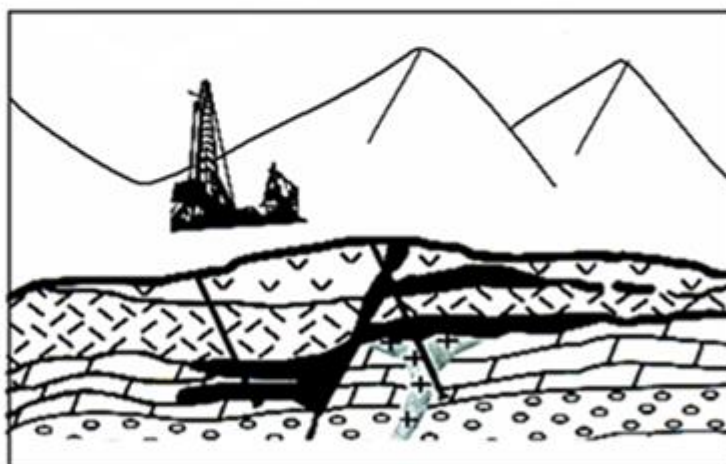


ISSN print 2541-9455
ISSN online 2541-9463



ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

**ГЕОЛОГИЯ,
РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**



2018

Том 41, № 3

Министерство образования и науки РФ
ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN print 2541-9455
ISSN online 2541-9463

ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Том 41, № 3

Издательство
Иркутского национального исследовательского
технического университета

2018

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

**IRKUTSK NATIONAL RESEARCH
TECHNICAL UNIVERSITY**

**ISSN print 2541-9455
ISSN online 2541-9463**

P R O C E E D I N G S
**OF THE SIBERIAN DEPARTMENT OF THE SECTION OF EARTH SCIENCES
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF NATURAL SCIENCES**

**GEOLOGY, EXPLORATION
AND DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS**

Vol. 41, No. 3

**Irkutsk National Research
Technical University
Publishers**

2018

УДК 550:553. Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2018. – Т. 41. – № 3. – 137 с.

Журнал «Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых» **входит в действующий Перечень изданий ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук**, включен в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU) для создания Российского индекса научного цитирования, рассылается в Российскую книжную палату, ВНИИТИ РАН, имеет государственную регистрацию и распространяется по подписке в каталоге агентства «Почта России», подписной индекс № 38200. С 2013 г. журнал включен в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, а с 2015 г. – в базу данных EBSCO. Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

В разделе журнала «Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых» публикуются статьи, посвященные физическому моделированию для изучения разрывообразования и дизъюнктивных структурных ловушек, изучению сезонных вариаций микросейсмических колебаний Байкальской сейсмической зоны, реконструкции полей тектонических напряжений в Прибайкалье, палеорекострукции условий нефтегазоносности юга Сибирской платформы.

Раздел «Технологии разведки и разработки месторождений полезных ископаемых» содержит статьи по технологии бурения, интерпретации данных геофизического исследования нефтяных и газовых скважин, по математическим методам обработки геофизической информации.

В разделе «Гипотезы, сообщения, дискуссия» обсуждается перспектива использования фрактального анализа при геометризации месторождений полезных ископаемых.

Статьи предназначены для научных сотрудников НИИ, преподавателей вузов, специалистов геологической отрасли и горного дела, а также могут быть полезны аспирантам, магистрантам и студентам.

Редакционная коллегия:

Главный редактор выпуска – В.И. Снетков, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Члены редколлегии:

Д.П. Гладкочуб, член-корр. РАН, д-р г.-м. наук, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия), И.В. Гордиенко, член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия), В.А. Душин, д-р г.-м. наук, проф., Уральский государственный горный университет (г. Екатеринбург, Россия), А.В. Козлов, д-р г.-м. наук, проф., Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (г. Санкт-Петербург, Россия), А.Т. Корольков, д-р г.-м. наук, проф., Иркутский государственный университет (г. Иркутск, Россия), В.А. Макаров, д-р г.-м. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия), Ю.Б. Миронов, д-р г.-м. наук, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург, Россия), Очир Гэрэл, д-р г.-м. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия), Б.Л. Тальгамер, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия), А.И. Трубачев, д-р г.-м. наук, проф., Забайкальский государственный университет (г. Чита, Россия)

Председатель редакционного совета – Ж.В. Семинский, д-р г.-м. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет, действительный член РАН (г. Иркутск, Россия)

Ответственный секретарь – В.А. Храмовских, к-т техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Журнал создан в 2004 году на основе межвузовского сборника «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых», который издавался с 1973 года

Периодичность выхода – 4 раза в год

Учредитель ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации журнала ПИ № ФС77-67479 от 18.10.2016 г.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом

Иркутского национального исследовательского технического университета

Адрес редакции, учредителя и издателя: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 2018

UDC 550:553. **Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.** – Irkutsk: INRTU Publishers, 2018. – Vol. 41. – No. 3. – 137 p.

The journal "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits" **is included in the current list of editions of the State Commission for Academic Degrees and Titles for the publication of the main results of dissertations for Candidate's and Doctoral degrees**, in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is sent to the Russian Book Chamber of All-Russia Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. It has a state registration and is distributed by subscription in the catalog of the "Russian Post" agency, the subscription index is no. 38200. From 2013, the journal is included in the international catalog of Ulrich's Periodicals Directory and from 2015 it is included in EBSCO database. The articles published in the journal are abstracted and peer reviewed. The journal accepts articles in the scientific field of "Earth Sciences".

The journal section *Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits* contains the articles on physical modeling aiming at the study of faulting and disjunctive structural traps, seasonal variations of microseismic vibrations of the Baikal seismic zone and reconstruction of tectonic stress fields in the Baikal region, as well as paleo-reconstruction of oil and gas content conditions of the south of the Siberian platform.

The section *Technologies of Exploration and Development of Mineral Deposits* presents the articles on drilling technology, interpretation of oil and gas well geophysical study data and mathematical methods of geophysical information processing.

The section *Hypotheses, Reports, Discussion* debates the application prospect of the fractal analysis in mineral deposit geometrization.

The articles are intended for research institute associates, university lecturers, specialists in the geological industry and mining. They also can be useful to postgraduate students, undergraduates and students.

