Выводы

Итак, в настоящей работе выполнено обоснование физико-математической модели восстановления пьезометрического уровня ПВ после оста-

новки откачки из опробуемого водоносного горизонта слоистой водоносной толщи в условиях перетекания воды из смежного горизонта через слой разделяющих слабопроницаемых отложений. Эта модель полностью идентична модели восстановления уровня в напорном изолированном водоносном горизонте. Соответственно обработка и интерпретация результатов прослеживания восстановления пьезометрического уровня в скважинах опытных кустов в процессе ОФО слоистых водоносных систем с перетеканием должны выполняться на основе имеющихся методических приёмов.

ЛИТЕРАТУРА

- Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1979. 327 с.
- Бураков М.М. Модель восстановления уровня после откачки с переменным дебитом // Водные ресурсы. 1991. Т. 18. № 2. С. 38–43.
- Бураков М.М. Случайные погрешности параметров слоистых водоносных систем, установленных по данным откачек. Алматы: «ProService LTD», 2007. 113 с.
- Бураков М.М. Опытные откачки из слоистых водоносных систем с перетеканием. Методы интерпретации результатов. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 145 с.
- Бураков М.М. Теоретические и методические проблемы интерпретации результатов опытных откачек с переменным дебитом. Алматы: Apple-print, 2017. 132 с.
- Бураков М.М., Павличенко Л.М. О восстановлении уровня после откачки с переменным дебитом // Вестник АН КазССР. 1989. № 10. С. 58–66.
- Бураков М.М., Хабиев С.Х. Методика определения фильтрационных и емкостных параметров слоистых водоносных систем по данным кустовых откачек. Алматы: АО «НЦНТИ», 2010. 67 с.
- Бураков М.М., Хабиев С.Х. Методика интерпретации результатов опытных откачек из слоистых систем с перетеканием при реакции смежных горизонтов на возмущение. Алматы: АО «НЦНТИ», 2011. 88 с.
- Вопросы гидрогеологических расчетов. Сборник статей / Под ред. Ф.М. Бочверера и В.М. Шестакова. М.: Мир, 1964. 180 с.
- Гидрогеология СССР. Т. XXXVI. Южный Казахстан / Под ред. В.И. Дмитриевского. М.: Недра, 1970. 460 с.
- Гиринский Н.К. Некоторые вопросы динамики подземных вод // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. 1947. № 9. С. 3–102.
- Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М.: Недра, 1983. 358 с.
- Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 325 с.

14. Мятлев А.Н. Напорный комплекс подземных вод и колоды // Известия АН СССР. Отделение технических наук. 1947. № 9. С. 1069–1088.
15. Плугина Т.А. Определение геофильтрационных параметров слабопроницаемых отложений натурными методами. Обзор. Гидрогеология и инженерная геология. М.: ВИАМС, 1978. 56 с.
16. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.
17. Синдаловский Л.Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2006. 796 с.
18. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М.: Наука, 1979. 831 с.
19. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.
20. Cooper H.H., Jacob C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history // Transactions. American Geophysical Union. 1946. Vol. 27. P. 526–534.
21. Hantush M.S. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers // Transactions. American Geophysical Union. 1956. Vol. 37. P. 702–714.
22. Hantush M.S. Non-steady flow to a well partially penetrating an infinite leaky aquifer // Proceedings of the Iraqi Scientific Societies. 1957. Vol. 1. P. 10–19.
23. Hantush M.S. Modification of the theory of leaky aquifers // Journal of Geophysical Research. 1960. Vol. 65. P. 3713–3725.
24. Hantush M.S., Jacob C.E. Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer // Transactions. American Geophysical Union. 1955. 36. P. 95–100.
25. Horner D.R. Pressure buildups in wells // Third World Petroleum Congress Proceedings. The Hague, 1951. Vol. 2. P. 503–521.
26. Jacob C.E. Radial flow in a leaky artesian aquifer // Transactions. American Geophysical Union. 1946. Vol. 27. P. 198–205.
27. Sternberg Y.M. Some approximate solutions of radial flow problems // Journal of Hydrology. 1969. Vol. 33. No. 2. P. 158–166.
28. Theis C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage // Transactions. American Geophysical Union. 1935. Vol. 16. P. 519–524.
1. Borevskii B.V., Samsonov B.G., Yazvin L.S. *Metodika opredeleniya parametrov vodonosnykh gorizontov po dannym otkachek* [Methods for Determining Aquifer Characteristics by Pumping Test Data]. Moscow, Nedra Publ., 1979, 326 p. (in Russian).
2. Burakov M.M. Model of Restoring the Level After Pumping with a Variable Flow Rate. *Vodnyye resursy — Water Resources*, 1991, Vol. 18, no. 2, pp. 38–43. (in Russian).
3. Burakov M.M. *Sluchainnye pogreshnosti parametrov sloistnykh vodonosnykh sistem, ustanovlennyykh po dannym otkachek* [Random Errors in Multi-Layer Aquifer Characteristics Derived from Pumping Tests]. Almaty, ProService LTD, 2007, 113 p. (in Russian).
4. Burakov M.M. *Opytnyye otkachki iz sloistnykh vodonosnykh sistem s peretekaniyem. Metody interpretatsii rezul'tatov* [Experienced Pumping from Layered Aquifer Systems with Overflow. Methods of Interpretation of the Results]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, 145 p. (in Russian).
5. Burakov M.M. *Teoreticheskiye i metodicheskiye problemy interpretatsii rezul'tatov opytnykh otkachek s peremennym debitom* [Theoretical and Methodological Problems of Interpreting the Results of Pilot Pumpings with Variable Flow Rates]. Almaty, Apple-print, 2017, 132 p. (in Russian).
6. Burakov M.M., Pavlichenko L.M. On the Restoration of the Level After Pumping with Variable Debit. *Vestnik AN KazSSR — Bulletin of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR*, 1989, no.10, pp. 58–66. (in Russian).
7. Burakov M.M., Khabiev S.Kh. *Metodika opredeleniya fil'tratsionnykh i yemkostnykh parametrov sloistnykh vodonosnykh sistem po dannym kustovykh otkachek* [The Method for Determining the Filtration and Capacitive Parameters of Layered Aquifer Systems According to the Pumping Data]. Almaty, AO NCNTI [JSC National Center for Scientific and Technical Information], 2010, 67 p. (in Russian).
8. Burakov M.M., Khabiev S.Kh. *Metodika interpretatsii rezul'tatov opytnykh otkachek iz sloistnykh sistem s peretekaniyem pri reaktzii smezhnykh gorizontov na vozmushcheniye* [The Method of Interpretation of the Results of Experimental Pumping out of Layered Systems With Overflow During the Reaction of Adjacent Horizons to Disturbances]. Almaty, AO NCNTI [JSC National Center for Scientific and Technical Information], 2011, 88 p. (in Russian).
9. *Voprosy gidrogeologicheskikh raschetov. Sbornik statey* [Questions of Hydrogeological Calculations. Collection of Articles]. Ed. F.M. Bochever, V.M. Shestakov. Moscow, Mir Publ., 1964, 180 p. (in Russian).
10. *Gidrogeologiya SSSR. T. XXXVI. Yuzhnyy Kazakhstan* [Hydrogeology of the USSR. Vol. XXXVI. South Kazakhstan]. Ed. V.I. Dmitrovsky. Moscow, Nedra Publ., 1970, 460 p. (in Russian).
11. Girinsky N.K. Nekotoryye voprosy dinamiki podzemnykh vod (Some Questions of Groundwater Dynamics). *Voprosy gidrogeologii i inzhenernoy geologii — Hydrogeology and Engineering Geology Issues*, 1947, no. 9, pp. 3–102. (in Russian).
12. Mironenko V.A. *Dinamika podzemnykh vod* [Groundwater Dynamics]. Moscow, Nedra Publ., 1983, 358 p. (in Russian).
13. Mironenko V.A., Shestakov V.M. *Teoriya i metody interpretatsii opytno-fil'tratsionnykh rabot* [Theory and Methods of Interpretation of Experimental Filtration Works]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 328 p. (in Russian).
14. Myatiev A.N. Pressure Complex of Groundwater and Wells. *Izvestiya AN SSSR. Otdeleniye tekhnicheskikh nauk — News of the USSR Academy of Sciences. Department of Technical Sciences*. 1947, no. 9, pp. 1069–1088. (in Russian).
15. Plugina T.A. *Opredeleniye geofil'tratsionnykh parametrov slabopronitsayemykh otlozheniy naturnymi metodami. Obzor. gidrogeologiya i inzhenernaya geologiya* [Determination of Geofiltration Parameters of Low-Permeable Sediments Using Natural Methods. Overview. Hydrogeology and Engineering Geology]. Moscow, VIEMS Publ., 1978, 56 p. (in Russian).
16. Polubarinova-Kochina P.Ya. *Teoriya dvizheniya gruntovykh vod* [Theory of Groundwater Movement]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 664 p. (in Russian).
17. Sindalovskiy L.N. *Spravochnik analiticheskikh resheniy dlya interpretatsii opytno-fil'tratsionnykh opytovaniy* [Handbook of Analytical Solutions for the Interpretation of Test Filtration Tests]. SPb, SPbGU Publ., 2006, 796 p. (in Russian).
18. *Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablitsami* [Handbook of Special Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables]. Ed. M. Abramowitz, I. Stegun. Moscow, Nauka Publ., 1979, 831 p. (in Russian).
19. Shestakov V.M. *Gidrogeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, MGU Publ., 1995, 368 p. (in Russian).
20. Cooper H.H., Jacob C.E. A generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well-Field History. *Transactions. American Geophysical Union*, 1946, Vol. 27, pp. 526–534.
21. Hantush M.S. Analysis of Data From Pumping Tests in Leaky Aquifers. *Transactions. American Geophysical Union*, 1956, Vol. 37, pp. 702–714.
22. Hantush M.S. Non-Steady Flow to a Well Partially Penetrating an Infinite Leaky Aquifer. *Proceedings of the Iraqi Scientific Societies*, 1957, Vol. 1, pp. 10–19.
23. Hantush M.S. Modification of the Theory of Leaky Aquifers. *Journal of Geophysical Research*, 1960, Vol. 65, pp. 3713–3725.
24. Hantush M.S., Jacob C.E. Nonsteady Radial Flow in an Infinite Leaky Aquifer. *Transactions. American Geophysical Union*, 1955, 36, pp. 95–100.
25. Horner D.R. Pressure Buildups in Wells. Third World Petroleum Congress Proceedings. The Hague, 1951, Vol. 2, pp. 503–521.
26. Jacob C.E. Radial Flow in a Leaky Artesian Aquifer. *Transactions. American Geophysical Union*, 1946, Vol. 27, pp. 198–205.
27. Sternberg Y.M. Some Approximate Solutions of Radial Flow Problems. *Journal of Hydrology*, 1969, Vol. 33, no. 2, pp. 158–166.
28. Theis C.V. The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground-Water Storage. *Transactions. American Geophysical Union*, 1935, Vol. 16, pp. 519–524.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОДЗЕМНЫХ ВОД СЕВЕРО-СИВАШСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАСЕЙНА

К.Я. БУЛАХОВА, С.М. СУДАРИКОВ

*Санкт-Петербургский горный университет
2, 21-я линия, Васильевский остров, Санкт-Петербург 199106, Россия
email: bulahova.k@gmail.com, sergei_sudarikov@mail.ru*

Проанализированы результаты гидрогеохимического мониторинга водоносного комплекса сармат-мэотис-понтических отложений Северо-Сивашского артезианского бассейна. Использованы данные режимных наблюдений по 16 эксплуатационным скважинам, полученные в период с 2014 по 2017 гг. Для выявления зависимостей между изменением концентраций нормируемых компонентов проведен корреляционный и регрессионный анализ. Полученные результаты позволяют оценить основные факторы формирования химического состава подземных вод. На современном этапе происходит подтягивание метаморфизованных вод из нижних толщ комплекса, что приводит к повышению величины минерализации. Формирование сульфатных вод прежде всего связано с особенностями геологического строения, а именно с огипсованностью четвертичных отложений и наличием гидравлической связи с вышележащими водоносными горизонтами. Одной из причин формирования сульфатных вод является техногенное воздействие, связанное с близким расположением кислотонакопителя, содержащего серные стоки. Полученные результаты позволяют перейти к следующему этапу исследования — созданию природной гидрогеологической модели участка исследования и проведению термодинамического моделирования.

Ключевые слова: сармат-мэотис-понтический водоносный комплекс; Северо-Сивашский артезианский бассейн; корреляционный и регрессионный анализ; формирование подземных вод.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-3-64-71

ANALYSIS OF THE DATA OF HYDROGEOCHEMICAL MONITORING OF GROUNDWATER IN THE NORTH SIVASH ARTESIAN BASIN

K.YA. BULAKHOVA, S.M. SUDARIKOV

*Saint-Petersburg Mining University
2, 21st Line, Vasilievsky island, St. Petersburg 199106, Russia
email: bulahova.k@gmail.com, sergei_sudarikov@mail.ru*

The results of hydrogeochemical monitoring of the Sarmat-Meotis-Pontic sediments aquifer complex of the North Sivash artesian basin have been analyzed. The analysis based on a routine observations for 16 producing wells. The observations were made in the period from 2014 to 2017 years. A correlation and regression analysis has been made for definition of dependencies between changes in the concentrations of the normalized components. The results obtained allow us to evaluate the main factors of formation of the chemical composition of groundwater. At the present stage, metamorphosed waters are pulled up from the lower strata of the complex, that leads to an increase in the amount of mineralization. The formation of sulphate waters is primarily associated with the peculiarities of the geological structure, namely, the high gypsum content of quaternary deposits and the presence of hydraulic connection with the overlying aquifers. One of the reasons for the formation of sulphate waters is the anthropogenic impact associated with the close location of the acid accumulator containing sulfur tailing. The results obtained allow us to proceed to the next stage of the survey — the creation of a natural hydrogeological model of the research area and the carrying of the thermodynamic modeling.

Key words: Sarmatian-Meotic-Pontian aquifer complex; North Sivash artesian basin; correlation and regression analysis; the formation of groundwater.

В настоящее время изучение подземных вод северной части Республики Крым является актуальной задачей, так как проблема обеспеченности населения и промышленности водными ресурсами носит исключительный характер. Ранее для реше-

ния этой проблемы по Северо-Крымскому каналу на полуостров ежегодно поступало 1200 млн. м³ днепровской воды. Однако после присоединения АР Крым к России в 2014 г. поставки воды с Украины по каналу прекратились.

Отсутствие крупных поверхностных водотоков и пресных озёр на территории Северного Крыма определяют необходимость организации хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения на сегодняшний день исключительно за счёт подземных вод. Однако использование подземных вод в значительной мере осложняется текущей гидрогеохимической обстановкой: интенсивная добыча подземных вод сопровождается повышением их минерализации и изменением химического состава.

В северной части Крымского п-ова развиты многочисленные солёные озёра, некоторые из них в настоящее время используются в качестве накопителей высокоминерализованных рассолов; стоков содового и бромного производств. Одно из соляных озёр используется в качестве кислотонакопителя, куда сбрасываются стоки с серной кислотой, а также хозяйственно-бытовые сбросы жителей близлежащих городов и поселков.

Таким образом, основной целью исследования является выявление зависимостей между изменением основных нормируемых компонентов, а также обоснование основных природных и техногенных факторов формирования химического состава подземных вод сармат-мэотис-понтического водоносного комплекса.

Методы исследования

В качестве исходных данных для исследования текущей гидрогеохимической ситуации на изучаемой территории использована информация, полученная при проведении мониторинговых исследований.

Для анализа гидрогеохимического режима водоносного комплекса сармат-мэотис-понтических отложений использованы данные режимных наблюдений по 16 эксплуатационным скважинам, полученные с 2014 по 2017 гг., включающие результаты замеров дебита скважин и химического анализа подземных вод. По имеющимся данным были построены графики зависимости водоотбора и минерализации добываемых вод, графики изменения минерализации, жесткости, величины сухого остатка, концентрации хлорид-иона и сульфат-иона с течением времени эксплуатации для каждой скважины.

К основным нормируемым компонентам, в наибольшей степени отвечающим за рост величины сухого остатка подземных вод на рассматриваемом участке, относятся хлорид-ион, сульфат-ион, а также такой показатель, как общая жесткость, определяемая суммой солей кальция и магния. На основе имеющихся данных был проведён корреляционный и регрессионный анализы для выявления зависимостей между изменением величины сухого остатка, содержания сульфат-иона и хлорид-иона,

а также для нахождения закономерностей изменения нормируемых компонентов. Корреляционный анализ основных химических показателей произведен с помощью программы Statistica Version 13.3.