Editorial Board:

Editor-in-Chief, Executive Editor – V.I. Snetkov, Doctor of technical sciences, Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Members of the editorial board:

D.P. Gladkochub, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Institute of the Earth's Crust SB RAS (Irkutsk, Russia), I.V. Gordienko, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Geological Institute of SB RAS (Ulan-Ude, Russia), V.A. Dushin, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Ural State Mining University (Ekaterinburg, Russia), A.V. Kozlov, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, National Mineral Resources University "Mining University" (St. Petersburg, Russia), A.T. Korolkov Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia), V.A. Makarov, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia), Yu.B. Mironov, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (St. Petersburg, Russia), Ochir Gerel, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Mongolian university of science and technology (Ulan Bator, Mongolia), B.L. Talgamer, Doctor of technical sciences, Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia), A.I. Trubachev, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Trans-Baikal State University (Chita, Russia)

Chairman of the Editorial Board – Zh.V. Seminsky, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor, Irkutsk National Research Technical University, Full Member of the Russian Academy of Natural Sciences (Irkutsk, Russia)

Executive secretary – V.A. Khramovskikh, Candidate of technical sciences, Associate Professor of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal was founded in 2004 on the basis of the interacademic Collection of research papers "Geology, prospecting and exploration of ore minerals", which had been published since 1973
Periodicity – 4 times a year

Founder – Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
"Irkutsk National Research Technical University"

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications,
Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor).

Journal Registration Certificate PI no. ΦC77-67479 of October 18, 2016

Recommended for publication by the Editorial Committee of the Irkutsk National Research Technical University

Editorial Office Address: Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
"Irkutsk National Research Technical University",
83 Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russia.

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
"Irkutsk National Research Technical University", 2018

ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Том 41, № 3 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

**Геология, поиски и разведка
месторождений полезных ископаемых**

- Черемных А.В.** Структурообразующая роль знакопеременных движений в разломных зонах при сдвиге, транспрессии и транстенсии применительно к условиям локализации алмазоносных кимберлитов (результаты физического моделирования)..... 9
- Добрынина А.А., Саньков А.В., Шагун А.Н.** Сезонные вариации амплитудно-частотных характеристик микросейсмических колебаний по данным сейсмических станций байкальской сети..... 22
- Бурзунова Ю.П.** Применение различных методов анализа трещиноватости для реконструкции полей тектонических напряжений (на примере интрузивного массива Тажеран в Прибайкалье)..... 35
- Рапацкая Л.А.** Геологические и историко-генетические аспекты нефтегазонасыщенности юга Сибирской платформы..... 50

**Технологии разведки и разработки
месторождений полезных ископаемых**

- Заливин В.Г.** Оборудование, обеспечивающее цикл бурения скважин пеленой на основе «Композита СП»..... 62
- Кокарев П.Н., Диких И.А., Сердюкова В.А.** Особенности строения пород-коллекторов парфёновского горизонта Ковыктинской зоны газонакопления по материалам геофизического исследования скважин и результатам испытаний скважин..... 78
- Канайкин В.С., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б.** Особенности трансформации и инверсии гравитационного поля с применением дисперсионного и регрессионного анализов..... 93

Гипотезы, сообщения, дискуссия

Снетков В.И. Фрактальный анализ – необходимый элемент геометризации месторождений полезных ископаемых.....	106
---	-----

Память о них сохраним

Русинек О.Т., Сковитина Т.М., Дорофеева Р.П., Кочнев А.П. Памяти Геннадия Феодосьевича Уфимцева (1940–2013)	119
К сведению авторов	131

PROCEEDINGS
OF THE SIBERIAN DEPARTMENT OF THE SECTION OF EARTH SCIENCES
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF NATURAL SCIENCES

GEOLOGY, EXPLORATION AND DEVELOPMENT
OF MINERAL DEPOSITS

Vol. 41, No. 3 2018

CONTENTS

Pp.

**Geology, Prospecting and Exploration
of Mineral Deposits**

Cheremnykh A.V. Structure-forming role of alternating movements in the zones of shear, transpression and transtension as applied to localization conditions of diamondiferous kimberlites (physical modeling results).....	9
Dobrynina A.A., Sankov A.V., Shagun A.N. Seasonal variations of amplitude-frequency patterns of local ambient noises by Baikal network seismic station data....	22
Burzunova Yu.P. Use of different fracture analysis methods for tectonic stress fields reconstruction (on example of the Tazheran intrusive massif in Pribaikalie).....	35
Rapatskaya L.A. Geological and historico-genetical aspects of South Siberian platform oil and gas potential.....	50

**Technologies of Exploration and Development
of Mineral Deposits**

Zalivin V.G. Equipment for well foam drilling based on "Composite SP"	62
Kokarev P.N., Dikikh I.A., Serdyukova V.A. Structural features of Parfenovsky horizon reservoir formations of the Kovykta gas condensate field by well logging data and well testing results.....	78
Kanaikin V.S., Turutanov E.Kh., Buyantogtokh B. Features of gravity field transformation and inversion using variance and regression analyses.....	93

Hypotheses, Reports, Discussion

Snetkov V.I. Fractal analysis as a key element of mineral deposit geometrization.....	106
--	-----

They will Never be Forgotten

Rusinek O.T., Skovitina T.M., Dorofeeva R.P., Kochnev A.P. To the memory of Gennady Feodosievich Ufimtsev (1940–2013).....	119
---	-----

Attention of authors	131
-----------------------------------	-----

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.24

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-9-21>

СТРУКТУРООБРАЗУЮЩАЯ РОЛЬ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ В РАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ ПРИ СДВИГЕ, ТРАНСПРЕССИИ И ТРАНСТЕНСИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ ЛОКАЛИЗАЦИИ АЛМАЗОНОСНЫХ КИМБЕРЛИТОВ (РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

© А.В. Черемных^а

^аИнститут земной коры СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

РЕЗЮМЕ. Цель. Изучить динамику разрывообразования и типы дизъюнктивных структурных ловушек для рудных растворов при знакопеременных движениях в разломных зонах при сдвиге, транспрессии и транстенсии. **Методы.** Моделирование выполнено в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН. Эксперименты проведены на установке «Разлом», которая позволила задавать не только направление, но и скорость перемещения штампов, на двух скоростях: 10^{-4} и 10^{-5} м/с. Исследования выполнены на базе экспериментов физического моделирования с использованием эквивалентного материала – водной суспензии монтмориллонитовой глины с вязкостью 10^6 – 10^7 Па·с. Каждый опыт проводился в два этапа. На первом этапе эксперимента воспроизводились обстановки, соответствующие сдвигу, сдвигу с растяжением (транстенсия) или сдвигу со сжатием (транспрессия). На втором этапе опыта моделировалось структурообразование при противоположном перемещении штампов экспериментальной установки, то есть при сдвиге с обратным знаком, транспрессии или транстенсии. **Результаты.** В серии из 8 опытов изучены парагенезы разрывов с акцентом на структуры растяжения, которые могут быть благоприятными для локализации кимберлитовых тел. Закономерности формирования дизъюнктивов рассмотрены с позиции образования в моделях известных разрывов парагенеза сдвиговой зоны. Структуры растяжения, благоприятные для рудоотложения, более характерны для опытов, проведенных на медленной скорости. Другим фактором, влияющим на формирование внутренней структуры разломных зон, является вектор относительного перемещения штампов, от которого зависят динамические обстановки первого и второго этапов. Рассмотрены комбинации обстановок правого и левого сдвигов, транстенсии – транспрессии, и транспрессии – транстенсии. **Выводы.** Установлено, что скорость деформирования существенно влияет на специфику структурообразования. При знакопеременных движениях в зонах разломов от нее зависят не только ширина зоны и расстояние между системами разрывов, но и специфика набора элементов структурного парагенеза. Наиболее амплитудные структуры растяжения разных типов формируются вблизи основных швов дизъюнктивов, для области которых характерна наибольшая величина дилатансии. Особенно отчетливо дилатансия проявлена в разломных зонах, которые на первом этапе формируются в обстановке транспрессии, а на втором – транстенсии. В таких зонах наблюдается наибольшие размеры дизъюнктивных структурных ловушек, связанных с разрывами разных типов – ϵ , R и Y .

Ключевые слова: моделирование, эквивалентный материал, разломообразование, знакопеременные движения, транспрессия, транстенсия, зоны сдвига.

Информация о статье. Дата поступления 7 июня 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Черемных А.В. Структурообразующая роль знакопеременных движений в разломных зонах при сдвиге, транспрессии и транстенсии применительно к условиям локализации алмазонасных кимберлитов (результаты физического моделирования) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 9–21. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-9-21

^аЧеремных Александр Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории тектонофизики, e-mail: cherem@crust.irk.ru
Alexander V. Cheremnykh, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Senior Researcher of the Tectonophysics Laboratory, e-mail: cherem@crust.irk.ru

STRUCTURE-FORMING ROLE OF ALTERNATING MOVEMENTS IN THE ZONES OF SHEAR, TRANSPRESSION AND TRANSTENSION AS APPLIED TO LOCALIZATION CONDITIONS OF DIAMONDIFEROUS KIMBERLITES (PHYSICAL MODELING RESULTS)

© A.V. Cheremnykh^a

^aInstitute of the Earth's Crust, SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

ABSTRACT. Purpose. The work is aimed at studying the faulting dynamics and the types of disjunctive structural traps for ore solutions under alternating movements in the zones of shear, transpression and transtension. **Methods.** Physical modeling was performed in the Laboratory of Tectonophysics, Institute of the Earth's Crust SB RAS on the Fault Installation, which allowed to set up both the direction and two speeds of stamp (plate) movement (10^{-4} and 10^{-5} m/s). The studies were carried out on the basis of the experiments of physical modeling with the use of an equivalent material in the form of an aqueous suspension of montmorillonite clay (viscosity of 10^6 – 10^7 PA·s). Each experiment included two stages. Stage I reproduced the conditions that correspond to shear, shear with tension (transtension) or shear with compression (transpression). Stage II included the simulation of structure forming under reverse movement of experimental installation stamps, i.e. under alternating shear of transtension or transpression. **Results.** The parageneses of fractures with the emphasis on extensional structures that can be favorable for kimberlite body location have been studied in the series of 8 experiments. The formation patterns of disjunctives are examined in terms of shear zone paragenesis formation in the models of known discontinuities. The extensional structures favorable for ore deposition are more characteristic of the experiments performed at slow speed. Another factor affecting the formation of the internal structure of fault zones is the vector of relative movement of stamps (plates), on which the dynamic conditions of the first and second stages depend. Consideration is also given to the combinations of right- and left-lateral shearing, transtension-transpression, and transpression-transtension. **Conclusion.** The physical modeling experiments have shown that the deformation rate has a significant influence on structure formation. In case of alternating movements in fault zones the deformation rate is the factor that affects the width of the fault zone and the distance between the fault systems as well as the specific set of elements in structural paragenesis. Extensional structure of the different types characterized by the highest tension amplitudes occur near the major joints of disjunction, where the dilatancy is the highest. The dilatancy is manifested most clearly in the fault zones which are formed in transpression conditions at the stage I and under transtension conditions at the stage II. The largest disjunctive structural traps associated with e-, R- and Y-fractures are observed in such fault zones.

Keywords: modeling, equivalent material, faulting, alternating movements, transpression, transtension, shear zones

Article info. Received 7 June 2018; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Cheremnykh A.V. Structure-forming role of alternating movements in the zones of shear, transpression and transtension as applied to localization conditions of diamondiferous kimberlites (physical modeling results). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 9–21. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-9-21 (In Russian).

Введение

Условия формирования дизъюнктивных нарушений определяют особенности их внутренней разрывной структуры – структурные парагенезы разломных зон, с которыми часто связаны рудные поля и месторождения [1–3 и др.]. Последние локализуются в пределах разнообразных структурных элементов зон,

а сами разломные зоны находятся на разных стадиях развития [3]. Особый интерес представляет специфика формирования разломных зон в чехле Сибирской платформы в результате знакопеременных горизонтальных смещений блоков фундамента. Весьма вероятно, что именно в результате таких движений сформировались разломы Вилуйско-

Мархинского дизъюнктивной зоны, контролирующие пространственное распространение алмазонасных кимберлитов [4–6].

Цель работы – на основе физического моделирования изучить динамику структурообразования в зонах разломов, формирующихся при знакопеременных движениях в условиях сдвига, транспрессии и транстенсии с акцентом на разрывные парагенезы, потенциально благоприятные для локализации кимберлитовых тел.

Методика проведения экспериментов и модельный материал

Формирование разрывов в чехле платформ при смещении блоков фундамента часто изучается с помощью экспериментов на эквивалентных материалах [4–13 и др.]. Моделирование проведено в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН на установке «Разлом», позволяющей изменять

направление и скорость перемещения штампов. Дополнительно было изготовлено приспособление «Фундамент» в виде двух штампов, закрепляющихся на основной установке «Разлом». Имитирующие блоки фундамента штампы представляли собой две рифленые пластины, которые могли перемещаться по типу как сдвига, так и сдвига со сжатием – транспрессии, а также сдвига с растяжением – транстенсии (рис. 1). В процессе моделирования производилась смена направления перемещения штампов на противоположное – изменение знака движения. Подобные эксперименты со знакопеременными смещениями штампов экспериментальной установки при формировании сдвиговых зон ранее уже проводились в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН [4–6, 11]. Выполненные нами эксперименты были дополнены условиями транспрессии и транстенсии на разных этапах эволюции разломных зон.