Построены регрессионные прогнозные модели изменения величины минерализации и основных нормируемых компонентов. Задачей построения прогнозных моделей является определение времени достижения ПДК по нормируемым компонентам. Наиболее надёжным показателем можно считать величину минерализации и сухого остатка, суммирующую все флуктуации концентраций отдельных компонентов во времени под влиянием различных факторов. С другой стороны, понятно, что такой прогноз целесообразен для водопунктов, в которых величина показателей пока еще далека от нормы ПДК, для которых удалось выявить существенный тренд изменения показателей.

Анализ результатов гидрохимического мониторинга подземных вод

В качестве исходных данных для изучения текущей гидрогеохимической ситуации на изучаемой территории принимается информация, полученная при проведении гидрохимического мониторинга, который выполнялся в период 2014—2017 гг. Работы по мониторингу проводились по 16 скважинам 2357—2372 (рис. 1).

Добываемые скважинами 2357—2364 подземные воды в начале эксплуатации были пресными — значения минерализации составили 0,43—0,76 г/л. В скважинах 2365—2372 подземные воды в 2014 г. отличались невысокой минерализацией в пределах 1,00—3,6 г/л., наблюдалось превышение ПДК по величине минерализации, общей жёсткости и концентрации хлорид-иона.

Изменение величины минерализации и основных нормируемых компонентов

По имеющимся данным построены и проанализированы временные графики изменения эксплуатационного дебита скважин (водоотбора) и минерализации добываемых вод, графики изменения минерализации, жесткости, концентрации хлорид-иона и сульфат-иона в процессе эксплуатации. Полученные результаты позволяют судить о возможной связи интенсивности отбора воды и изменения её химического состава.

Выделены скважины, в которых изменение минерализации в большей степени зависит от водоотбора. В скважинах 2365, 2366, 2372 наблюдается прямая зависимость между величиной минерализации и объёмом добываемых вод. Характерный график изменения водоотбора и минерализации в этих скважинах представлен на рис. 2. Повышение

Масштаб 1:200000



Рис. 1. Обзорная карта-схема района работ: 1 — граница Российской Федерации, 2 — дороги, 3 — населенный пункты, 4 — скважина, 5 — разрез по линии I-I

уровня водоотбора до 40 м³/мес. и более приводит к увеличению минерализации на 400—600 мг/дм³. Снижение водоотбора до 30—38 м³/мес. позволяет стабилизировать величину минерализации на уровне 1,1—1,2 г/дм³.

Увеличение минерализации свидетельствует о постепенном засолении подземных вод, связан-

ном, возможно, с подтягиванием солёных вод из нижних частей водоносного комплекса сармат-мэотис-понтических отложений. Для улучшения качества подземных вод в данном случае возможно пересмотреть режим эксплуатации скважин.

Ко второй группе можно отнести скважины 2367—2371, для которых характерно сохранение

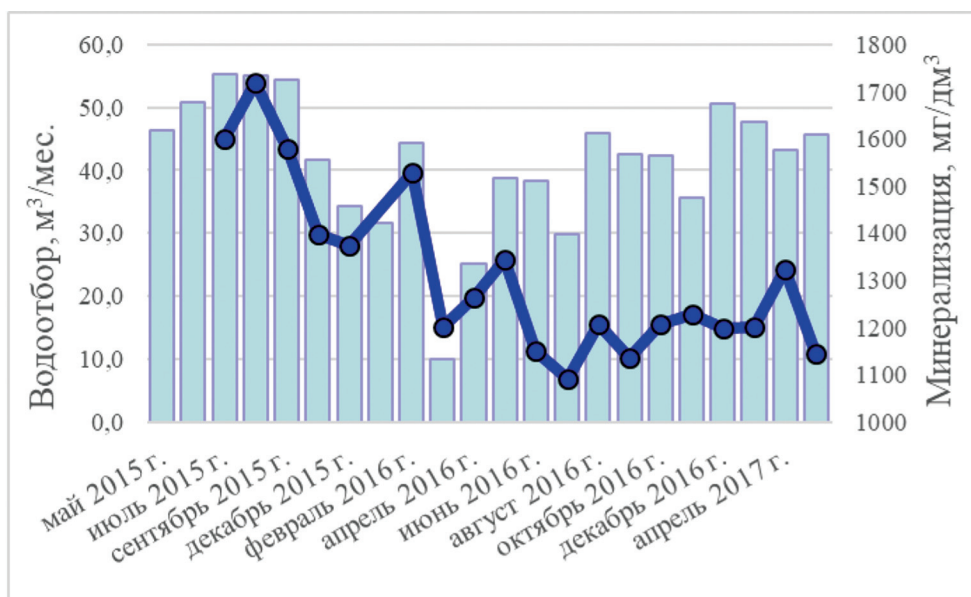


Рис. 2. График изменения водоотбора и минерализации в скважине № 2372; гистограмма водоотбора с графиком изменения минерализации по времени

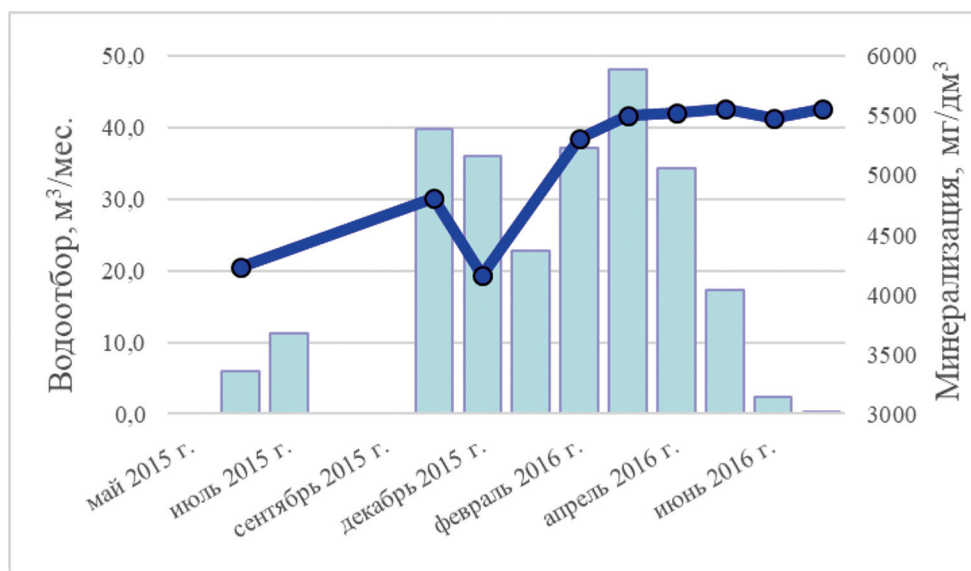


Рис. 3. График изменения водоотбора и минерализации в скважине № 2368; гистограмма водоотбора с графиком изменения минерализации по времени

тренда на увеличение минерализации при периодической эксплуатации, чередующейся с отсутствием водоотбора (рис. 3).

На основе имеющихся данных был проведён корреляционный анализ для выявления зависимостей между изменением нормируемых гидрохимических показателей: сухого остатка, концентрации сульфатов и хлоридов, а также общей жесткости, определяемой суммой солей кальция и магния. Значения величины минерализации определялись не для каждой пробы, поэтому в корреляционном анализе использовалась величина сухо-

го остатка, которая была определена в каждой пробе.

Анализируя результаты корреляционного анализа, можно выделить несколько групп скважин, в которых характер изменения химического состава подземных вод аналогичен, а также прослеживаются одинаковые зависимости между основными показателями состава вод.

Скважины 2357—2364 (I группа). Корреляционная матрица данного участка представлена в табл. 1. Объём выборки составляет 87 проб (2014—2017 гг.). Красным цветом в таблице выделены статистичес-

Таблица 1

Корреляционная матрица скважин I группы

Переменные	Среднее отклонение	Стандартное отклонение	Na+K	Ca	Mg	HCO ₃	SO ₄	Cl	Fe	Сухой остаток
Na+K	432,55	535,61	1,00							
Ca	85,13	54,18	0,04	1,00						
Mg	43,09	25,70	0,19	0,34	1,00					
HCO ₃	206,90	347,23	0,05	0,12	0,28	1,00				
SO ₄	230,54	160,05	0,10	-0,02	0,01	0,02	1,00			
Cl	382,65	332,87	0,30	0,35	0,67	0,30	-0,08	1,00		
Fe	0,07	0,08	0,23	0,02	0,23	0,34	0,02	0,18	1,00	
Сухой остаток	1152,99	723,17	0,28	0,44	0,72	0,34	0,01	0,96	0,18	1,00

кие значимые на уровне 0,05 коэффициенты корреляции. Значимость коэффициентов корреляции была проверена по таблице критических значений для коэффициента корреляции Пирсона для различных объёмов выборки (при $n = 87$, $r_{0,05} = 0,2$, полученные значения намного больше табличных, что подтверждает значимость вычисляемых коэффициентов корреляции).

Для данной группы скважин характерна сильная корреляционная зависимость между величиной сухого остатка и концентрации ионов кальция, магния и хлора, коэффициент корреляции составляет 0,44, 0,72 и 0,96 соответственно. Также

отмечается тесная связь между изменением концентрации хлор-иона и концентрации ионов магния и кальция, коэффициент корреляции 0,67 и 0,35.

Следует отметить, что при проведении корреляционного анализа для каждой отдельной скважины выявлено, что для скважин 2357 и 2358 типична сильная корреляционная связь между величиной сухого остатка и сульфат ионом (коэффициент корреляции изменяется от 0,66 до 0,85), угловые коэффициент перед переменными практически одинаковы (рис. 4).

Был проведён корреляционный анализ для участка, на котором сосредоточены скважины

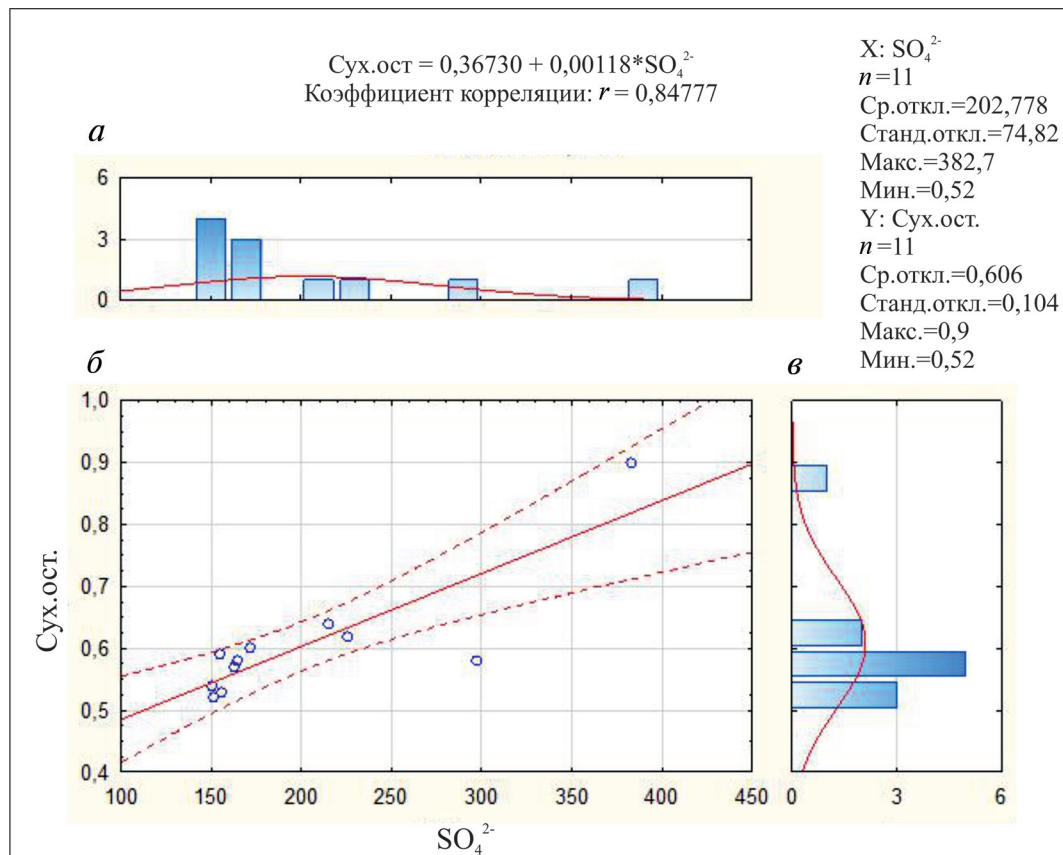


Рис. 4. а – гистограмма распределения концентрации сульфат-иона с графиком нормального распределения; б – график регрессии величины сухого остатка по сульфат-иону для скважины 2358; в – гистограмма распределения величины сухого остатка с графиком нормального распределения

Корреляционная матрица скважин II группы

Переменные	Среднее отклонение	Стандартное отклонение	Жёсткость	Na+K	Ca	Mg	HCO ₃	SO ₄	Cl	Fe	Сухой остаток
Жесткость	21,38	10,23	1,00								
Na+K	845,81	1460,48	0,49	1,00							
Ca	187,57	61,48	0,97	0,48	1,00						
Mg	145,72	86,03	0,98	0,50	0,96	1,00					
HCO ₃	245,23	21,27	0,14	0,11	0,15	0,15	1,00				
SO ₄	152,11	86,43	0,62	0,38	0,58	0,65	0,22	1,00			
Cl	1667,72	1070,00	0,98	0,50	0,98	0,99	0,14	0,63	1,00		
Fe	0,71	7,47	-0,07	-0,03	-0,08	-0,07	0,03	0,09	-0,07	1,00	
Сухой остаток	3064,62	1805,94	0,97	0,50	0,97	0,99	0,14	0,64	0,99	-0,09	1,00

Таблица 3

Уравнения зависимости основных нормируемых компонентов

I группа	II группа
Сухой остаток = 357,5 + 2,077 Cl	Сухой остаток = 266,58 + 1,678 Cl
Сухой остаток = 1146,6 + 0,027 SO ₄	Сухой остаток = 1018,2 + 13,453 SO ₄
Сухой остаток = 990,8 + 0,374 Na+K	Сухой остаток = 2545,5 + 0,613 Na+K
Сухой остаток = 654,57 + 5,85 Ca	Сухой остаток = -2261 + 28,392 Ca
Сухой остаток = 276,4 + 20,342 Mg	Сухой остаток = 37,075 + 20,776 Mg
Cl = 197,48 + 2,17 Ca	Cl = -1517 + 16,981 Ca
Cl = 7,46 + 8,706 Mg	Cl = -131,1 + 12,344 Mg

2365-2372 (II группа). Корреляционная матрица данного участка представлена в табл. 2. Объём выборки составляет 225 проб (2014—2017 гг.). Красным цветом в таблице выделены статистические значимые на уровне 0,05 коэффициенты корреляции. Значимость коэффициентов корреляции была проверена по таблице критических значений для коэффициента корреляции Пирсона для различных объёмов выборки (при $n = 225$, $r_{0,05} = 0,12$, полученные значения намного больше табличного, что подтверждает значимость вычисляемых коэффициентов корреляции).

Для данной группы скважин характерна сильная корреляционная зависимость между величиной сухого остатка и концентраций ионов кальция, магния и хлора, коэффициенты корреляции 0,97, 0,99, 0,99; значительная линейная связь прослеживается между изменением концентрации хлор-иона и концентрации ионов магния и кальция, коэффициент корреляции равен 0,99 и 0,98 соответственно.

Многолетний опыт проведения статистической обработки гидрогеологических исследований показывает, что концентрации макрокомпонентов, содержащихся в подземных водах, подчиняются нормальному закону распределения. Для оценки нормального закона распределения выборки был использован χ^2 критерий Пирсона, который рассчитан с помощью программы Statistica Version 13.3.

Для обоих участков были рассчитаны уравнения линейной зависимости между компонентами

состава (табл. 3). Уравнения зависимости основных нормируемых компонентов достаточно схожи, угловой коэффициент перед основными нормируемыми компонентами аналогичен. Таким образом, характер изменения химического состава практически идентичен.

Отличительной особенностью являются зависимости изменения концентрации кальция и магния с хлор-ионом. Более высокое значение углового коэффициента говорит о значительной скорости изменения концентрации. Таким образом, для скважин II группы типичен более интенсивный приток магниевых-кальциевых вод, чем для скважин I группы.

Обсуждение результатов

Выявленные на основании анализа режимных наблюдений закономерности говорят о геохимической неоднородности водоносного комплекса сармат-мэотис-понтических отложений. Одной из причин может быть изменчивость фильтрационных параметров водовмещающих пород. Водообильность пород меняется по площади и с глубиной в зависимости от степени закарстованности известняков и приводит к различной интенсивности притока минерализованных вод при изменении водоотбора. Водопроницаемость мэотических отложений в целом заметно ниже водопроницаемости понта, однако большой разброс конкретных значений этого показателя для мэотичес-

кого горизонта свидетельствует о возможности существования зон в разной степени благоприятных для подтока солёных вод [1].