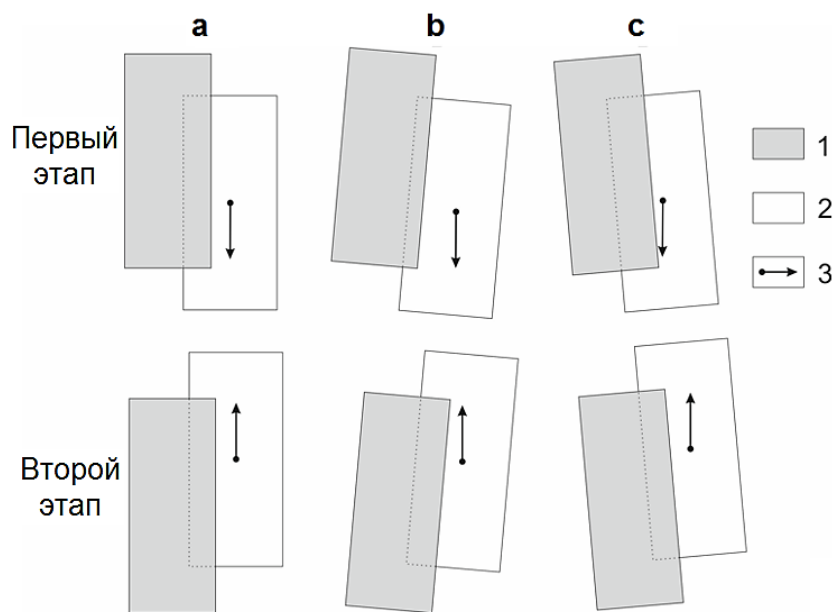


Рис. 1. Схемы перемещения штампов экспериментальной установки:

a – правый сдвиг (первый этап) – левый сдвиг (второй этап); b – транстенсия (первый этап) – транспрессия (второй этап); c – транспрессия (первый этап) – транстенсия (второй этап)
1 – неподвижная пластина; 2 – подвижная пластина; 3 – вектор перемещения штампа (пластины)

Fig. 1. Diagrams of stamp displacement in the experimental installation:

a – right-lateral shear (stage I) – left-lateral shear (stage II); b – transtension (stage I) – transpression (stage II); c – transpression (stage I) – transtension (stage II)
1 – fixed stamp (plate); 2 – movable stamp (plate); 3 – vector of stamp (plate) displacement

В качестве эквивалентного материала использовались водные суспензии монтмориллонитовой глины с вязкостью 10^6 – 10^7 Па·с, удовлетворяющие теории подобия. Каждый эксперимент выполнялся согласно приведенной ниже последовательности операций. Модельный материал тщательно перемешивался и после контроля вязкости равномерным слоем размещался на пластинах приспособления «Фундамент». Поверхность модели выравнивалась, после чего производилось перемещение одного из штампов экспериментальной установки с одной из двух скоростей: 10^{-4} или 10^{-5} м/с. На первом этапе штамп смещался на 35–85 мм. На втором этапе направление перемещения штампа менялось на противоположное и эксперимент про-

должался до формирования магистрального шва. В ходе эксперимента модель фотографировалась через определенные промежутки времени, что позволило изучить основные особенности динамики разрывообразования в зоне формирующегося разлома.

Результаты моделирования

Закономерности формирования внутренней структуры разломных зон рассмотрим с позиции образования известных разрывов структурного парагенеза зоны простого сдвига, который состоит из следующих основных элементов [12, 14–16 и др.]: разрывы (сколы) Риделя R и R' , разрывы растяжения e , сегменты магистрального сместителя Y , а также сдвиги P (рис. 2).

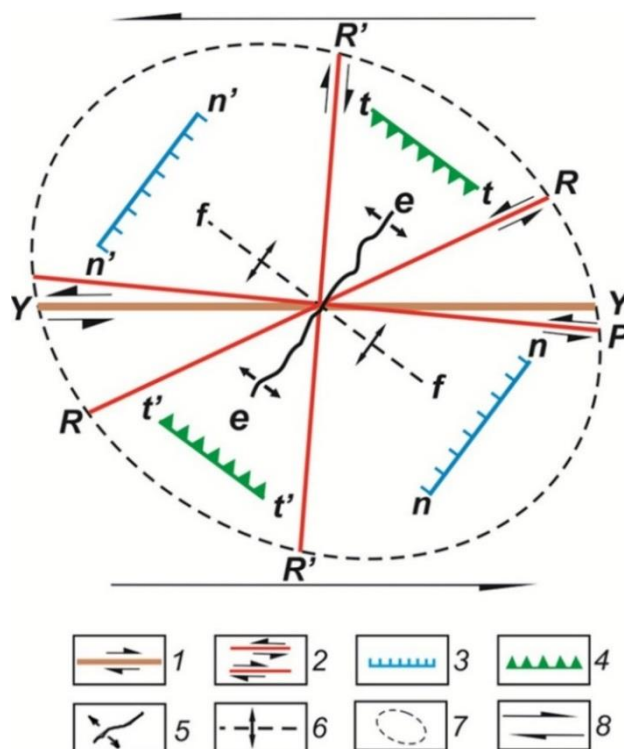


Рис. 2. Структурный парагенез разрывов и складок в зоне левого сдвига [14]:

- 1 – сдвиг (Y) магистрального сместителя; 2 – сопряженные (R, R') и одиночные (P) системы сдвигов;
3 – сопряженные системы сбросов (n, n'); 4 – сопряженные системы взбросов или надвигов (t, t');
5 – разрывы растяжения (e); 6 – складки (f); 7 – эллипс, в который преобразуется окружность в ходе деформации; 8 – направление перемещения субстрата на периферии зоны сдвига

Fig. 2. Structural paragenesis of fractures and folds in the left-lateral shear zone [14]:

- 1 – shear (Y) of the main fault plane; 2 – conjugated (R, R') and single (P) systems of strike-slip faults;
3 – conjugated systems of normal faults (n, n'); 4 – conjugated systems of reverse or thrust faults (t, t');
5 – tension discontinuities (e); 6 – folds (f); 7 – ellipse resulting from circle transformation under deformation; 8 – direction of material movement at the shear zone periphery

Общие закономерности разрывообразования в моделях в зависимости от скорости деформирования. Наши эксперименты подтвердили вывод о том, что основными структурами, формируемыми на первом этапе в зоне сдвига, являются R - и R' -сколы. При этом R' -сколы лучше проявлены при повышенной скорости перемещения штампов экспериментальной установки, однако, как отмечали многие исследователи, из-за ориентировки, субперпендикулярной направлению сдвига основной зоны, они быстро прекращают свое развитие. Первый этап, как правило, проводился до образования сколов R -типа протяженностью, в 2–2,5 раза превышающей толщину модели. Главное ограничительное условие для этого этапа – отсутствие в формирующейся зоне разлома магистрального шва, так как в случае его образования деформации второго этапа эксперимента локализуются только в его пределах. При отсутствии магистрального шва на втором этапе новообразование разрывов происходит в пределах всей ширины зоны влияния дизъюнктива.

На втором этапе в зависимости от скорости деформирования модели вначале формируются либо разрывы растяжения e -типа, либо R -сколы соответствующего направления. Возникновение на втором этапе структур растяжения ранее сколов R характерно для экспериментов с медленной скоростью перемещения штампов экспериментальной установки.