Анализ изменчивости минерализации добываемых вод в процессе эксплуатации водоносного комплекса сармат-мэотис-понтических отложений свидетельствует о том, что засоление подземных вод происходит, вероятнее всего, за счёт притока более минерализованных вод из нижних частей водоносной толщи. Подтягивание солёных вод по площади, как основную причину засоления водоносного комплекса, можно исключить, поскольку в плане четкой закономерности положения границ, разделяющих подземные воды с различной минерализацией, не прослеживается.

На повышение минерализации подземных вод сармат-мэотис-понтических отложений в первую очередь влияет приток хлоридных магниевых вод, это прослеживается практически для всех скважин, кроме 2357, 2358. При этом отмечается сильная корреляционная связь не только между изменением сухого остатка и концентрацией хлорид-иона, кальция и магния, но также связь между концентрациями хлорид-иона и кальция, хлорид-иона и магния.

Таким образом, химический состав подтягиваемых вод позволяет предполагать, что на более глубоких горизонтах сармат-мэотис-понтического водоносного комплекса происходит процесс метаморфизации седиментогенных вод. Это явление ярко выражено непосредственно на южной части территории (*II группа скважин*), в приосевой зоне Северо-Сивашского прогиба.

Процессы метаморфизации подземных вод в неогеновых отложениях артезианских бассейнов слабо изучены. Основной фактор формирования данных типов вод является палеогидрогеологический. Трансгрессия моря началась в среднем миоцене и достигла максимума в нижнем сармате, это была трансгрессия мелкого моря и оно покрыло весь Крымский п-ов. В конце сармата равнинный Крым частично осушился, но затем началась мэотическая трансгрессия [3]. В результате испарительного концентрирования морской воды происходило формирование рассолов. В дальнейшем такие рассолы захоронились вместе с вмещающими

осадочными породами и подверглись геохимической метаморфизации в этих породах в ходе геологической эволюции структур. Изменение химического состава рассолов происходило по общей схеме $Cl-Mg \rightarrow Cl-Mg-Na \rightarrow Cl-Mg-Ca \rightarrow Cl-Ca-Mg \rightarrow Cl-Ca-Na \rightarrow Cl-Ca$, при этом увеличивалась минерализация (это связано с тем, что кальций имеет почти в два раза большую атомную массу, чем магний) [2].

В результате метаморфизации происходило уменьшение концентрации сульфатов и замена магния и натрия, преобладающих в первичных водах, на кальций, а также увеличение минерализации подземных вод.

Генетическими признаками метаморфизованных рассолов являются характерные геохимические соотношения Cl/Bg и Na/Cl . Для подземных вод типично повышенное содержание бром-иона от 0,6 до 22 мг/л, при этом значения отношения Cl/Bg изменяются от 150 к 20,5. Низкие значения отношения являются особенностью формирования седиментогенных вод. Вследствие малого содержания натрия седиментогенные рассолы имеют низкие значения отношения Na/Cl , для подземных вод характерно уменьшение данного соотношения от 2 до 0,4, что также является признаком формирования метаморфизованных вод.

Для скважин 2357, 2358 отмечается увеличение величины минерализации из-за роста концентрации сульфат-иона. Формирование сульфатных вод прежде всего связано с особенностями геологического строения, так как в средне-верхнеплиоценовых и четвертичных отложениях отмечается наличие кристаллов гипса. В геологическом разрезе участка исследования отмечаются зоны с гидравлической связью сармат-мэотис-понтического водоносного комплекса и вышележащих водоносных горизонтов, воды которых относятся к сульфатному типу.

Несмотря на достаточно удалённое расположение I и II группы скважин, прослеживается тенденция — практически близкая скорость изменения основных нормируемых компонентов.

При этом для *II группы* типично более быстрое изменение компонентов, что связано с более интенсивным подтягиванием метаморфизованных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булахова К.Я. Ухудшение качества подземных вод на территории северной части Республики Крым // Геология в развивающемся мире: сборник научных по материалам XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 3. Пермь, 2018. С. 104.
2. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. Издание второе, дополненное / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швеиц. М., ЦентрЛит-НефтеГаз, 2012. 672 с.
3. Гидрогеология СССР. Том VIII. Крым / Ред. Е.В. Рипский, Е.А. Ришес, В.Г. Ткачук, Н.И. Толстухин. М.: Недра, 1971. 364 с.
4. Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2016 году / Под редакцией В.Н. Васильева; Симферополь, 2016. 315 с.
5. Двойченко П.А. Гидрогеологический очерк населенных пунктов Перекопского уезда : 1910 г / П. Двойченко. Симферополь: Тавр. губ. земство, 1910 (обл. 1911). 36 с.
6. Лушик А.В. Подземные воды карстовых платформенных областей юга Украины / А.В. Лушик, В.И. Морозов, В.П. Мелешин и др. Киев: Наук. думка, 1981. 200 с.
7. Подземные воды СССР: Обзор подземных вод Крымской области / Киев: М-во геологии СССР. Всесоюз. геол. фонд. Трест «Киевгеология». Т. 2. Буровые на воду скважины. Кн. 5,

- Красноперекопский район / Сост. Е.А. Ришес, Н.В. Полякова, А.П. Пяткина и др. 1969. 285 с
8. Подземные воды СССР: Обзор подземных вод Крымской области / Киев: М-во геологии СССР. Всесоюз. геол. фонд. Трест «Киевгеология». Т. 3. Результаты химических и бактериологических анализов / Сост. Е.А. Ришес, Н.В. Полякова, А.П. Пяткина [и др.]. 1969. 285 с.
9. СанПиН 2.1.4.1074-01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества. Введен 2001-09-01. М., 2001. 62 с.
10. Статистические методы обработки экспериментальных данных: Методические указания к лабораторным занятиям / Сост.: С.М. Судариков; Санкт-Петербургский государственный горный университет. СПб., 2011. 37 с.

REFERENCES

1. Bulakhova K.Ya. Improvement of underground water quality at the northern part of the republic of Crimea. *Geology in the developing world: XI Collection of scientific papers*. 2018, V. 3, pp. 104–107. (In Russian)
2. Kraynov C.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geochemistry of groundwater. Theoretical, applied and environmental aspects*. M., CenrtLitNefteGaz Publ., 2012, 672 p. (In Russian)
3. Ripskiy E.V., Rishes E.A., Tkachuk V.G. et.al. *Hydrogeology of the USSR. Volume VIII. Crimea*. M., Nedra Publ., 1971, 364 p. (In Russian)
4. *Report on the state and protection of the environment on the territory of the Republic of Crimea in 2016*. Edited by V.N. Vasiliev; Simferopol, 2016, 315 p. (In Russian)
5. Dvoichenko P.A. *Hydrogeological essay settlements of Perekop District*, 1910. Simferopol, Taurus, lips Zemstvo, 1910, 36 p. (In Russian)
6. Luschnik A.V. *Groundwaters of karst platform regions of the south of Ukraine*. Kiev, Nauk. Dumka Publ., 1981, 200 p. (In Russian)
7. Riches E.A., Polyakova N.V., Pyatkina A.P. et al. *Groundwaters of the USSR: Overview of groundwaters of the Crimean region. Volume 2: Drilling on water wells. Book 5, Krasnoperekopsky district*. Kiev, The Ministry of Geology of the USSR, All-Union. geol. fund. trust «Kievgeology» Publ, 1969, 285 p. (In Russian)
8. Riches E.A., Polyakova N.V., Pyatkina A.P. et al. *Groundwaters of the USSR: Overview of groundwaters of the Crimean region/ Volume 3: Results of chemical and bacteriological analyzes*. Kiev, The Ministry of Geology of the USSR, All-Union. geol. fund. trust «Kievgeology» Publ., 1969, 285 p. (In Russian)
9. СанПиН 2.1.4.1074-01 *Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized water supply systems. Quality control. Introduced 2001-09-01*, M., 2001, 62 p. (In Russian)
10. *Statistical methods for processing experimental data. Guidelines for laboratory work*. Comp. S.M. Sudarikov. St. Petersburg, St. Petersburg State Mining University Publ., 2011, 37 p. (In Russian)

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ
GEOPHYSICAL METHODS OF PROSPECTING AND EXPLORATION

УДК: 550.837.75

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ПРОСТРАНСТВА,
ВЛИЯЮЩИХ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОВОЛНОВОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ

А.Д. КАРИНСКИЙ¹, Н.М. КУЗНЕЦОВ²

*¹ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., Москва 117997, Россия
email: akarinski@mail.ru*

*²ООО «Радионда»
а/я 44, Москва 121614, Россия
email: n.kuznetsov@radionda.ru*

Известно, что в изоляторе областью, оказывающей основное влияние на распространение электромагнитных волн, является половина первой зоны Френеля. Но горные породы — проводящая среда. Приведены примеры результатов расчётов, иллюстрирующие, какая область проводящего пространства может оказать существенное влияние на результаты метода радиоволнового просвечивания. При применённом подходе каждый элемент ΔV_i проводящего пространства, отличающийся электрическими параметрами от всех других элементов, служит источником вторичного электромагнитного поля, подобного полю переменного электрического диполя. Результаты математического моделирования позволяют определить, какая область проводящей среды при тех или иных условиях оказывает основное влияние на результаты радиоволнового просвечивания.

К л ю ч е в ы е с л о в а: радиоволновое просвечивание; проводящая среда; влияние областей пространства.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-3-72-76

DEFINITION OF THE AREAS OF SPACE AFFECTING RESULTS
OF THE RADIO-WAVE METHOD

A.D. KARINSKIY¹, N.M. KUZNETSOV²

*¹Russian State Geological Prospecting University
23, Miklouho-Maklay's street, Moscow 117997, Russia
email: akarinski@mail.ru*

*²Radionda LTD
Post office box 44, Moscow 121614, Russia
email: n.kuznetsov@radionda.ru*

It is known that in the insulator the area that has the main influence on the propagation of electromagnetic waves, is determined by the radius of the first Fresnel zone. But rocks are conductive medium. Examples of the results of calculations have been given, illustrating which area of the conducting space can have a significant impact on the re-

sults of the radio-wave method. In the given approach, each element ΔV_i of a conducting space, differing in electrical parameters from all other elements, is a source of a secondary electromagnetic field, similar to the field of an alternating electric dipole. The results of mathematical modeling can help to determine which area of the conducting medium under certain conditions has the main influence on the results of radio wave method. Simulation results can determine which region of the conductive medium has a major influence on the results of radio-wave method.

К е у в о р д с: radio-wave method; conductive medium; influence of areas of space.

В соответствии с принципом Гюйгенса—Френеля каждую точку пространства, охваченного волновым процессом, можно рассматривать как источник вторичных волн. Математическое обоснование этому дают формулы Кирхгофа и Пуассона. Но такой подход обоснован для случая распространения электромагнитного (ЭМ) поля в изоляторе, либо поля упругих смещений в абсолютно упругой среде, когда поля распространяются без затухания и в однородных областях среды удовлетворяют волновым уравнениям.

Если названные поля меняются со временем гармонически, с частотой f , то их компоненты удовлетворяют уравнению Гельмгольца с действительным волновым числом k . В этом случае для определения области пространства, оказывающей существенное влияние на распространение поля от его точечного стороннего возбудителя T до точки наблюдения (приёмника) r , удобно воспользоваться представлениями о зонах Френеля. На рис. 1 показано сечение зон Френеля плоскостью рисунка, проходящей через точки T и r . Центральная область синего цвета соответствует 1-й зоне Френеля V_1 , а её ограниченная штриховой линией часть $V_{1/2}$ (половина первой зоны Френеля) — область, существенно влияющая на распространение волн от точки T к точке r . Вкладами источников вторичных волн, расположенных вне области $V_{1/2}$, в поле в точке r можно пренебречь.

Метод радиоволнового просвечивания (РВП) основан на изучении прохождения радиоволн через горные породы. Метод РВП начали применять в разведочной геофизике в первой половине прошлого века в основном с целью обнаружения и локализации хорошо проводящих тел с низким удельным электрическим сопротивлением и соответственно большим коэффициентом поглощения ЭМ волн [6].

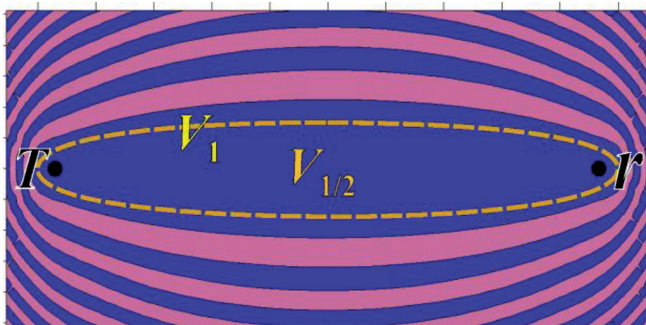


Рис 1. Сечения первой зоны Френеля V_1 и области $V_{1/2}$, оказывающей существенное влияние на распространение волн

При РВП волны распространяются не в изоляторе, а в проводящей среде и подвержены затуханию. В однородных областях такой среды компоненты ЭМ поля удовлетворяют телеграфным уравнениям, а для гармонически меняющихся полей — уравнениям Гельмгольца с комплексным волновым числом $k = a + i \cdot b$. На характеристики высокочастотного ЭМ поля оказывают влияние диэлектрическая проницаемость ϵ и удельное электрическое сопротивление ρ . От этих параметров и от частоты f зависят волновое число, длина волны $\lambda = 2\pi/a$, глубина проникновения $\delta = 1/b$ и отношение амплитуд соответствующих компонент векторов плотности токов смещения и плотности токов проводимости ($j^{\text{см}}/j$).

В [1] дано обоснование применению оригинального подхода к определению областей пространства, влияющих на результаты некоторых геофизических методов. Показано, что влияние на поле каждого малого элемента ΔV_i , отличающегося по электрическим параметрам от вмещающей среды, идентично влиянию постоянного или переменного электрического диполя. Достоверность получаемых на основе этого подхода данных подтверждено, в частности, сравнение полученных нами результатов расчётов для электроразведки методом сопротивлений с данными, полученными другими способами и опубликованными в зарубежных научных изданиях, например, в [8, 9]. Позже результаты исследований по этой тематике для некоторых методов электроразведки (СЭП, ВЭЗ, СГ и др.) были представлены в [2–4].

В настоящей работе приведены примеры результатов математического моделирования, иллюстрирующие то, какая область проводящего пространства может оказывать основное влияние на результаты радиоволнового просвечивания. Для моделирования послужили алгоритмы и программы для численных расчётов на основе приближённого решения прямой задачи электродинамики для модели, показанной на рис. 2. Векторы E^n , H^n — электрическая и магнитная составляющие первичного ЭМ поля — поля в безграничной однородной среде. Обычно обусловленное наличием имеющего форму шара объекта ΔV_i вторичное поле может быть выражено в виде бесконечных рядов, члены которых содержат сферические функции Бесселя и другие специальные функции [7]. Но для случая, когда первичное ЭМ поле однородно в пределах объекта ΔV_i и при достаточно малых размерах ΔV_i , точнее при условии $|k_e| \cdot R_{\text{ш}} \ll 1$ (рис. 2), обуслов-

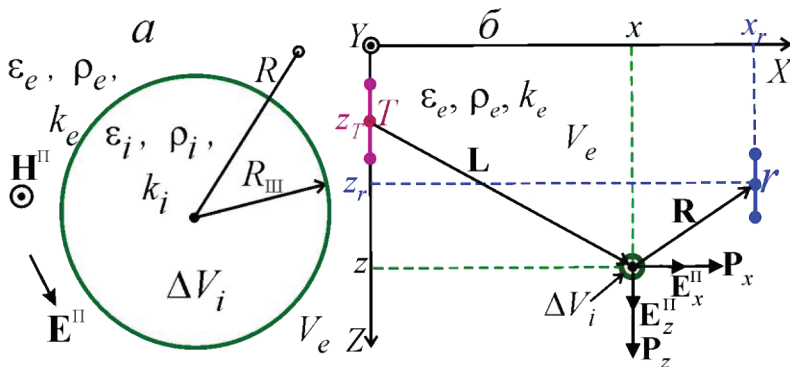


Рис 2. Объект ΔV_i в форме шара в первичном электромагнитном поле (а); генераторная (Т) и измерительная (r) антенны и компоненты дипольного момента элемента ΔV_i (б)

ленное присутствием объекта вторичное поле удалось выразить в виде элементарной функции — суммы полей гармонически меняющихся с частотой f электрических диполей с моментами $\mathbf{P}_x, \mathbf{P}_y, \mathbf{P}_z$ пропорциональными соответствующим компонентам электрической составляющей $\mathbf{E}^{\Pi}$ первичного ЭМ поля, создаваемого генераторной антенной Т. Моменты эти зависят от компонент поля $\mathbf{E}^{\Pi}$, частоты f , параметров объекта ΔV_i и вмещающей его среды в области V_e .

На рис. 3 приведены примеры результатов расчётов, полученных на основе применённого нами

подхода. Генераторная (Т) и измерительная (r) антенны лежат в плоскости $y = 0$. Показаны результаты расчётов для нескольких плоскостей $y/\lambda_e = \text{const}$, где λ_e — длина волны в области пространства V_e . Значения x, y, z — координаты центров малых объектов ΔV_i . Оттенкам красного и синего цветов на рис. 3 соответствуют случаи, когда присутствие ΔV_i приводит соответственно к увеличению или уменьшению напряжения суммарного электрического поля в измерительной антенне r по сравнению с напряжением первичного поля (поля в отсутствие ΔV_i).

Результаты расчётов (рис. 3) получены при частоте $f = 3$ МГц и следующих электрических параметрах области V_e : $\epsilon_e = 5$, $\rho_e = 1000$ Ом·м. При этих значениях длина волны $\lambda_e \approx 39,5$ м, глубина проникновения $\delta_e \approx 13,4$ м, а отношение амплитуд плотности токов смещения и плотности токов проводимости ($j^{\text{см}}/j$) $\approx 0,833$, т. е. это отношение близко к единице ($j^{\text{см}} \approx j$). Заметим, что в изоляторе отношение ($j^{\text{см}}/j$) было бы бесконечно велико, так как в этом случае $j = 0$. Электрические параметры элемента ΔV_i : $\rho_i = 10$ Ом·м, $\epsilon_i = 81$.

Случаю, в котором в области V_e отношение $j^{\text{см}}/j$ соизмеримо с единицей, отвечает распространение

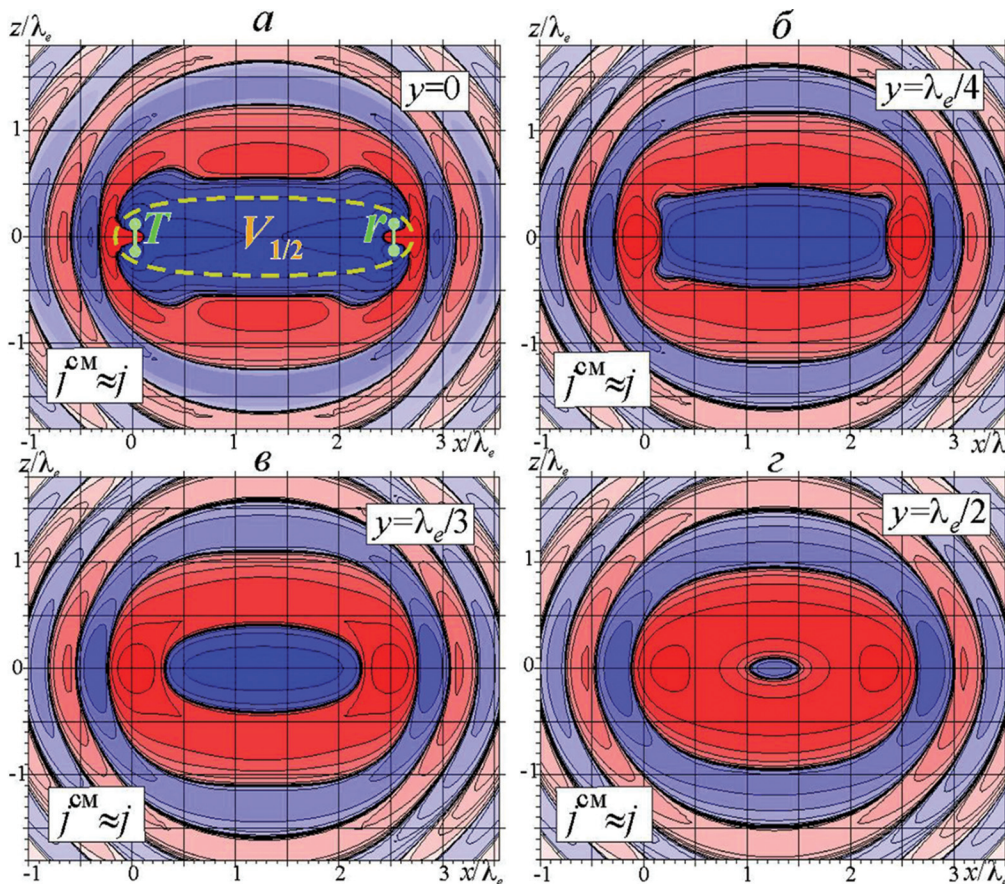


Рис. 3. Влияние малых объектов ΔV_i на напряжение в измерительной антенне при $j^{\text{см}} \approx j$

затухающей ЭМ волны, что, судя по результатам моделирования на рис. 3, позволяет на основе численных расчётов воспользоваться понятием области $V_{1/2}$, оказывающей существенное влияние на распространение волн от генераторной антенны T к измерительной антенне r в методе РВП. Показанная на рис. 3, a синим цветом центральная часть плоскости $y = 0$ — это некоторый аналог сечения такой плоскостью первой зоны Френеля. Штриховой линией на этом рисунке ограничено сечение области $V_{1/2}$, аналога половины первой зоны Френеля — области, оказывающей существенное влияние на распространение ЭМ волн в изоляторе.

Понятно, что при других значениях частоты f , электрических параметров ε_e , ρ_e , ε_i , ρ_i , а также при иных размерах и взаимном положении генераторной и измерительной антенн будет другой и область $V_{1/2}$, оказывающая существенное влияние на результаты радиоволнового просвечивания. В случаях, когда во вмещающей изучаемые объекты среде отношение j^{cm}/j соизмеримо с единицей, или значительно превосходит единицу, на основе разработанного подхода не сложно установить, какова эта область $V_{1/2}$ в каждом конкретном случае.

Но при решении при помощи радиоволнового просвечивания некоторых задач ЭМ поле во вмещающей изучаемые объекты проводящей среде может быть квазистационарным. Это означает, что в такой среде справедливо неравенство $j^{cm} \ll j$. На рис. 4 приведены результаты моделирования для случая, когда во вмещающей малые объекты ΔV_i

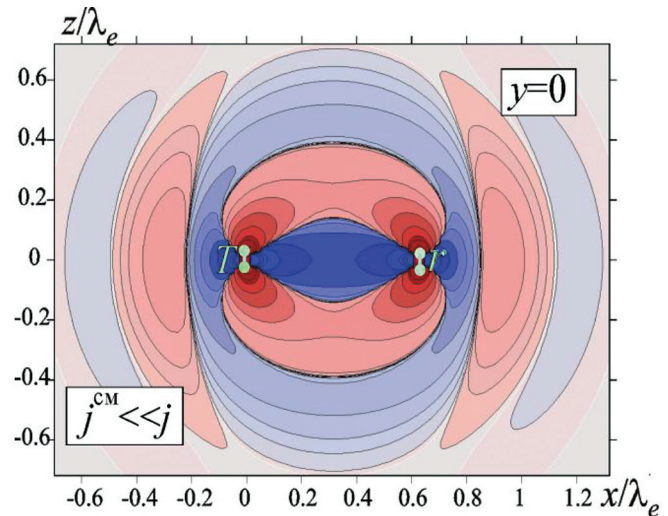


Рис. 4. Влияние малых объектов ΔV_i на напряжение в измерительной антенне при $j^{cm} \ll j$

среде (см. рис. 2) амплитуда плотности тока смещения $j^{cm} \ll j$, т. е. в области V_e гармонически меняющееся ЭМ поле — квазистационарное и говорить о распространении такого поля в «строгом» смысле этого термина не приходится. Как видно на рис. 4, при $j^{cm} \ll j$ нет подобного половине первой зоны Френеля аналога области $V_{1/2}$, оказывающей основное влияние на распространение волн. В этом случае нужны иные подходы для определения областей пространства, оказывающих основное влияние на результаты радиоволнового просвечивания. Одна из современных методик интерпретации результатов РВП рассмотрена в [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Каринский А.Д., Даев Д.С. Об областях пространства, существенно влияющих на результаты измерений в электромагнитных методах // «Геофизика». Научно-технический журнал. ЕАГО. 2012. № 6. С. 42–53.
2. Каринский А.Д., Даев Д.С., Мазитова И.К. Математическое моделирование С-эффекта и Р-эффекта в методах сопротивлений электроразведки // «Геофизика». Научно-технический журнал ЕАГО. 2014. № 1. С. 36–45.
3. Каринский А.Д., Даев Д.С., Мазитова И.К., Юдин М.Н. Математическое моделирование влияния локальных объектов на результаты методов сопротивлений электроразведки // Международная научно-практическая конференция «Теория и практика разведочной и промышленной геофизики», г. Пермь, 24–26 ноября 2016 г. Сборник научных трудов. Пермь. 2016. С. 122–126.
4. Каринский А.Д., Даев Д.С. Влияние локальных объектов на результаты электроразведки методом сопротивлений; опыт математического моделирования // «Геофизика». Научно-технический журнал. ЕАГО. 2017. № 1. С. 35–44.
5. Кузнецов Н.М. Способ 3D обработки данных радиоволнового просвечивания межскважинного пространства // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 1. В. № 19. С. 240–246.
6. Петровский А.А., Достовалов Б.Н. Первые опыты просвечивания вечной мерзлоты электромагнитными волнами // Труды института мерзлотоведения АН СССР. 1947. Т. 5. С. 121–160.
7. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: Изд-во ЛКИ. 2008. 656 с.
8. Locke M.H. and Dahlin T.A. comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion // Journal of Applied Geophysics. 2002. 49. P. 149–162.
9. Mc Gillivray P.R. and Oldenburg D.W. Methods for calculating Fréchet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: a comparative study // Geophysical Prospecting. 1990. 38. P. 499–524.

REFERENCES

1. Karinskiy A.D., Dayev D.S. Ob oblastiakh prostranstva, sushchestvenno vliyayushchikh na rezul'taty izmereniy v elektromagnitnykh metodakh. [Karinskiy A.D., Dayev D.S. About determination the area of space, significantly influencing on measurement's results in electromagnetic methods of geophysics] *The Russian Geophysics Journal*, 2012, issue 6, pp. 42–53. (In Russian).
2. Karinskiy A.D., Dayev D.S., Mazitova I.K. Matematicheskoye modelirovaniye S-effekta i R-effekta v metodakh soprotivleniy elektrozvedki. [Karinskiy A.D., Dayev D.S., Mazitova I.K. Mathematical modeling of the local objects influence on the results of resistivity methods of geophysics]. *Sbornik nauchnykh trudov*, pp. 122–126. [Karinskiy A.D., Dayev D.S., Mazitova I.K., Yudin M.N. Mathematical modeling of the local objects influence on the results of resistivity methods of geophysics]. *The Russian Geophysics Journal*, 2014, issue 1, pp. 36–45. (In Russian)
3. Karinskiy A.D., Dayev D.S., Mazitova I.K., Yudin M.N. Matematicheskoye modelirovaniye vliyaniya lokal'nykh ob'yektov na rezul'taty metodov soprotivleniy elektrozvedki. *Sbornik nauchnykh trudov*, pp. 122–126. [Karinskiy A.D., Dayev D.S., Mazitova I.K., Yudin M.N. Mathematical modeling of the local objects influence on the results of resistivity methods of geophysics]. *The Russian Geophysics Journal*, 2016, issue 1, pp. 122–126. (In Russian)

- objects influence on the results of the methods of aparent resistance in electrical survey. [*Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Teoriya i praktika razvedochnoy i promyslovoy geofiziki», g. Perm', 24–26 noyabrya 2016 g.*] *Theory and practice of exploration and petroleum geophysics. Collection of scientific papers*. Perm, 2016, pp. 122–126. (In Russian)
4. Karinskiy A.D., Dayev D.S. Vliyaniye lokal'nykh ob"yektov na rezul'taty elektrorazvedki metodom soprotivleniy; opyt matematicheskogo modelirovaniya [Karinskiy A.D., Daev D.S. Influence of local objects on the resistivity method results; experience of mathematical modeling] [*«Geofizika». Nauchno-tekhnicheskii zhurnal*. YEAGO, 2017, no 1, pp. 35–44. *The Russian Geophysics Journal*, 2017, issue 1, pp. 35–44]. (In Russian).
 5. Kuznetsov N.M. Sposob 3D obrabotki dannykh radiovolnovogo prosvechivaniya mezhskvazhinnogo prostranstva. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2012, no 1, vypusk N 19, S. 240–246. [Kuznetsov N. M. Method for 3D data processing of radio wave scandling of the interwell space. *Bulletin KRAUNZ. Earth Sciences*, 2012, no. 1, Issue no. 19, pp. 240–246]. (In Russian)
 6. Petrovskiy A.A., Dostovalov B.N. Pervyye opyty prosvechivaniya vechnoy merzloty elektromagnitnymi volnami. (*Trudy instituta merzlotovedeniya AN SSSR*. 1947. T. 5. S. 121–160). [Petrovskiy A.A., Dostovalov B.N. The first experiments of permafrost scanning by electromagnetic waves. *Proceedings of the Institute of Permafrost of the Academy of Sciences of the USSR*, 1947, V. 5, pp. 121–160]. (In Russian)
 7. Svetov B.S. *Osnovy geoelektriki*. [Svetov B.S. Geoelectrics basics. M., Publisher LKI, 2008, 656 p. (In Russian)]
 8. Loke M.H. and Dahlin T.A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 2002, 49, pp. 149–162.
 9. McGillivray P.R. and Oldenburg D.W. Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: a comparative study. *Geophysical Prospecting*, 1990, 38, pp. 499–524.
-

ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ
FROM THE HISTORY OF SCIENCE

УДК 55(091)

ЖЕНЩИНЫ В ГЕОЛОГИИ.
ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА МОЛДАВСКАЯ (1891—1973)

И.А. СТАРОДУБЦЕВА

*Государственный Геологический музей им. В.И. Вернадского РАН
11 стр., 11 д., Моховая ул., Москва 125009, Россия
e-mail: iraidastar@mail.ru*

Е.А. Молдавская принадлежит к первым отечественным женщинам-геологам, занимавшимся практической геологией. В 1918 г. она окончила Московские Высшие женские курсы по специальности «геология» и около 40 лет проработала по избранной профессии. Е.А. Молдавская проводила геологические и инженерно-геологические исследования в Подмосковье, Поволжье, Белоруссии. Она занималась разведкой и оценкой месторождений ратовкита, известняков, глин, гипса, составила сводку «Минерально-сырьевая база гипсовой промышленности СССР». Е.А. Молдавская руководила темой «Оценка перспектив газоносности палеозоя Москвы и Подмосковья», занималась геологическими изысканиями для тепловых электростанций и составила инструкцию по изысканиям строительных материалов. Е.А. Молдавская награждена медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941—1945 гг.» (1946 г.), «В память 800-летия Москвы» (1948 г.). Впервые рассмотрена профессиональная деятельность Е.А. Молдавской и приведены её биографические данные.

Ключевые слова: женщины-геологи; Московские Высшие женские курсы; месторождения полезных ископаемых; ратовкит; гипс.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-3-77-85

WOMEN IN GEOLOGY
ELENA ALEXANDROVNA MOLDAVSKAYA (1891—1973)

I.A. STARODUBTSEVA

*Vernadsky State Geological Museum of Russian Academy of Sciences
building 11, 11, Mohovaya street, Moscow 125009, Russia
e-mail: iraidastar@mail.ru*

E.A. Moldavskaya was one of the first Russian women-geologists engaged in practical geology. In 1918, she graduated from the Moscow Women's Courses of Higher Education in geology and worked for about 40 years in the chosen profession. E.A. Moldavskaya controlled geological and engineering-geological researches in Moscow region, Volga region, Belarus. She was engaged in exploration and evaluation of ratovkite, limestone, clay, gypsum deposits, and compiled a summary «Mineral resources of the gypsum industry of the USSR». E.A. Moldavskaya supervised the theme «Assessment of the gas potential prospects in Moscow and Moscow region», took part in geological survey for thermal power plants and made the instruction on researches of constructional materials for construction of those plants. E.A. Moldavskaya was awarded by medal «For Valorous Labour in the Great Patriotic war» (1946), «In memory of the 800th anniversary of Moscow» (1948). The professional activities and biography of E.A. Moldavskaya have been considered for the first time.

Keywords: women-geologists; Moscow Women's Courses of Higher Education; mineral deposits; ratovkite; gypsum.