В целом скорость деформирования модели оказывает существенное влияние на специфику разрывообразования. Так, уже на первом этапе наблюдаются отличия внутренней структуры формирующихся разломных зон при разных скоростях деформирования моделей. При скорости смещения штампов 10^{-4} м/с шаг между образующимися разрывами в пределах моделируемого разло-

ма меньше (рис. 3), а при скорости 10^{-5} м/с – больше (рис. 4). Другое существенное отличие структурообразования при различных скоростях наблюдается на втором этапе опытов и заключается в отсутствии структур растяжения e -типа при относительно быстрой (10^{-4} м/с) скорости перемещения штампов экспериментальной установки.

Структуры, благоприятные для локализации кимберлитовых тел. Выше отмечено, что цель исследования заключалась в изучении динамики структурообразования в зонах разломов, формирующихся в условиях сдвига, транспрессии и транстенсии с акцентом на разрывные парагенезисы, потенциально благоприятные для локализации кимберлитовых тел. Далее рассмотрим использованные при моделировании три варианта комбинации динамических обстановок разрывообразования.

Первый вариант – комбинация простых сдвигов: правостороннего на первом этапе и левостороннего на втором (рис. 1, а). При медленной скорости смещения штампов экспериментальной установки структуры растяжения, наиболее благоприятные для локализации магматических пород, образуются в отдельных участках сдвиговой зоны. Чаще всего они приурочены к изгибам сколов второго этапа R_2 , сегментам магистрального шва Y (см. рис. 4, а), реже связаны с отрывами e -типа, сколами R'_2 , узлами сочленения R_2 и R'_2 и в последнем случае слабо выражены, то есть имеют минимальное раскрытие. При скорости 10^{-4} м/с структуры растяжения модельного материала формируются только в сегментах сколов R_2 и на отдельных участках магистрального сместителя (см. рис. 3, а).

Второй вариант формирования структуры разломной зоны связан с действием транстенсии на первом этапе и транспрессии на втором (рис. 1, б). В ходе эволюции разрывообразования

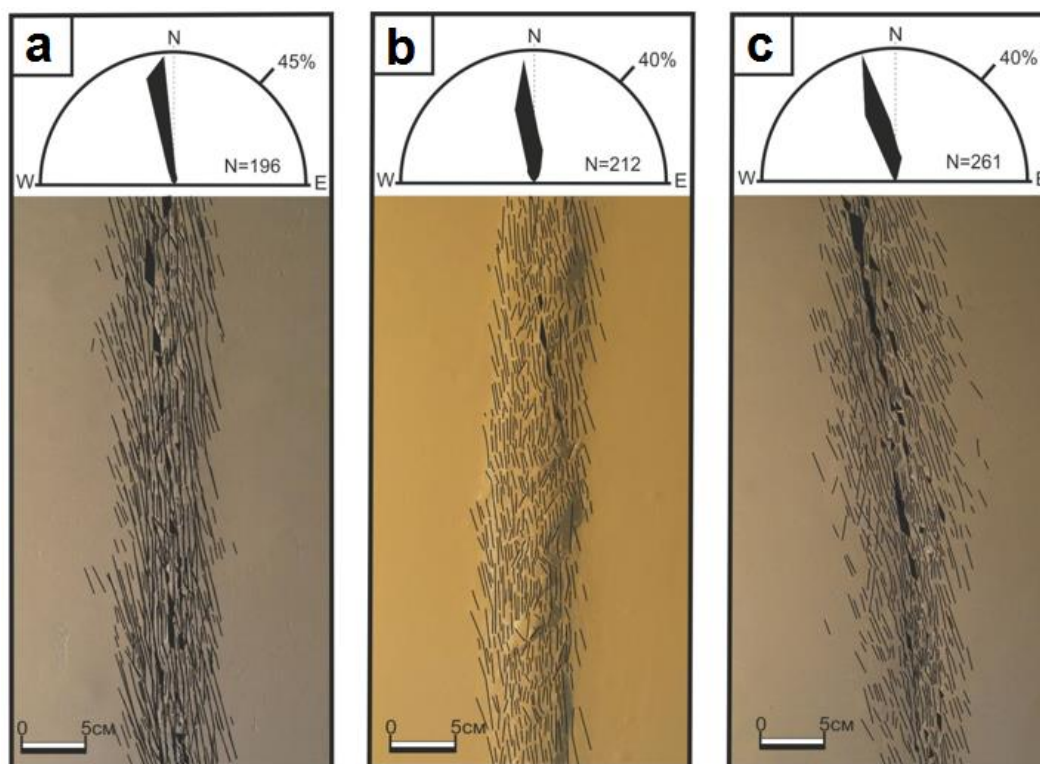


Рис. 3. Итоговая сеть разрывов в моделях разломных зон с различными последовательными комбинациями динамических обстановок разломообразования при знакопеременных перемещениях блоков «Фундамента» на скорости 10^{-4} м/с:

a, b, c соответствуют схемам на рис. 1

На розах-диаграммах максимумы соответствуют R_2 -сколам парагенеза сдвиговой зоны
Fig. 3. Resulting network of fractures in the models of fault zones featuring different successive combinations of faulting dynamic conditions under alternating displacements of the "Foundation" blocks at a speed of 10^{-4} m/s:

a, b, c – correspond to the diagrams in Fig. 1

The rose diagrams show the maximums corresponding to R_2 fractures in the shear zone of paragenesis

в зоне разлома наблюдаются следующие варианты формирования структур растяжения. При медленной скорости правостороннего смещения штампа (10^{-5} м/с) на первом этапе местами наблюдаются некоторое раскрытие разрывов R_1 . Однако из-за незначительной величины деформации этого этапа благоприятных для внедрения магм структур в приповерхностной части чехла не наблюдается. В рамках второго этапа в условиях транспрессии берега сколов R_1 смыкаются, а структуры локального растяжения формируются вблизи магистрального шва и у некоторых изгибов поверхностей сколов R_2 . Отличительной особенностью этого варианта смены динамиче-

ских обстановок является отсутствие других структур растяжения (см. рис. 4, b). При скорости 10^{-4} м/с структуры растяжения весьма редкие и приурочены к центральной части разломной зоны (см. рис. 3, b). На розах-диаграммах, построенных как для итоговой сети разрывов в моделях, деформированных на скорости 10^{-4} м/с, так и для сети дизъюнктивных дислокаций, сформировавшихся в моделях, подвижный штамп которых перемещался со скоростью 10^{-5} м/с, выделяется единственный максимум, образованный сколами R_2 - и Y-типов (см. рис. 3, b; 4, b).