Первая публикация о женщинах-геологах в отечественной литературе принадлежит Ф.Ю. Левинсону-Лессингу (1901 г.), позднее эту тему продолжил Д.В. Наливкин [7, 8]. Но статьи этих авторов касались прежде всего кратких биографий женщин-учёных, занимавшихся исследованиями в области палеонтологии, стратиграфии, минералогии. «Белым пятном» в истории геологии остаются женщины-геологи, выпускницы Московских Высших женских курсов, посвятившие жизнь прикладной геологии. Среди них О.А. Денисова (1893—1972), А.Э. Константинович (1892—не позднее 1951), Е.А. Молдавская (1891—1973).

Д.В. Наливкин приводит лишь их фамилии, но о Е.А. Молдавской пишет, что она училась лучше всех на курсе, а после окончания учёбы «ушла на работу в какое-то геологическое управление. Там она работала также добросовестно, как и получала пятёрки, но без всякого интереса и кроме небольших отчётов ничего не оставила» [7, с. 150]. Как же на самом деле сложилась профессиональная деятельность Е.А. Молдавской?

Елена Александровна Молдавская (рис. 1) родилась в Риге 11 (24) октября 1891 г. в семье медицинских работников. Её отец — Александр Павлович Молдавский, выпускник медицинского факультета Императорского Московского университета, всю жизнь работал врачом — сначала в Можайском, а затем в Бронницком уездах Московской губернии. Мать — Антонина Захарьевна (в девичестве Ширяева) до замужества была фельдшером, а потом посвятила себе семье. Е.А. Молдавская получила хорошее среднее образование: училась сначала в частной женской гимназии Л.Д. Ежовой в Москве, а затем в частной женской гимназии М.Г. Брюхоненко, куда поступила в 1909 г. в VII класс. Здесь, помимо обязательных предметов — закона Божьего, русского языка с церковно-славянским и словесности, математики, всеобщей и русской географии, естественной истории, всеобщей и русской истории, физики, математической географии, она дополнительно занималась рисованием, немецким, английским и французским языками. По окончании гимназии в 1910 г. Е.А. Молдавская была удостоена золотой медали и звания учительницы начальных классов с правом заниматься обучением на дому. На следующий год она продолжила учёбу в дополнительном VIII классе этой гимназии, и изучала педагогику и дидактику, начальное преподавание русского языка, начальное преподавание арифметики, гигиену, западную литературу и, дополнительно, географию и математику. В 1911 г., сдав все экзамены на «отлично», получила звание домашней наставницы географии и математики [10, д. 46, л. 103]. Однако



Рис. 1. Елена Александровна Молдавская.
Фото нач. XX в. [10]

учительствовать Е.А. Молдавская не стала, не пошла она и по стопам родителей-медиков, а выбрала редкую в то время для женщины профессию геолога. В 1911 г. она поступила на естественное отделение физико-математического факультета Московских Высших женских курсов. Курсисткам-геологам, изучавшим тригонометрию и геометрию, алгебру и физику, аналитическую и неорганическую химию, анатомию растений и ботанику, кристаллографию и минералогию, палеонтологию и историческую геологию, петрологию, физическую геологию и метеорологию, преподавали профессора Императорского Московского университета.

На женских курсах перед Первой мировой войной учились, ставшие впоследствии известными учёными, В.А. Варсанофьева, Т.А. Добролюбова, Е.Д. Сошкина, М.И. Шульга-Нестеренко. Как писал Д.В. Наливкин, среди курсисток выделялись В.А. Варсанофьева¹ и Е.А. Молдавская, последняя, «благодаря своим недюжинным способностям, по успеваемости была первой — по всем предметам у неё были одни пятёрки» [7, с. 63]. Отметим также, что Е.А. Молдавская много времени посвятила занятиям в Геологическом кабинете. Её учёба совпала с годами Первой мировой войны, и в 1915 г. Е.А. Молдавская в Яузской городской больнице в течение четырёх недель изучала анатомию, физиологию, хирургию и учение о повязках,

¹ Варсанофьева Вера Александровна (1890—1976) — геолог и геоморфолог, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент Академии педагогических наук СССР.

заразных болезнях, фармацию и фармакогнозию, гигиену и была признана «подготовленной к исполнению обязанностей сестры милосердия» [10, оп. 46, л. 91] (рис. 2). По-видимому, долгий срок её учёбы на Высших женских курсах (1911—1918 гг.) связан с работой в госпитале. В автобиографии она этот факт не упоминает, но сохранившиеся в её личном фонде в РГАЭ документы и коллективные фотографии сестёр милосердия Яузской городской больниц свидетельствуют в пользу такого предположения.

В 1917—1918 гг. Е.А. Молдавская, как вольнослушательница, в Петровском сельскохозяйствен-

ном институте (ныне Российский государственный аграрный университет-Сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева) прослушала у профессора А.Н. Семихатова курс лекций по гидрогеологии и занималась на кафедре минералогии у профессора Я.В. Самойлова. Отметим, что она всегда использовала возможность получить новые знания, так в 1936—1937 гг. прослушала и сдала на «отлично» курсы по геохимии и методике подсчёта запасов при Институте повышения квалификации руководящих и инженерно-технических работников, а в 1939 г. там же — курс «Технология вяжущего вещества (цементы)» [10, д. 46].

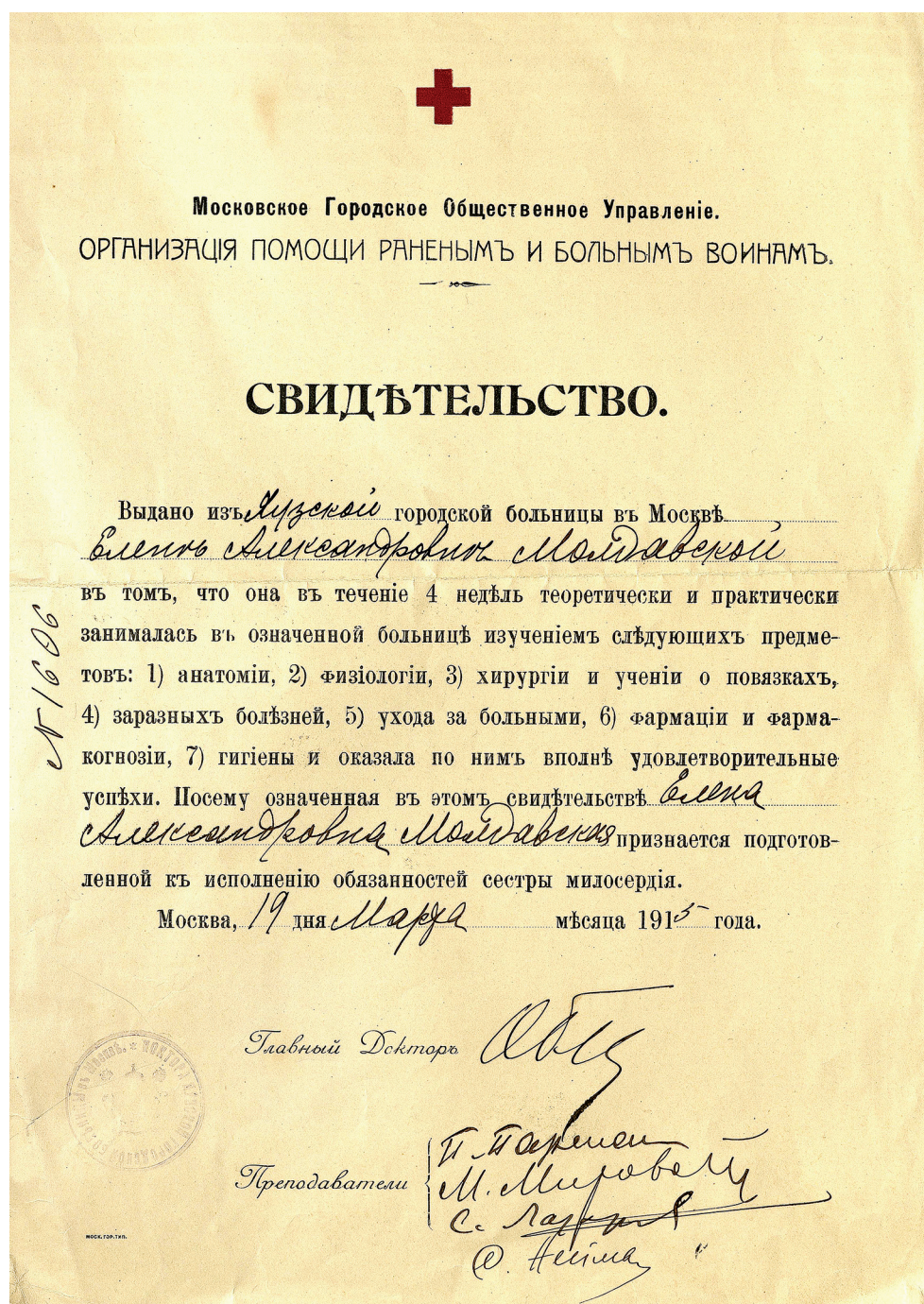


Рис. 2. Свидетельство сестры милосердия, выданное Е.А. Молдавской, 1915 г. [10]

В 1918 г., окончив Высшие женские курсы с дипломом первой степени, Е.А. Молдавская стала инструктором лекционной секции Отдела внешкольного образования Народного комиссариата просвещения. С 1919 г. началась её работа в геологии, продолжавшаяся сорок лет. Е.А. Молдавская занималась разведкой и оценкой месторождений полезных ископаемых, проводила гидрогеологические и инженерно-геологические изыскания. Сначала в 1919—1924 гг. она работала геологом гидрочасти Народного комиссариата земледелия и одновременно — геологом в Управлении Агрономической службы Северных железных дорог, занималась стратиграфией и гидрогеологией четвертичных отложений Юго-Западного фронта и проводила геологические исследования в нижнем течении Яхромы. В 1920—1923 гг. Е.А. Молдавская также работала ассистентом проф. А.П. Иванова на кафедре минералогии и геологии Московского ветеринарного института (институт был переведён в Ленинград в 1925 г.).

В 1921 г. Е.А. Молдавская была принята на работу внештатным научным сотрудником 1-го разряда в Московское отделение Геологического комитета (Геолкома). С 1925 г. по 1927 г. его сотрудниками под руководством А.Н. Розанова «осуществлялось маршрутное, с разной степенью детальности геологическое обследование уездов Московской губернии» [9, с. 8]. Большое внимание при этом уделялось подземным водам и проявлениям полезных ископаемых. Эти работы выполнялись сначала по поручению Московского отдела по земельным улучшениям, а потом Ассоциации по изучению производительных сил Московской губернии при Губплане. Как отметил руководитель работ А.Н. Розанов, «крайне незначительные средства позволяли организовывать только одну, а затем 2—3 партии» [4, с. 4]. В 1925 г. Е.А. Молдавскую назначили начальником партии, а затем и группы партий. Позднее в геологических исследованиях Подмосковья также принимали участие Н.Т. Зонов, А.Г. Завидонова, А.Э. Константинович, В.С. Яблоков, М.С. Швецов, С.А. Добров. Но первой была организована партия Е.А. Молдавской, в которой она была единственным сотрудником. Её полевые исследования охватили один из самых больших уездов — Орехово-Зуевский, представляющий часть Мещерской низменности, и как следствие, равнинный, заболоченный с незначительными выходами коренных пород, поэтому геологическое строение выяснялось, в основном, на основании данных буровых скважин, отвалов колодцев и карьеров [4].

Е.А. Молдавская приступила к работе в середине сентября 1925 г. в западной части уезда, а завершила исследования, общая площадь которых составила около 1200 км², 31 октября. Из полевых дневников следует, что она начинала работу, как

правило, около 6 часов утра, а заканчивала поздно вечером, шла пешком, ночевала в крестьянских избах. Она всегда фиксировала время прибытия на точку наблюдения и показания барометра; отмечала колодцы, их глубину, вкус воды. Так, она записала, что в середине д. Кудыкино, много колодцев «через 30—40 сажень, мелкие с журавлями, глубина — 2—3 саж., до воды — 1—2 саж. (от уровня земли). В отвалах чистки — желто-серый песок. У завалинок много крупных валунов, преимущественно шокшинских кварцитов» [10, д. 16, л. 6 об].

Е.А. Молдавская акцентирует внимание на торфоразработках и особенно — на кустарных разработках огнеупорной глины в окрестностях деревень Власово и Губино, представлявших собой ямы («глинище»), оплывшие и наполненные водой. В отвалах ям она обнаружила серые оолитовые мергели, шарообразные фосфоритовые конкреции («оксфордско-секванского типа»), обломки аммонитов и белемнитов и бело-зелёную глину. Она отметила, что «вокруг много глыб окремнелого известняка. Местами попадался известняк с неправильной верхней поверхностью каррового характера и куски чёрной (оксфорд) глины с белыми гипсовыми выцветами» [10, д. 16, л. 7]. Е.А. Молдавская привела разновидности добываемой глины: «песчанка» — глинисто-кварцево-песчанистая серая и серо-зелёная песчанистая порода, однородная, богатая мусковитом; «пушнина» и «мелкопуха» — тонко-песчанистые суглинистые породы, бедные слюдой, применявшиеся для огнеупорного кирпича и «мыльцовка» — жирная вязкая серая и серо-зелёная почти не слюдяная глина, использовавшаяся для изготовления капсул и фаянсового производства. По её наблюдениям эти разновидности «чередуются как вертикально, так и горизонтально. Быстро выклиниваются, упираясь в «стену» — известковый камень, составляющий подошву залежи» [там же]. Из расспросов местных жителей она выяснила, что некоторым разработкам более 50 лет, они ведутся подземными ходами — «печурами» только зимой, так как летом ямы заливают водой. Работают артелями по 8 человек, яма даёт от 3000 до 50000 пудов, общая площадь разработок около 5,6 квад. вёрст. Здесь рядом добывают известняк на известь «для кустарных нужд» [там же, л. 20]. В полевом дневнике есть и такие записи, например, 7 октября: «барометр всё время упорно падает. Отвратительная погода»; 9 октября — «ветер, снеговая туча, снег, барометр все время резко падает» и тут же запись «новый колодец, глубиной 4 сажени» [там же, л. 20]. По завершению работ Е.А. Молдавская составила предварительный отчёт. Исследования в восточной половине Орехово-Зуевского уезда она продолжила летом 1926 г.

В мае 1927 г. на секции съёмки Московского отделения Геолкома Е.А. Молдавская сделала док-

лад «О геологическом строении Орехово-Зуевского уезда Московской губернии». Результаты работ были опубликованы лишь в 1932 г. Е.А. Молдавская констатировала развитие каменноугольных отложений — московского и гжельского ярусов, юрских — среднего келловея, оксфорда, нижнего кимериджа. В керне буровых скважин ею был обнаружен прослой окатанных фосфоритов с ядрами аммонитов, характерных для волжского яруса и фосфоритовые сростки, источенные фолладами. Исходя из этого, Е.А. Молдавская предположила, что данные отложения были размывы трансгрессией раннемелового моря. Она констатировала присутствие пород нижнего мела (в восточной половине ею определены также аптский и альбский ярусы) и отсутствие верхнего мела. По её наблюдениям четвертичные отложения представлены в основном ледниковыми образованиями, а современные — торфяниками. Отдельные главы посвящены подземным водам и полезным ископаемым. Среди последних главными она считает огнеупорные глины «гжельско-кудиновского типа» [4]. Е.А. Молдавская уделила внимание их генезису и времени образования, не соглашаясь с взглядами таких авторитетных геологов, как С.Н. Никитин (1851—1909) и А.Д. Архангельский (1879—1940). Она писала, что С.Н. Никитин относил разновидность глины — мыльцовку — к морским образованиям келловея, а другие разновидности — к элювию карбонатных пород. А.Д. Архангельский считал гжельско-кудиновские глины каменноугольными. В результате исследований Е.А. Молдавская выяснила, что эти глины, нередко характеризующиеся горизонтальной и косой слоистостью, залегают на неровной эродированной поверхности каменноугольных известняков неравномерно (гнездообразно), с характерными переходами от глинистых разностей к более песчанистым и наоборот как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Полученные в ходе работ данные позволили ей прийти к заключению, что это континентальные делювиально-аллювиальные отложения, образование которых проходило после каменноугольного времени до среднего келловея (средняя юра) «за счёт переработанного и переотложенного материала каменноугольных глинисто-известковых пород» [4, с. 18]. В настоящее время эти глины выделены в кудиновскую свиту, возраст которой определён как поздний байос—ранний бат (средняя юра) [3].

Летом 1927 г. Е.А. Молдавская была командирована Московским отделением Геолкома в Боровской уезд Московской губернии для сбора материала для детализации 10-верстной карты четвертичных отложений, работала в долине рек Нара, Пахра и верховьях Мочи.

В 1928—1929 гг. Е.А. Молдавская проводила геологические исследования по заданию Ассоциации по изучению производительных сил Нижегородской губернии, основной задачей которых было «дать геологическое освещение района в связи с литологическими особенностями и данными по полезным ископаемым, не входя в какую-либо количественную оценку месторождений» [5, с. 52]. Значительное внимание при изысканиях уделялось подземным водам и проявлениям полезных ископаемых, так как в то время «геология была повернута лицом к производству, к решению практических нужд страны в части обеспечения ее минерально-сырьевыми ресурсами» [1, с. 15].

В первый год работы геологической съёмкой было охвачено 2000 км²: Приокский участок (правый — нагорный берег Оки), Балахонинский и Приволжский (Балахонинский и Катунско-Ширмакшинско-Узольский участки). Балахонинский и Катунско-Ширмакшинско-Узольский участки были исследованы по настоятельной личной просьбе председателя Ассоциации А.М. Горбачёва, учтившего их актуальное значение в обеспечении промышленности Нижегородской области минеральным сырьём [10, д. 19, л. 1].

Вместе с Е.А. Молдавской работал студент-дипломник Нижегородского педагогического института И.Н. Столяров, проводивший барометрическую съёмку, фотосъёмку и отбор образцов. В 1929 г. исследования в Нижегородской губернии были продолжены и охватили 4500 км² по правому и левому берегам Волги к югу и северу от Оки. Состав партии, по сравнению с предыдущим годом, увеличился, и кроме уже приобретшего опыт полевых исследований старшего коллектора И.Н. Столярова, работали младший коллектор студент Нижегородского университета А. Милехин и буровой мастер Д. Разуваев. Работы сопровождались неглубоким (до 17 м) бурением (было задано 45 скважин) и шурфовкой до глубины 2—3 м. Итог этим исследованиям был подведён в двух публикациях [5, 6]. Здесь Е.А. Молдавская подробно описала разрезы в стенках карьеров, естественных обнажений в бортах оврагов и береговых обрывах Оки и Волги. Она уделила внимание не только литологическому составу пород, но и их особенностям, указала на вертикальные трещины в слоях гипса, связанные с его выщелачиванием и оседанием и заполненные беспорядочно сгруппированным обломочным материалом вышележащих карбонатных пород, отметила соотношение гипса и палыгорскита. Е.А. Молдавская кратко охарактеризовала разработки гипса, в том числе и кустарные, которые велись дудками², указав на их отрицательные стороны. Она писала, что при такой разработке

² Дудка — вертикальная горная выработка овального сечения диаметром около 1 м и глубиной до 10—20 м, пройденная с поверхности до залежи полезного ископаемого.

большие перспективные участки забрасываются, когда наталкиваются на «мало трещиноватый алебастр³, который кустарям не под силу взять с их примитивным оборудованием» [5, с. 107]. Она отметила, что на добыче трудятся и женщины, которые «употребляются в качестве подавальщиц глыб алебаstra из дудки и их труд оплачивается дешевле [там же]. В публикациях она привела сведения о месторождениях полезных ископаемых, выявленных в районе работ: гипса и алебаstra, известняков и доломитов, глин и суглинков, песков, гравия и валунов, а также о проявлениях палыгорскита, фосфоритов, железных руд [5, 6].

В 1929 г. Геологический Комитет был преобразован в Главное геологоразведочное управление, а его Московское отделение — Московское районное геологоразведочное управление (МРГРУ), которому подчинялись и бывшие представительства Геолкома по Центрально-Чернозёмной области и Белорусской ССР [1]. В 1930-х гг. происходило непрерывное изменение структуры и состава геологической службы. В 1930 г. было создано Средне-Волжское районное геологическое управление, куда и была переведена Е.А. Молдавская. В 1930—1931 гг. она работала в окрестностях Самары по выявлению закарстованности. В 1931 г. Е.А. Молдавская проводила инженерно-геологические из-

ыскания в Белоруссии в связи со строительством мостов через Западную Двину и Днепр, поисковую разведку на мергеля как цементное сырье и т. д. В регионах к этому времени были созданы полевые геологоразведочные базы, которые объединяли все «действовавшие в их районе полевые партии и отряды» [1, с. 17]. На следующий год Е.А. Молдавскую перевели в Белорусское геологоразведочное управление геологом-консультантом Витебской геологической базы, где, помимо консультаций разведочных партий, она занималась уточнением стратиграфии четвертичных отложений окрестностей Витебска. В связи с состоянием здоровья, потребовавшего хирургического вмешательства, Е.А. Молдавская вынуждена была оставить работу и вернуться к ней в 1933 г. [10].

В 1933—1934 гг. вместе с мужем Н.Е. Савченко Е.А. Молдавская два месяца работала геологом Тасеевской геологоразведочной партии в Восточной Сибири. Эта партия, в задачи которой входило проведение разведки Падунской жилы с попутной добычей берилла, была создана в апреле 1933 г. и прекратила свою работу в 1934 г. [10]

Е.А. Молдавская вернулась в МРГРУ и в 1934 г. приступила к исследованиям месторождения ратовкита (землистой разновидности флюорита) в Тверской обл. Отметим, что 1933—1934 гг. были



Рис. 3. Е.А. Молдавская и сотрудники геолого-разведочной партии завода «Красный профинтерн». Коротнёвское месторождение ратовкита, фото 1935 г. [10]

³ Алебастр — зернистая разновидность гипса.



Рис. 4. Засечка штольни № 1. Коротнёвское месторождение ратовкита, фото 1935 г. [10]

годами острого дефицита флюорита, так как поставляемый в то время из Забайкалья и Туркестана флюорит не обеспечивал потребности металлургии в данном виде сырья. Это вызвало необходимость изыскивать местные ресурсы, в том числе ратовкит, известный в Тверской обл. со второй половины XIX в. Работы на ратовкит были инициированы Отделом земельного формовочного хозяйства завода «Красный профинтерн». Исследования Е.А. Молдавской охватили бассейны Волги от г. Зубцова до устья р. Держа и рек Осуга, Вазуза и Держа в их среднем и нижнем течении. Ратовкит здесь связан со среднекаменноугольными карбонатными породами. Е.А. Молдавская определила его приуроченность, согласно стратиграфической схеме А.П. Иванова (1926 г.), к средней части каширского горизонта. Для установления особенностей залежей ратовкита геолого-разведочные работы на р. Осуга сопровождались подземными выработками. (рис. 3, 4). В результате было выявлено четыре основных продуктивных горизонта ратовкита — три из них на р. Осуга у д. Коротнёво и один впервые установлен у д. Красное на р. Вазуза. Наиболее изучены были выдержанные по мощности и имеющие промышленное значение один из коротнёвских и красновский горизонты.

Ратовкит встречен в парагенезисе с палыгорскитизированной глиной, криноидным известняком и минералами группы кремнезёма — кварцем, кремнем, халцедоном и опалом. Рентгенометрические исследования ратовкита были проведены профессором Л.В. Пустоваловым. Сведения о работах, выполненных Е.А. Молдавской, содержатся в многотомном издании «Геология СССР»: «Впервые поисково-разведочные работы на ратовкит проводились Е.А. Молдавской в 1934—1935 гг. по берегам Волги и её притоков — Осуга, Держа и Вазуза в Зубцовском районе Калининской области. Этими работами линзы и прослои флюорита в обнажениях по оврагам и долинам рек были прослежены на площади более 1000 км². На двух участках площадью 0,7 га была проведена разведка, в результате которой с помощью расчисток и штолен выявлены и утверждены в ЦКЗ 130 т флюорита по категории С, а также проведена опытная его добыча. Разведывались при этом только прослои флюорита мощностью 0,05—0,15 м, содержащие от 40 до 93% CaF₂. Карбонатные породы между этими прослоями не изучались и содержание CaF₂ в них не определялось. Каких-либо работ по обогащению фторсодержащих пород, кроме ручной разборки, не производилось» [2, с. 114]. В отчёте Е.А. Молдавская отметила, что химические анализы ратовкита так и не были выполнены заводом Красный Профинтерн, что, по её мнению, обесценило актуальность работы. Использование ратовкита при пробных выплавках показало полную успешность замены им флюорита. Но вместе с тем Е.А. Молдавская указала на необходимость проведения экспериментальных исследований для выявления поведения ратовкита в различных технологических процессах. Был произведен подсчёт запасов по категории С, намечена себестоимость тонны ратовкита и даны рекомендации по её снижению за счёт попутной добычи доломита, залегающего в кровле ратовкитовых горизонтов, употреблявшегося на обжиг. Кроме того, предлагалось использовать хорошо полирующийся доломит коротнёвского горизонта как поделочный камень, окремнёный известняк — на бут, а ратовкит применять и в стекольной промышленности для получения матового стекла. Работы по изучению ратовкита для замены им флюорита не были завершены [10, д. 21]. В 1934 г. началась промышленная добыча флюорита на Амдерминском месторождении (Поллярный Урал) и дефицит данного вида сырья был быстро ликвидирован.

В 1930-х гг. в связи с реконструкцией Москвы возникла острая необходимость в различных строительных материалах, в том числе известняках и доломитах, используемых для производства синтетической мастики. В 1935 г. Асфальтово-битумный трест заключил с МРГРУ договор на разведку месторождений необходимого сырья. В связи с

этим договором Е.А. Молдавская проводила детальную разведку Песковского месторождения известняков и доломитов [10].

В 1937 г. Е.А. Молдавская перешла в Белорусское геологическое управление руководителем крупномасштабной геологической съёмки (спецзадание), а затем стала консультантом геологических партий в нескольких районах Белоруссии, была начальником партии Днепровской геологической съёмки, научным руководителем Верхне-Друтьевской и консультантом Березниковской геологической партии. В 1939 г. вернулась в Москву и поступила на работу старшим инженером-геологом в Главное геологоразведочное управление (Главгеология) Народного комиссариата промстройматериалов и занималась изучением гипсовой сырьевой базы НКПСМ СССР [10, д. 46].

В 1941—1943 гг., во время эвакуации, Е.А. Молдавская работала на Урале старшим геологом Отдела неметаллов Всесоюзной комиссии по запасам, а затем во Всесоюзном геологическом фонде по карте «Геологической занятости». После эвакуации вернулась на прежнее место работы в Главгеологию. Здесь она проводила экспертизы месторождений гипса и ревизию разведочных партий в Донбассе, Западной Украине, Латвии. Ею были составлены справка о перспективах снабжения гипсом уральской группы цемзаводов при НКПСМ (1945 г.), докладная записка (в соавторстве с С.П. Варпаховским) о перспективности намеченных Главгеологией гипсовых месторождений на Урале (1946 г.) и большая сводка «Минерально-сырьевая база гипсовой промышленности СССР» (1946 г.), в которой приведены сведения о 25 рудниках и 21 действующем и вводимом гипсовом заводе Главгипса СССР [10, д. 46].

В 1947 г. Е.А. Молдавская перешла в Главгазтоппром — Главное управление искусственного жидкого топлива и газа — Всесоюзный научно-исследовательский институт природных газов (ВНИИГАЗ), в котором руководила темой «Оценка перспектив газоносности палеозоя Москвы и Подмосковья». Эта тема была предложена профессором кафедры геологии газа и нефти МГУ И.О. Бродом (1902—1962). В процессе работы были проанализированы разрезы двух тысяч буровых скважин по Москве и Подмосковью, составлены схематические структурные карты масштаба 1:50000 по поверхности верейского горизонта, в основании касимовского яруса и рельефа повер-

хности каменноугольных отложений. 17 февраля 1950 г. на учёном совете ВНИИГАЗ Е.А. Молдавская сделала доклад по теме исследований, которым подвела следующий итог: «На территории описываемой площади нет прямых признаков нефти и газа, поверхностные выходы этих полезных ископаемых отсутствуют, не отмечено их появление и при бурении глубоких скважин» [10, д. 23, л. 140].

В 1951 г. Е.А. Молдавская начала работать руководителем геологической группы в Государственном тресте по проектированию теплоэлектростанций, энергосетей и подстанций («Теплоэлектропроект»). О её деятельности можно судить по документам, хранящимся в личном фонде Е.А. Молдавской в РГАЭ: «Отчёт о строительных материалах для строительства Черепетской ГРЭС» (1950 г.), «Отчёт о изысканиях геологических разрезов скважин для линий электропередач Молотов-Свердловск и материалы к нему» (1950—1956 гг.), «Проекты разрезов ручного и колонкового бурения по Молотовскому участку» (1954 г.), «Инженерно-геологические условия на закарстованных участках трассы ЛЭП 220 кв Молотов-Свердловск» и инструкций по изысканиям строительных материалов для строительства тепловых электростанций (1954 г.). В 1959 г. она вышла на пенсию [10].

Е.А. Молдавская награждена медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941—1945 гг.» (1946 г.), «В память 800-летия Москвы» (1948 г.).

Отметим, что Д.В. Наливкин в книге «Наши первые женщины-геологи», советовал молодежи брать пример не с Е.А. Молдавской, а с тех курсисток, которые стали крупными научными работниками [7]. Но разве всю жизнь посвятить вопросам практической геологии менее почётно и ответственно, чем заниматься фундаментальными исследованиями? Е.А. Молдавская занимает достойное место в числе первых отечественных женщин-геологов, которые, не смотря на все жизненные перипетии, трудности, тяжелые военные и послевоенные годы, выбранной профессии не изменили.

Научные исследования выполнены в рамках Государственного задания Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН по Теме № 0140-2019-0005 «Разработка информационной среды интеграции данных естественнонаучных музеев и сервисов их обработки для наук о Земле».

ЛИТЕРАТУРА

1. Геологическая служба Центральных районов России. История. Открытия. Люди. М.: ООО «Геоинформцентр». 2003. 397 с.
2. Геология СССР. Т. IV. Центр Европейской части СССР. Полезные ископаемые. М.: Недра, 1974, 200 с.
3. М и т т а В.В., А л е к с е е в А.С., Ш и к М.С. (ред.) и др. Унифицированная стратиграфическая схема юрских отложений Восточно-Европейской платформы. Объяснительная записка. М.: ПИН — ВНИГНИ, 2012. 14 л. + 64 с.
4. М о л д а в с к а я Е.А. Геологическое строение, подземные воды и полезные ископаемые Орехово-Зуевского, Петушинского и Куровского районов Московской обл. / Под ред. А.Н. Розанова. Серия 1. Геология. Вып. 1. М.: Изд-во Наркомата тяжелой промышленности, 1932. 123 с.

5. Молдавская Е.А. Геологическое строение и полезные ископаемые бывш. Нижегородской губ. // Недра Горьковского края. Серия первая / Под ред. А.Н. Розанова. Т. I. Горький: Горьковское краевое изд-во, 1933. С. 61–128.
6. Молдавская Е.А. Геологические исследования в 72 листе общей геологической карты Европейской части СССР. Центральная часть б. Нижегородской губернии // Недра Горьковского края. Серия первая. Геологическое строение, подземные воды и полезн. ископ. / Под ред. проф. А.Н. Розанова. Т. II. Горький: Горьковское краевое изд-во, 1933. С. 74–147.
7. Наливкин Д.В. Наши первые женщины-геологи. Л.: Наука, 1979. 214 с.
8. Наливкин Д.В. Первые женщины геологи Петербурга-Ленинграда // Геология — жизнь моя. Сборник очерков. Вып. 10. М.: Росгео, МПР РФ, 2003. С. 181–412.
9. Отдаём России. К 75-летию территориальной геологической службы в центральных районах Российской Федерации. М.: Недра, 1993. 191 с.
10. Российский государственный архив экономики (РГАЭ), фонд 19, опись 1 (геолог Молдавская Е.А.).