Третий вариант – транспрессия на первом этапе и транстенсия на втором –

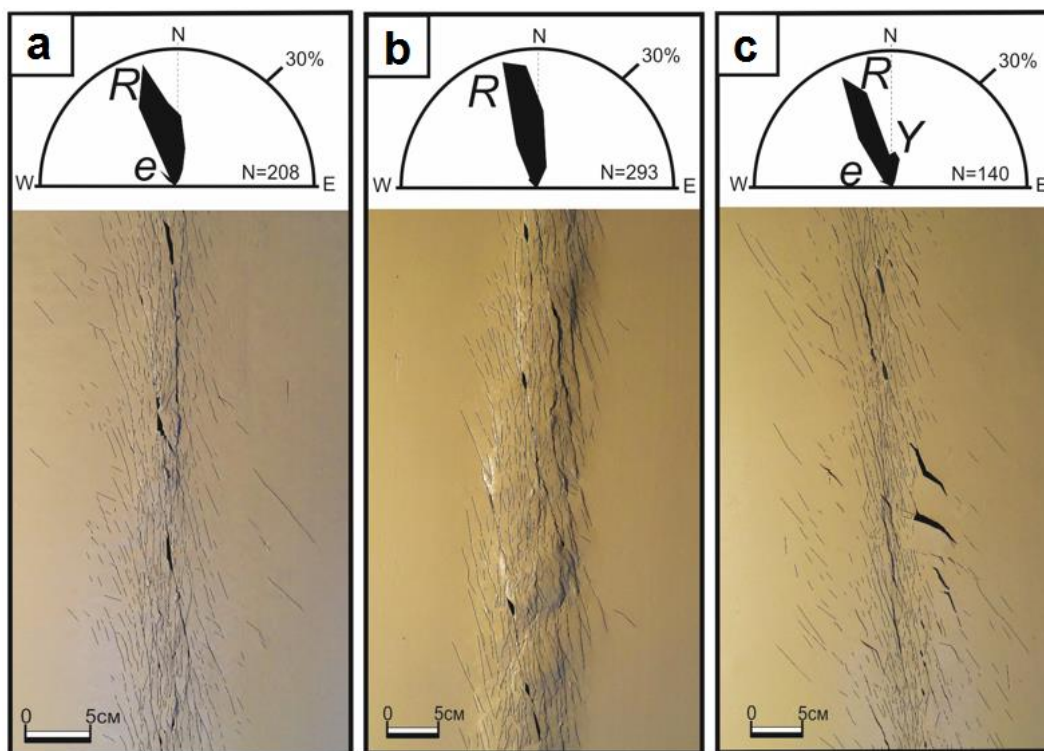


Рис. 4. Итоговая сеть разрывов в моделях разломных зон с различными последовательными комбинациями динамических обстановок разломообразования при знакопеременных перемещениях блоков «Фундамента» на скорости 10^{-5} м/с:

a, b, c соответствуют схемам на рис. 1

На розах-диаграммах обозначены максимумы, соответствующие разрывам парагенеза сдвиговой зоны – e, R и Y

Fig. 4. Resulting network of fractures in the models of fault zones featuring different successive combinations of faulting dynamic conditions under alternating displacements of the "Foundation" blocks at a speed of 10^{-5} m/s:

a, b, c correspond to the diagrams in Fig. 1

The rose diagrams show the maximums corresponding to e, R and Y fractures in the shear zone of paragenesis

отличается широким развитием структур растяжения e-типа при реверсном смещении штампа и медленной скорости деформирования (см. рис. 4, c). Эти структуры широко развиты на периферии разломной зоны, за пределами области формирования сколов. Иногда разрывы e-типа образуются на достаточном удалении от зоны, в глубине слабонарушенных блоков. Однако далее по ходу второго этапа деформация сосредотачивается в более узкой области, в результате чего наибольшее раскрытие фиксируется у отрывов, примыкающих к зоне развития сколовых дислокаций (см. рис. 4, c). В дальнейшем формируются ловушки, связанные со сколь-

жением по магистральному шву. При относительно быстром перемещении штампов установки в моделях наблюдается «перерождение» в структуры растяжения некоторых сколов R_2 , особенно в центральной части разломной зоны (см. рис. 3, c).

Обсуждение

полученных результатов

Эксперименты показали, что потенциально благоприятные структуры для локализации кимберлитовых тел формируются главным образом в пределах определенных разрывных парагенезов разломных зон. Исключение составляют разрывы e-типа, образующиеся на втором этапе развития зон в усло-

виях знакопеременных смещений блоков фундамента, когда динамическая обстановка транспрессии меняется на трансензию. При этом структуры растяжения образуются на периферии зоны сформировавшихся ранее сколов, а иногда даже на значительном удалении от нее в сторону слабонарушенных блоков. Однако в ходе дальнейшей эволюции дизъюнктива основные деформации локализуются во все более узкой зоне. В результате наибольшее раскрытие разрывов е-типа фиксируется вблизи зоны формирования сколов и внутри последней. Кроме того, структуры растяжения в зонах наблюдаются вблизи магистральных сместителей Y и разрывов R_2 .

Важным результатом исследования, по нашему мнению, является образование структур растяжения е-типа на втором левосдвиговом этапе формирования разрывной структуры в чехле платформы над активными разломами ее фундамента. Эта особенность, установленная ранее при моделировании разрывов Накынского кимберлитового поля [6], вероятно, обусловлена протеканием деформации второго этапа экспериментов в структурированной среде, нарушенной разрывами первого этапа [11]. Ранее зарождение трещин отрыва с последующим их объединением в сколы рассмотрено в экспериментальной работе [17]. Образование трещин отрыва, предшествующее сколам, авторы связывают с дилатансией деформируемого слоя за счет сверхвысокого флюидного давления. Последняя реализуется в виде увеличения размера тела вдоль оси максимального растяжения при сохранении его первоначального размера вдоль оси сжатия [17].

Непременным фактором образования структур е-типа на втором этапе моделирования является медленная скорость деформирования модельного материала. Кроме того, в наших экспериментах образование отрывов часто

наблюдалось за пределами разломных зон, в блоках, однако в тех их частях, которые непосредственно примыкали к разломным зонам. Нами предлагается следующее объяснение этого явления.

Известно, что формирование зоны сдвига начинается с зарождения широкой области распространения R - и R' -сколов. Наибольшая ширина зоны проходит по дистальным окончаниям R' -сколов, ориентировка которых близка к ортогональной по отношению к простиранию самой сдвиговой зоны. Выше отмечено, что из-за ортогональности этих разрывов дальнейшие деформации сосредоточены в более узкой полосе развития R -сколов. Таким образом, на первом этапе эксперимента формируется зона с наиболее раздробленной центральной частью, а на периферии наблюдаются все менее отчетливые остаточные деформации модельного материала и постепенный переход к недеформированным блокам.