REFERENCES

1. *Geologicheskaja sluzhba Central'nyh rajonov Rossii. Istorija. Otkrytija. Ljudi.* [Geological survey of the Central regions of Russia. History. Openings. People]. M., «Geoinformtsentr» Publ., 2003, 397 p. (In Russian)
2. *Geologija SSSR. T. IV. Centr Evropejskoj chasti SSSR. Poleznye iskopaemye.* [Geology of the USSR. Vol. IV. The center of the European part of the USSR. Minerals]. M., Nedra Publ., 1974, 200 p. (In Russian)
3. Mitta V.V., Alekseev A.S., Shik M.S. (red.) i dr. Unificirovannaja stratigraficheskaja shema jurskih otlozhenij Vostochno-Evropejskoj platformy. *Ob'jasnitel'naja zapiska.* [Unified regional stratigraphic scheme of the Jurassic of East European Platform]. *Explanatory note.* Moscow, (PIN RAS — VNIGNI), 14 Tab. 64 p. (In Russian)
4. Moldavskaja E.A. *Geologicheskoe stroenie, podzemnye vody i poleznye iskopaemye Orekhovo-Zuevskogo, Petushinskogo i Kurovskogo rajonov Moskovskoj obl.* / pod red. A.N. Rozanova. *Serija 1. Geologija. Vyp. 1.* [Geological structure, underground water and minerals Orekhovo-Zuyevo, Petushki and the City districts of the Moscow region. (ed. Rozanov). Episode 1. Geology. Issue 1]. M., Publishing house of people's Commissariat of heavy industry, 1932, 123 p. (In Russian)
5. Moldavskaja E.A. *Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye byvsh. Nizhegorodskoj губ. Nedra Gor'kovskogo kraja. Serija pervaja* / pod red. A.N. Rozanova. [Geological structure and mineral resources of the former. Nizhny Novgorod lips. The bowels of the Gorky region. Series one. Ed. A.N. Rozanov. T. I. Gorky, Gorky regional publishing house, 1933, pp. 61–128. (In Russian)
6. Moldavskaja E.A. *Geologicheskie issledovanija v 72 liste obshhej geologicheskoy karty Evropejskoj chasti SSSR. Central'naja chast' b. Nizhegorodskoj gubernii* // *Nedra Gor'kovskogo kraja. Serija pervaja. Geologicheskoe stroenie, podzemnye vody i polezn. iskop.* / Pod red. prof. A.N. Rozanova. [Geological studies in 72 sheets of the General geological map of the European part of the USSR. Central part b. Nizhny Novgorod province. Subsoil of Gorky region. Series one. Geological structure, groundwater and is useful. Under the editorship of Professor A.N. Rozanov. Vol. II.] Gorky, Gorky regional publishing house, 1933, pp. 74–147. (In Russian)
7. Nalivkin D.V. *Nashi pervye zhenshhiny-geologi.* [Our first women geologists]. L., Nauka Publ., 1979, 214 p. (In Russian)
8. Nalivkin D.V. *Pervye zhenshhiny geologi Peterburga-Leningrada / Geologija — zhizn' moja. Sbornik ocherkov. Vyp. 10.* [The First women geologists of St. Petersburg-Leningrad. Geology is my life. Collection of essays. Issue. 10]. M., Rosgeo, MRN, 2003, pp. 181–412. (In Russian)
9. *Otdaem Rossii. K 75-letiju territorial'noj geologicheskoy sluzhby v central'nyh rajonah Rossijskoj federacii.* [Give Russia. To the 75th anniversary of territorial geological service in the Central regions of the Russian Federation]. M., Nedra Publ., 1993, 191 p. (In Russian)
10. *Rossijskij gosudarstvennyj arhiv jekonomiki (RGAE), fond 19, opis' 1 (geolog Moldavskaja E.A.)* [Russian state archive of Economics (RGAE), Fund 19, Inventory 1 (geologist E. A. Moldovskaya)]. (In Russian)

ВОПРОСЫ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
GEOLOGIC EDUCATION ISSUES

УДК 378.146

ОБ ОПЫТЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО
КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ ПО ИСТОРИЧЕСКОЙ ГЕОЛОГИИ В МГРИ

*Е.С. ГАПОНЕНКО, Л.В. НОВГОРОДОВА, Е.С. ЛЕКАЙ, Р.У. ЕРЕМЕНКО,
В.Н. КОМАРОВ, А.О. АНДРУХОВИЧ*

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

Выявлены возможности использования тестовых заданий различной формы для текущего контроля объективной оценки знаний студентов по исторической геологии. Приведены краткие сведения о сущности педагогического контроля и тестов. Рассмотрено значение контрольных карт для анализа и статистической обработки результатов тестирования. Подтверждена эффективность тестовой системы проверки для организации самоконтроля за ходом усвоения и закрепления полученных знаний, а также реализации управления самостоятельной учебной деятельностью обучающихся. Сделан вывод о том, что наиболее сложным является учебный материал, затрагивающий историю Земли в докембрии (10,0% правильных ответов), различные аспекты эволюции органического мира (10,1%), а также сведения о полезных ископаемых (11,5%). Самые хорошие знания студенты показали в области стратиграфического расчленения изучаемых интервалов геологической истории Земли (50,4%), особенностей палеозойского этапа (42,4%) и различных исторических аспектов (37,3%). Установлено, что максимальные затруднения, вне зависимости от содержания, вызывают требующие систематизированных знаний задания на соответствие (9,4%). Небольшая положительная динамика показателей успеваемости студентов выявлена в изучении материала, касающегося разновозрастных и разнотипных тектонических структур, а также в работе с тестами на установление соответствия. Доказано, что тестовая система контроля позволяет сделать более планомерным и результативным проведение занятий, организовать самоконтроль за ходом усвоения отдельных тем и корректировать лекционный материал для повышения эффективности обучения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: педагогика; образование; тестовый контроль; тестовое задание; мотивация; контроль знаний; историческая геология.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-3-86-92

TO THE EXPERIENCE IN THE USE OF TESTS FOR CURRENT CONTROL
OF KNOWLEDGE ON HISTORICAL GEOLOGY IN MGRI

*E.S. GAPONENKO, L.V. NOVGORODOVA, E.S. LEKAJ, R.U. EREMENKO,
V.N. KOMAROV, A.O. ANDRUHOVYCH*

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

The possibilities of using test tasks of various forms for the current control of the objective assessment of students knowledge of historical geology have been clarified. Brief information about the essence of pedagogical control and tests has been given. The value of control maps for the analysis and statistical processing of test results has been considered. The effectiveness of the test verification system for the organization of self-control over the course of assimilation

and consolidation of the acquired knowledge, as well as the implementation of self-management training activities of students, has been proved. It has been concluded that the educational material that affects the history of the Earth in the Precambrian is the most difficult (10,0% of the correct answers), as well as the various aspects of the evolution of the organic world (10,1%), and also the information about minerals (11,5%). Students showed the best knowledge in the field of stratigraphic division of the studied intervals of geological history of the Earth (50,4%), features of the Paleozoic stage (42,4%) and various historical aspects (37,3%). It has been established that the maximal difficulties, regardless of the content, cause the tasks requiring systematic knowledge for compliance (9,4%). A small positive dynamics of students performance indicators has been revealed in the study of the material relating to different ages and different types of tectonic structures, as well as in the work with tests to establish compliance. It has been proved that the test control system makes it possible to make more systematic and effective conduct of classes, organize a self-control over the course for mastering individual topics and adjust the lecture material to improve the efficiency of training. Data on the results of the test control of educational work should be fully used for timely adjustment of educational trajectories of students at all stages of training in historical geology. They will be necessary for the development of initiatives in mastering the future profession, creative abilities, the ability to plan and predict the results of their independent actions and to solve non-standard tasks.

Keywords: pedagogy; education; test control; test task; motivation; knowledge control; historical geology.

На современном этапе развития общества, производства и науки к учебным заведениям предъявляются всё более высокие требования. Непременной частью системы управления качеством работы образовательных учреждений является педагогический контроль усвоения студентами материала, который следует рассматривать в качестве действенного инструмента управления учебно-воспитательным процессом. Систематический и беспристрастный анализ хода изучения студентами учебных курсов, в соответствии с требованиями Государственных образовательных стандартов и программ дисциплин, способствует улучшению организации занятий и повышению уровня преподавания. Регулярная оценка качества обучения является важным звеном обратной связи между преподавателями и студентами. Она позволяет определить степень освоения дисциплины конкретным человеком на текущий момент, установить тенденции развития образовательного процесса и соответствие технологичности обучения программным требованиям.

Функции контроля разнообразны и взаимосвязаны. На современном этапе наиболее универсальной по возможностям применения персонифицированной формой объективной проверки знаний считается тестирование. Педагогический тест представляет собой систему лаконичных заданий специфической формы и определенного содержания с постепенно возрастающей трудностью, создаваемую для объективной и максимально быстрой оценки результативности познавательной деятельности обучающихся. Понятие «система» означает, что в тесте сконцентрированы взаимодополняемые, упорядоченные с точки зрения сложности задания, принадлежащие к одной и той же дисциплине. Содержание теста, естественно, предполагает включение в него только таких данных, которые находятся в строгом соответствии с учебным материалом изучаемого предмета. Тесты наглядно создают проблемную ситуацию, которая понимается как осознанное студентами интеллектуальное затруднение, пути преодоления которого требуют использования новых способов действий и знаний. Проблемное обучение способствует ак-

тивизации познавательной деятельности учащихся, а это в конечном итоге влияет на качество усвоения приобретаемых знаний, учит применять их в новых ситуациях, а также способствует формированию критического отношения к действительности.

Нами в весеннем семестре 2019 г. для оценки знаний и получения студентами системного представления об исторической геологии был целенаправленно проведен тестовый текущий контроль. Следует отметить, что обучение естественно-научным дисциплинам, а историческая геология, решающая мировоззренческую задачу восстановления естественной этапности геологического развития Земли, является ярким примером, составляет необходимую часть образовательной подготовки в высшей школе. Цели изучения естественно-научных дисциплин состоят не только в усвоении понятийного языка предмета и его законов, но и в активном использовании этих знаний при решении в дальнейшем различных профессиональных задач. Как уже было отмечено, важнейшая функция текущего контроля — функция обратной связи. Она позволила нам создать ясное представление о ходе процесса усвоения учебного материала у студентов, выявить у них умения применять знания при решении практических задач. Контроль способствовал тому, чтобы учащиеся не закрепили неправильное понимание сути рассмотренных понятий и ошибочные навыки.

Текущий контроль выполнялся в период аудиторной работы на лабораторных занятиях. Общая численность участвовавших в тестировании в шести академических группах составила 146 человек. Студенты были предупреждены о том, что контроль будет регулярным. Вначале занятия каждому опрашиваемому выдавался тест, на выполнение которого отводилось около 15—20 минут. В целях проверки прочности усвоенных знаний и их закрепления в тестовые задания постоянно включались вопросы всех ранее пройденных тем, причём с каждым новым тестом круг подобных вопросов расширялся. Это стимулировало закрепление изучаемой информации и соответствующий само-

контроль. В течение семестра тесты усложнялись, что требовало от студентов пополнения и углубления знаний. В процессе текущего контроля нами применялись следующие типы тестовых заданий: закрытой формы, открытой формы, на соответствие и установление правильной последовательности.

Наиболее активно использовались задания закрытой формы, включающие один вопрос и несколько ответов, правильным из которых обычно был один. При их создании был применён опыт, позволивший выяснить оптимальное число ответов в тестовом задании и число вопросов в тесте¹. Применявшаяся нами система контроля с использованием заданий закрытой формы имела следующие параметры: в каждом задании было шесть ответов, во время опроса студентам предлагалось ответить на 10 вопросов. Тестовые задания содержали неправильные ответы, которые были близки к правильным, что исключало возможность формального угадывания при определении нужного ответа или исключение заведомо ложного ответа. В ряде случаев из шести предлагавшихся ответов правильным были два ответа. В двух тестах использовались единичные задания закрытого типа, все ответы в которых были неверными, причём студенты были предупреждены о возможности наличия подобных вопросов только после первого их применения. Кроме того, в ряде тестов в число предложенных вариантов ответов нами были специально введёны выглядевшие правдоподобными фамилии учёных и понятия, которые не имели никакого отношения к исторической геологии и о которых ничего не говорилось ни на лабораторных, ни на лекционных занятиях.

В заданиях открытой формы не было возможных вариантов ответа. Студенты должны были дописать ответ в месте или местах прочерка. Ответы состояли из одного, двух и трёх ключевых понятий или терминов, знание которых являлось обязательным. Достоинство данного вида заданий заключается в том, что в них нет готового ответа. Это лишает студентов возможности угадывания и проверяет у них понимание материала, запоминание и воспроизведение знаний.

Среди тестов на соответствие, смысл которых заключался в установлении совпадения элементов одного множества элементам другого, использовались задания, в которых число подвопросов либо соответствовало числу ответов, либо было меньше числа ответов.

В ходе выполнения заданий на установление правильной последовательности требовалось представленное множество готовых элементов ответа

выстроить последовательно в правильной очередности. Тестовые задания последних двух типов, призванные раскрыть творческий уровень знаний, способствуют формированию у студентов логического мышления и проверяют степень сформированности осознанных знаний.

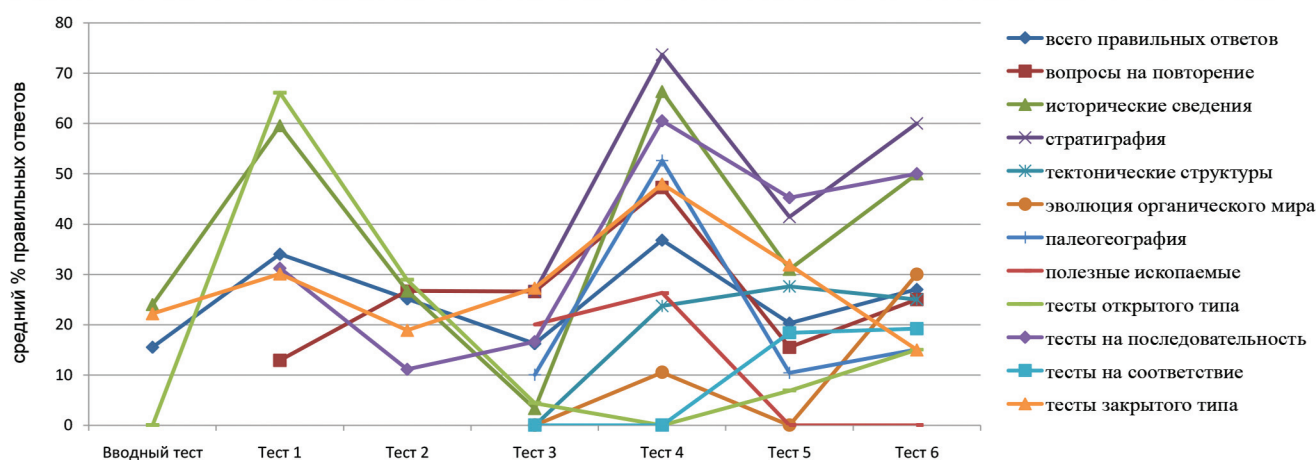
В реконструкциях исторической геологии неизбежна какая-то доля гипотетичности предлагаемых решений. Это детерминировано спецификой изучаемого материала, в котором очень многие детали обычно утрачиваются. Предложенные студентам задания не содержали элементов гипотетичности и не были перегружены несущественными деталями. Содержание вопроса и вариантов ответа было сформулировано кратко, чётко и не допускало различного толкования их смысла. Ни одно задание тестов не служило подсказкой для ответа на другие содержащиеся в нём вопросы. Кроме того, при составлении тестов строго учитывался уровень знаний, возможный в результате проведённых до этого лекционных занятий.

Вводный тест помимо вопросов закрытой формы содержал одно задание открытой формы и одно задание на установление правильной последовательности. В последующих тестах в различных соотношениях использовались задания всех видов. Варьирование видов заданий позволило активизировать различные способности тестируемых студентов. В задания наиболее простой для ответа закрытой формы обычно включался учебный материал общего характера, имеющий вспомогательное значение, но без которого полного понимания рассматриваемой темы достичь было затруднительно. Ключевые вопросы исторической геологии предъявлялись в заданиях более сложной формы. Для этой цели служили вопросы открытой формы, а также задания на соответствие и установление правильной последовательности. Тестовые задания, посвящённые отдельным крупным интервалам геологической истории Земли, включали материал по следующим основным разделам — исторические сведения, стратиграфическая шкала, тектонические структуры, палеогеографические особенности, органический мир, полезные ископаемые.

Вводный тест выполнил функцию предварительного контроля, который помог определить состояние исходного уровня знаний учащихся, выявить багаж их знаний, умений и навыков, а также оценить уровень мотивации учащихся. Одновременно был произведён и резидуальный контроль, позволивший оценить закрепившийся уровень остаточных знаний по общей стратиграфии, необходимой для изучения исторической геологии. Ре-

¹Гусликов В.М., Кошуг Д.Г., Федюшенко С.В. Оптимизация тестовых заданий закрытой формы, используемых в компьютерных системах контроля знаний // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 3. С. 59–61.

¹Guslikov V.M., Koshug D.G., Fedushenko S.V. Optimization of test tasks of the closed form, used in the computer systems of knowledge control. *Bulletin of Moscow University. Series 4. Geology*, 2009, no. 3, pp. 59–61 (In Russian).



Результаты тестового текущего контроля знаний по исторической геологии среди студентов МГРИ в весеннем семестре 2019 г.

Результаты вводного теста оказались самыми низкими по сравнению с итогами всех других проверок (рисунок). Этот результат логичен и может быть объяснён тем, что студенты не были предупреждены о данном тесте заранее. Лучшие показатели в вводном тесте были по принципам стратиграфии (38,8% правильных ответов) и по истории стратиграфии (16,6—27,7%), хотя этот результат ожидался выше, ведь с момента сдачи студентами экзамена по курсу общей стратиграфии прошло всего около одного месяца. Ответы по другим темам были хуже. Так, в ответах на вопрос «какие методы являются ведущими при установлении стратона докембрия» студентам было предложено два правильных ответа. Полностью неправильно ответило 55,5%, а остальные указали лишь один из двух правильных ответов. Из неправильно ответивших большинство (50%) посчитало, что ведущим методом при установлении стратона докембрия является биостратиграфический.