На втором этапе, после изменения направления смещения штампов на противоположное, перемещения крыльев сдвиговой зоны вначале реализуются за счет подвижек по существующим разрывам, главным образом по R -сколам наиболее раздробленной части зоны. С некоторого момента времени берега этих сколов в результате ориентировки последних оказываются сомкнутыми и трение на плоскостях разрывов препятствует дальнейшему перемещению. В активизацию вовлекаются R' -сколы на периферии сдвиговой зоны, а так как они субперпендикулярны направлению смещения крыльев, то и смещения по ним минимальные. Однако общее перемещение крыльев сдвиговой зоны создает напряжения на границах последней. В результате краевая часть блоков испытывает дилатансию, а концентраторами растягивающих напряжений являются дистальные окончания R' -сколов первого этапа. В процессе дальнейшего разви-

тия разломной зоны деформация сосредотачивается во все более узкой полосе ближе к магистральному сместителю. Соответственно, и более амплитудные структуры растяжения разных типов формируются вблизи основных швов дизъюнктивов, для которых характерна наибольшая величина дилатансии. Последняя весьма характерна для зон, ко-

торые на первом этапе формируются в обстановке транспрессии, а на втором – транстенсии.

Примером одной из рассмотренных динамических обстановок является Мирнинское кимберлитовое поле, где к субмеридиональным глубинным разломам тяготеют известные алмазоносные трубки (рис. 5). При этом кимберлитовые

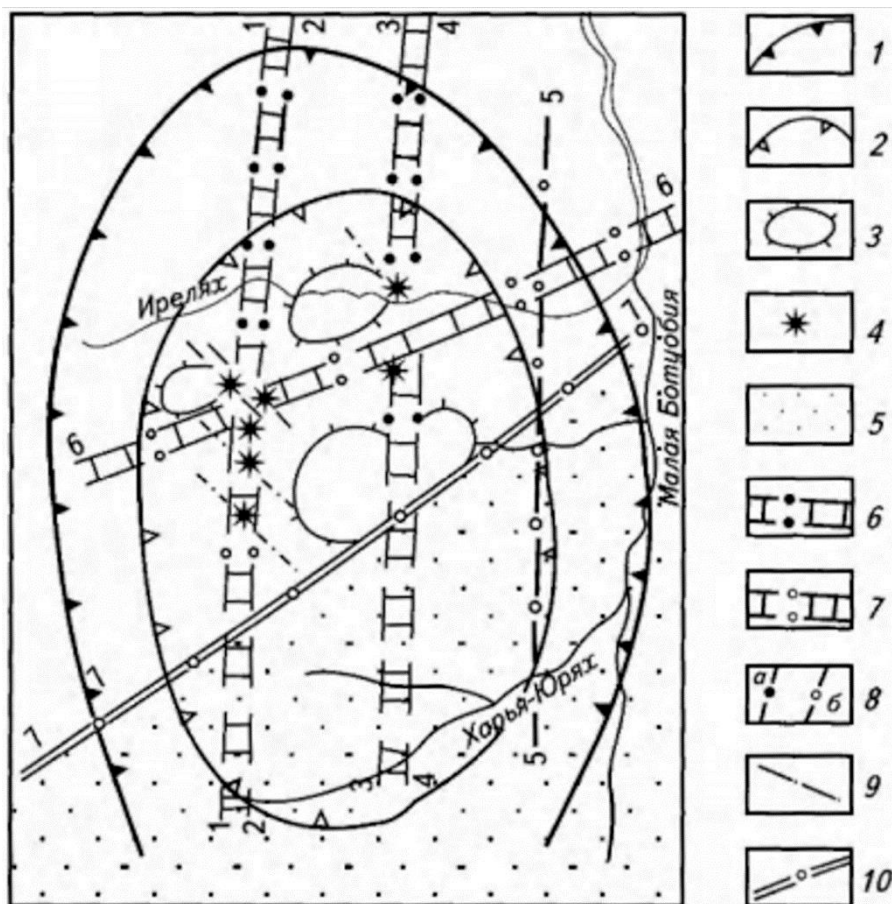


Рис. 5. Структура Мирнинского кимберлитового поля [18]:

1 – контур геофизической аномалии центрального типа; 2 – граница Амакинского купольного поднятия; 3 – контуры куполов второго порядка; 4 – кимберлитовые трубки; 5 – часть структуры поля, перекрытая мезозойскими отложениями Ангаро-Вилуйского прогиба; 6 – кальдеры проседания кимберлитового вулканизма; 7 – кальдеры базальтового вулканизма; 8 – глубинные разломы, контролирующие: а – кимберлитовый и базальтовый магматизм (1-1 – Кюэляхский, 2-2 – Западный, 3-3 – Параллельный, 4-4 – Центральный), б – только базальтовый магматизм (5-5 – Восточный, 6-6 – Аппаинский); 9 – кимберлитовмещающие разломы; 10 – Ангаро-Вилуйский разлом (7-7), ограничивающий мезозойский прогиб

Fig. 5. Structure of the Mirny kimberlite field [18]:

1 – contour of the geophysical anomaly of the central type; 2 – boundary of the Amakin dome uplift; 3 – contours of the second-order domes; 4 – kimberlite pipes; 5 – part of the field structure overlapped by Mesozoic sediments of the Angara-Vilui depression; 6 – calderas of kimberlite volcanism subsidence; 7 – calderas of basaltic volcanism; 8 – deep faults that control: (a) - kimberlite and basaltic magmatism (1-1 – Kuelyakh, 2-2 – Western, 3-3 Parallel, 4-4 – Central), (b) – only basaltic magmatism (5-5 – Eastern, 6-6 – Appain); 9 – kimberlite-bearing faults; 10 – Angara-Vilui fault (7-7) that borders the Mesozoic depression

вмещающие разрывы имеют северо-западное простирание, подобное простиранию разрывов растяжения (е-тип), полученному в экспериментах при знакопеременных медленных смещениях крыльев сдвиговых зон (см. рис. 4, а).

Заключение

Установлено, что скорость деформирования существенно влияет на специфику структурообразования. При знакопеременных движениях в зонах разломов от нее зависят не только ширина зоны и расстояние между системами разрывов, но и специфика набора элементов структурного парагенеза. Так, структуры растяжения е-типа образуются только при медленной скорости перемещения штампов экспериментальной установки. Они формируются в разломных зонах при знакопеременных смещениях крыльев только на втором этапе деформирования моделей (после смены направления перемещения крыльев) в обстановках сдвига или транстенсии. В обстановке транспрессии второго этапа раздвиги этого типа не наблюдаются, а

при транстенсии растяжение осуществляется не только у раздвигов е-типа, но и у плоскостей разрывов R_2 .

Кроме того, наиболее амплитудные структуры растяжения разных типов формируются вблизи основных швов дизъюнктивов, для области которых установлена наибольшая величина дилатансии. Дилатансия, как правило, характерна для разломных зон, которые на первом этапе развиваются в обстановке транспрессии, а на втором – транстенсии. В таких зонах наблюдаются наибольшие размеры дизъюнктивных структурных ловушек, связанных с разрывами разных типов – е, R и Y.

Автор благодарен сотрудникам лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН А.С. Черемных и И.К. Декабреву за помощь при проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке ПАО АК «АЛРОСА» и РФФИ (проект 16-05-00154).