Тестовый опрос, посвящённый палеогеографии, показал значительное улучшение результатов по сравнению с вводным тестом. Лучшие показатели были достигнуты в ответах на вопрос о последовательности составления палеогеографических карт (80,6%) и по историческим сведениям — от 53,2 до 66,1% правильных ответов. Тест выявил слабые знания конкретных вопросов палеогеографической интерпретации фаций, хотя теории литогенеза, в том числе и учению о генетических типах континентальных отложений, на лекционных и лабораторных занятиях уделялось очень много внимания. В ответах на два вопроса студентам было предложено два правильных варианта. К сожалению, на вопрос «что из указанного не является индикатором мелководной морской обстановки» полностью не ответил никто, а на вопрос «какие организмы являются самыми хорошими индикаторами морской воды с нормальной солёностью» полностью ответило всего 3,2%. Лишь один из двух правильных ответов на эти вопросы указали

41,9—51,6% студентов. На вопрос задания открытой формы, касающийся определения фации правильно ответило 66,1%. Из ошибочно ответивших 3,2% вместо термина «фация» предложили термин «включение», остальные опрошенные вообще не предложили никакого варианта. Значительные трудности вызвал вопрос на повторение материала по стратиграфии. Правильные ответы на него дали лишь 12,9% студентов.

Тестовый опрос, посвящённый механизмам тектонических процессов и структурам земной коры, в целом продемонстрировал средние результаты. Лучшие показатели были достигнуты в ответах на вопросы, затрагивающие общие представления о строении тектоносферы (97,8%). Среди ответов на задания, посвящённые анализу разноранговых и разнотипных структурных элементов внутри древних платформ и складчатых областей, было от 6,7 до 33,3% правильных ответов. Тест выявил слабые знания геотектонических гипотез, объясняющих причины и механизмы эволюции земной коры материков, океанов и Земли в целом (0—26,7%), а также признаков, характеризующих различные тектонические режимы (11,1%). Так, 40% студентов (из неправильно ответивших) посчитало, что признаком геосинклинального тектонического комплекса являются крупные структурные формы с очень пологим залеганием слоёв.

Тестовый опрос, посвящённый докембрийскому этапу, показал невысокие результаты, сопоставимые с итогами вводного теста. Лучшие показатели достигнуты в ответах, касающихся стратиграфии докембрия и методов определения возраста докембрийских пород. Так, на вопрос о том, какой минерал докембрийских пород является лучшим геохронометром, устойчивым к экстремально высоким температуре и давлению, верно ответило 56,6% студентов. Правильно расположить стратона докембрия от древних к молодым (каратавий, бурзяний, архей, венд, юрматиний и карелий) смогли 16,6% опрошенных. Тест выявил слабые знания

полезных ископаемых докембрия (20% правильных ответов), а также палеогеографии этого интервала геологической истории (10,0%). Лишь 3,3% студентов продемонстрировали знания того, что название гадейского зона, характеризующего первые страницы геологической истории Земли в интервале 4,5—4,0 млрд. лет назад происходит от имени древнегреческого бога подземного мира Гадеса. Самые низкие результаты были получены при анализе геологических процессов, характер которых, после метеоритной бомбардировки около 4,0—3,9 млрд. лет назад, когда космический фактор перестал играть ведущую роль в формировании земной коры, стал определяться механизмами «самоорганизации» недр планеты, которые упорядочили строение и состав всех её оболочек. В ответах студентах остались не раскрытыми особенности и пространственно-временные соотношения основных корообразующих структур докембрия, отражающих поступательное развитие континентальной коры и смену геодинамических режимов формирования на ранних этапах геологической истории Земли. В ходе данного тестового опроса впервые было использовано задание, требующее установить соответствие между некоторыми событиями в эволюции организмов (возникновение эукариот среди фитопланктона, появление первых строматолитов и многоклеточных водорослей, эдиакарская биота и др.) и крупными этапами докембрийской истории (ранний архей, ранний протерозой, поздний протерозой). С этим заданием не смог справиться ни один студент.

Тестовый опрос, посвящённый палеозойской истории Земли, показал самые высокие результаты из всех полученных. Лучшие показатели достигнуты в ответах на вопросы, касающихся стратиграфии (73,7%), сведений об истории его изучения (66,4%) и существенных изменений ландшафтно-климатических условий (52,6%). К большому удивлению тест выявил слабые знания эволюции органического мира палеозоя.

В тестовом опросе, посвящённом мезозою, лучшие показатели достигнуты в ответах на вопросы, касающихся стратиграфии (41,4% правильных ответов), сведений об истории его изучения (31,0%) и направленности эволюции тектонических структур (27,6%). Значительные трудности вызвали вопросы, затрагивающие динамику эвстатических колебаний уровня Мирового океана в мезозое и таксономического состава морских беспозвоночных. Так, ни один из студентов в задании открытой формы не смог указать правильное название отряда аммоноидей, появившегося ещё в пермском периоде и вымершем в конце триасового периода. 46,1% из предложивших свои варианты посчитало, что это отряд Ammonitida.

В тестовом опросе, посвящённом кайнозойскому этапу развития Земли, лучшие показатели дос-

тигнуты в ответах на вопросы, касающихся стратиграфии (60,0% правильных ответов) и сведений об истории его изучения (50,0%). Было также продемонстрировано неплохое знание возраста проявления структуроформирующих фаз деформаций альпийского тектогенеза (40,0%). В тоже время тест выявил очень слабые знания полезных ископаемых кайнозоя, а также некоторых закономерностей развития тектоносферы. В частности, ни один из опрошенных не смог в задании открытого типа указать, что особенностью палеогенового периода является возникновение системы рифтов в Восточной Африке.

Как отчётливо показало проведённое тестирование, самые хорошие и стабильные знания были показаны студентами в области стратиграфического расчленения изучаемых интервалов геологической истории Земли (в среднем 50,4% правильных ответов, разброс правильных ответов от 6,6 до 73,7%) и различных исторических аспектов — последовательности выделения стратонов Международной стратиграфической шкалы и сведений о крупнейших учёных-геологах (в среднем 37,3% правильных ответов, разброс от 0 до 66,4%). Было выявлено недостаточно уверенное владение студентами материалами по тектоническим структурам (в среднем 25,4%, разброс от 0 до 97,8%) и палеогеографии (в среднем 22,0%, разброс от 0 до 80,6%). Самым сложным для студентов явился учебный материал, затрагивающий различные аспекты эволюции органического мира (в среднем 10,1% правильных ответов, разброс от 0% до 30,0%), а также сведения о полезных ископаемых (в среднем 11,5% правильных ответов, разброс от 0 до 26,3%). Что касается конкретных интервалов геологической истории Земли, то наибольшие трудности оказались связаны с докембрийским этапом (в среднем 10,0% правильных ответов) и меньшие — с мезозойской историей (в среднем 18,4% правильных ответов). Лучше всего студентами был усвоен материал по палеозою (в среднем 42,4% правильных ответов) и кайнозою (в среднем 30,0% правильных ответов).

Анализ полученных данных не выявил отчётливых закономерностей в изменении результатов усвоения студентами материала по отдельным темам, которое в целом носило колебательный характер, демонстрируя то подъёмы показателей, то спады разной амплитуды. Это, по всей видимости, свидетельствует о резко неравномерной самостоятельной работе студентов. Небольшая положительная динамика показателей успеваемости студентов отмечена только в изучении материала, касающегося тектонических структур, а также в работе с тестами на установление соответствия. В тоже время выявлено последовательное резкое ухудшение знаний, связанных с полезными ископаемыми.

Интересные данные для анализа дало использование вопросов на повторение. В ходе первых тестов оно показало в целом последовательное улучшение результатов (с 12,9 до 47,3% правильных ответов). В ходе предпоследнего опроса был выявлен резкий спад (15,5% правильных ответов), возможно связанный с накопившейся усталостью студентов, а затем вновь обнаружен незначительный рост показателей. Были выявлены и закономерности изменения результатов по отдельным темам. Так, в ответах на повторение материала по палеогеографии в ходе первых трёх опросов был зафиксирован отчётливый прогресс (рост от 26,7 до 84,2% правильных ответов), а затем резкий спад до 13,8 и далее до 10,0%. В тоже время ответы на повторение материала по тектоническим структурам в ходе трёх опросов показали последовательный рост от 0 до 10,5% и, наконец, до 40,0% правильных ответов. Таким образом, тестирование отчётливо продемонстрировало необходимость регулярной самостоятельной работы студентов над ранее изученным и быстро забываемым материалом. Следует отметить, что в тестах не использовались вопросы, предлагавшиеся студентам ранее. Каждый раз составлялись новые задания в рамках нужных для повторения тем.

Если сравнивать результаты ответов на тестовые задания разной формы, то можно отметить следующее. Наибольший разброс процента правильных ответов, который выявлялся практически каждым тестом, касался заданий открытой формы, отчётливо показавших, что их сложность прямо пропорциональна количеству терминов, которые необходимо вписать студентам. Так, в заданиях, где требовалось вписать только одно слово, процент правильных ответов варьировал от 0 до 97,8%. В заданиях, где требовалось указать два термина, показатель составил от 0 до 50%, а в заданиях с тремя пропущенными словами — от 0 до 20%. Похожими оказались результаты ответов на задания закрытой формы с одним правильным ответом (0—84,2%) и на установление нужной последовательности — от 0 до 80,6% правильных. Это, вероятно, с одной стороны, связано с тем, что подобные вопросы доминировали в численном отношении и включали материал разной сложности, а с другой — с неравномерной подготовкой студентов. Наибольшие затруднения, причём вне зависимости от содержания, вызвали задания на соответствие, требующие систематизированных знаний, к чему студенты часто оказались не готовы. На два из них не смог ответить ни один из испытуемых. Средний процент правильных ответов составил лишь 9,4%. Интересный материал для размышления дали закрытые тесты с двумя правильными ответами, оказавшиеся трудными для учащихся. Полностью на них смогло ответить лишь от 0 до 20% студентов. Из ответивших неправильно от 27,5 до

76,4% указали лишь один из двух правильных ответов.

Любопытные результаты получены в ходе использования двух заданий закрытой формы, все предложенные ответы к которым были неправильными. В ходе вводного тестового опроса, когда студенты, как уже указывалось, не были предупреждены о возможности наличия подобных заданий, ни один из них не отметил, что среди предложенных вариантов ответов на вопрос, «какой принцип позволяет восстановить историю геологического развития в конкретном районе», нет правильных. Самое же удивительное то, что, зная о возможности использования подобных заданий, при повторном его использовании в ходе пятого тестирования учащиеся показали похожий результат. Лишь один (!) из опрошенных студентов указал, что среди предложенных вариантов ответов на вопрос «какой период называют веком рыб» нет правильных. Использование в будущем подобных заданий, развивающих умение видеть ошибки в логике рассуждений и проводить различия между фактами и следствиями, на наш взгляд, будет способствовать более вдумчивому анализу учащимися исходных данных.

Отдельно хотелось бы отметить, что в процессе использования тестов был установлен примечательный факт, когда значительное число из неправильно ответивших студентов (от 11,1 до 33,3%) из предложенных вариантов отдавали предпочтение умышленно введённым нами фамилиям учёных и понятиям, не имевшим отношения к исторической геологии и о которых ничего не говорилось на занятиях. Например, 11,1% студентов на вводном тестировании в качестве принципа, использующегося для восстановления геологической истории Земли, выбрали «принцип катастроф». 13,3% студентов неправильно посчитало, что правило соотношения фаций было установлено Д. Раупом и С. Стэнли, и столько же, что древние морены называются перлювием. 33,3% из неправильно ответивших посчитало, что палеозойскую группу выделил М. Леконт, а 25%, что мезозой установил В. Лэнг.

В ходе опросов отдельное пристальное внимание было обращено на связь результатов тестирования и проводимых лабораторных занятий. Анализ, в том числе, показал парадоксальные результаты. В некоторых случаях было совершенно очевидно, что выполнение лабораторных заданий помогло студентам ответить на вопросы последующих тестовых заданий. Так, 80,6% опрошенных без труда указало правильную последовательность построения палеогеографических карт, а 66,1% точно ответило на вопрос задания открытой формы, касающийся определения фации. Перед этим в начале семестра студенты выполнили лабораторные работы по построению палеогеографической карты и

разреза. Тем не менее на ряд других вопросов, касающихся интерпретации фаций, получено всего от 0 до 21% правильных ответов. Трудно поддающиеся объяснению результаты были продемонстрированы в тестовом опросе по палеозою, который проходил после выполнения лабораторной работы по построению литолого-палеогеографических профилей через Предуральский краевой прогиб. Тем не менее ни один из опрошенных (!) не смог в задании открытой формы указать, какая крупная тектоническая структура сформировалась в пермском периоде на востоке Восточно-Европейской древней платформы. При этом 15,7% из них ответило, что данной структурой является «Северо-Американская платформа» (!). После выполнения лабораторной работы, посвящённой Гондванскому оледенению, 72,4% студентов правильно указало, что к началу триасового периода на Земле существовало два суперконтинента — Лавразия и Гондвана, а 52,6% безошибочно ответило на вопрос о том, когда Гондванское оледенение произошло. В тоже время лишь 13,8% студентов смогли ответить на вопросы, ранее детально прорабатывавшиеся на данном занятии и касающиеся особенностей седиментогенеза аридных, гумидных и нивальных зон. Очень противоречивые результаты были выявлены после лабораторного занятия, посвящённого построению тектонической карты мира. Лишь 20,0% студентов смогло указать, какие структуры помимо Южноамериканской, Антарктической, Африканской, Индостанской и Австралийской относятся к древним платформам южного ряда.

Для получения объективных данных об уровне знаний студентов нами активно использовались контрольные карты — один из важных современных методов анализа результатов тестирования и их статистической обработки. Контрольные карты, на которых показывался процент правильных ответов на тот или иной вопрос теста, позволили подвергнуть корректировке некоторые задания, которые в последующем использоваться не будут. Это затронуло вопросы, на которые ответило подавляющее большинство студентов. Так, 97,8% опрошенных правильно указало, что твёрдая оболочка Земли, образованная земной корой и верхней частью мантии называется литосферой, а 84,2% правильно указало, что основоположником учения о типах литогенеза является Н.М. Страхов. Такой результат, вероятно, говорит о том, что вопрос слишком простой и не показателен при проверке знаний. Контрольные карты выявили также задания,

которые оказались трудными для большинства студентов. В частности, ни один (!) студент не смог вспомнить, что гипотеза, выдвинутая в 30-е гг. XIX в. и исходившая из того, что Земля была первоначально расплавленной, а затем охлаждалась, покрываясь твёрдой корой, называется гипотезой контракции. Низкие результаты, по нашему мнению, не всегда можно объяснить реальной сложностью заданий. Они могут быть обусловлены слабым знанием материала, в том числе из-за пропуска соответствующих лекций и лабораторных занятий, а также с определёнными стереотипами мышления. Это, в частности, отчётливо выявили задания, представляющие своего рода «смысловые ловушки», провоцирующие студентов «идти по пути наименьшего сопротивления». Так на вопрос «к области какой складчатости относится Салаирский кряж», 66,6% из неправильно ответивших выбрало предложенный вариант «салаирской». В любом случае вопросам, вызвавшим максимальные затруднения, следует уделить больше внимания в ходе прочтения лекций и проведения лабораторных занятий в будущем. Дальнейшее использование бланковых тестов позволит сформировать банк заданий с устойчивыми статистическими данными, полученных на представительной выборке испытуемых. Появление данного банка сможет обеспечить предпосылки к созданию автоматизированных средств для проведения контрольных тестовых мероприятий, оценивающих уровень знаний с минимальной погрешностью и имеющих оптимальную структуру по соотношению «качество оценки — затраты на проведение тестирования». Автоматизированный тестовый контроль может оказаться полезным и для организации дистанционного обучения, которое представляется перспективной интегральной формой образования.

Выполненная работа подтвердила, что тестовая система контроля позволяет сделать более планомерным и результативным проведение занятий, организовать самоконтроль за ходом усвоения отдельных тем и корректировать лекционный материал для повышения эффективности обучения. Данные об итогах тестового контроля учебной работы следует всесторонне использовать для своевременной корректировки образовательных траекторий студентов на всех этапах обучения исторической геологии. Они будут необходимы для развития инициативы в овладении будущей профессии, креативных творческих способностей, умения планировать и прогнозировать результаты своих самостоятельных действий и решать нестандартные задачи.