Библиографический список

1. Крейтер В.М. Структуры рудных полей и месторождений. М.: Госгеолтехиздат, 1956. 272 с.
2. Яковлев Г.Ф. Геологические структуры рудных полей и месторождений. М.: Изд-во МГУ, 1982. 270 с.
3. Семинский Ж.В., Семинский К.Ж. Тектонофизический анализ обстановок локализации рудных полей и месторождений в разломных зонах земной коры // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. № 4. С. 292–304.
4. Гладков А.С., Зинчук Н.Н., Борняков С.А., Шерман С.И., Манаков А.В., Матросов В.А., Гарат М.Н., Дзюба И.А. Новые данные о внутреннем строении и механизме образования зон кимберлитовмещающих разломов Мало-Ботуобинского района (Якутская алма-

зоносная провинция) // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 3. С. 366–369.

5. Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопроисковых работах. М.: Научный мир, 2008. 175 с.

6. Черемных А.В., Гладков А.С., Черемных А.С. Экспериментальное исследование формирования сети разрывов Накынского поля Якутской алмазоносной провинции // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 1. С. 66–82.

7. Schreurs G. Experiments on strike-slip faulting and block rotation // *Geology*. 1994. Vol. 22. P. 567–570.

8. Шерман С.И., Черемных А.В. Оценка движений блоков фундамента платформ по амплитудам надвиговых перемещений осадочных толщ (новые результаты экспериментальных исследований) // *Доклады Академии наук*. 1998. Т. 358. №3. С. 381–383.

9. McClay K., Bonora M. Analog models of restraining step overs in strike-slip fault systems // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 2001. Vol. 85. № 2. P. 233–260.

10. Короновский Н.В., Гогоненков Г.Н., Гончаров М.А., Тимурзиев А.И., Фролова Н.С. Роль сдвига вдоль горизонтальной плоскости при формировании структур пропеллерного типа // *Геотектоника*. 2009. № 5. С. 50–64.

11. Семинский К.Ж., Семинский Ж.В. Спецкартирование разломных зон земной коры и его возможности в исследовании структурного контроля кимберлитов в Алаakit-Мархинском поле Якутской алмазоносной провинции: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 204 с.

12. Dooley T.P., Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tec-

tonics: A review and new experimental results // *Tectonophysics*. 2012. Vol. 574–575. P. 1–71.

13. Schellart W.P., Strak V. A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments // *Journal of Geodynamics*. 2016. Vol. 100. P. 7–32.

14. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice // *Journal of Structural Geology*. 1985. Vol. 7. № 3/4. P. 437–457.

15. Sylvester A.G. Strike-slip faults // *Geological Society of America Bulletin*. 1988. Vol. 100. P. 1666–1703.

16. Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В., Тугарина М.А. Внутренняя структура континентальных разломных зон: прикладной аспект. Новосибирск: Гео, 2005. 293 с.

17. Гончаров М.А., Талицкий В.Г. Зарождаются ли «трещины скалывания» путем скалывания? // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 1998. № 3. С. 18–22.

18. Ваганов В.И. Алмазные месторождения России и мира (основы прогнозирования). М.: Геоинформмарк, 2000. 371 с.

References

1. Kreiter V.M. *Struktury rudnykh polei i mestorozhdenii* [Structure of ore fields and deposits]. Moscow: Gosgeoltekhizdat Publ., 1956, 272 p. (In Russian).

2. Yakovlev G.F. *Geologicheskie struktury rudnykh polei i mestorozhdenii* [Geological structures of ore fields and deposits]. Moscow: Lomonosov Moscow State University Publ., 1982, 270 p. (In Russian).

3. Seminskii Zh.V., Seminskii K.Zh. Tectonophysical analysis of environments for localization of ore fields and deposits in

fault zones of the earth's crust. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2004, vol. 46, no. 4, pp. 292–304. (In Russian).

4. Gladkov A.S., Zinchuk N.N., Bornyakov S.A., Sherman S.I., Manakov A.V., Matrosov V.A., Garat M.N., Dzyuba I.A. New Data on the Internal Structure and the Mechanism of Formation of Kimberlite-Bearing Fault Zones in the Malo-Botuobinskii Region (the Yakut Diamond-Bearing Province). *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 2005, vol. 402, no. 3, pp. 366–369. (In Russian).

5. Gladkov A.S., Borniakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A. *Tektonofizicheskie issledovaniia pri almazopoiskovykh rabotakh* [Tectonophysical studies at diamond exploration]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2008, 175 p. (In Russian).

6. Cheremnykh A.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.S. Experimental investigation of fault network formation in the Nakyn field of the Yakutsk diamondiferous province. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits], 2017, vol. 40, no. 1, pp. 66–82. (In Russian).

7. Schreurs G. Experiments on strike-slip faulting and block rotation. *Geology*, 1994, vol. 22, pp. 567–570.

8. Sherman S.I., Cheremnykh A.V. [Assessment of platform basement block movements along the sedimentary sequence thrust amplitudes (new results of experimental researches)]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences]. *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 1998, vol. 358, no. 3, pp. 381–383. (In Russian).

9. McClay K., Bonora M. Analog models of restraining step overs in strike-slip fault systems. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2001, vol. 85, no. 2, pp. 233–260.

10. Koronovskii N.V., Gogonenkov G.N., Goncharov M.A., Timurziev A.I., Frolova N.S. Role of shear along the horizontal plane in helicoidal structure formation *Geotektonika* [Geotectonics], 2009, no. 5, pp. 50–64. (In Russian).

11. Seminskii K.Zh., Seminskii Zh.V. *Spetskartirovanie razlomnykh zon zemnoi kory i ego vozmozhnosti v issledovanii*

strukturnogo kontrolya kimberlitov v Alakit-Markhinskom pole Yakutskoi almazonosnoi provintsii [Specialized mapping of crustal fault zones and its potential in studying kimberlite structural control in the Alakit-Markha field of the Yakut diamond province]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2016, 204 p. (In Russian).

12. Dooley T.P., Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, 2012, vol. 574–575, pp. 1–71.

13. Schellart W.P., Strak V. A review of analogue modelling of geodynamic processes: Approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *Journal of Geodynamics*, 2016, no. 100, pp. 7–32.

14. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 1985, vol. 7, no. 3/4, pp. 437–457.

15. Sylvester A.G. Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, vol. 100, pp. 1666–1703.

16. Seminskii K.Zh., Gladkov A.S., Lunina O.V., Tugarina M.A. *Vnutrennyaya struktura kontinental'nykh razlomnykh zon: prikladnoi aspekt* [Internal structure of continental fault zones: Applied aspect]. Novosibirsk: Geo Publ., 2005, 293 p. (In Russian).

17. Goncharov M.A., Talitskii V.G. Are shear cracks originated from shear or not? *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya* [Moscow University Geology Bulletin], 1998, no. 3, pp. 18–22. (In Russian).

18. Vaganov V.I. *Almaznye mestorozhdeniya Rossii i mira (osnovy prognozirovaniya)* [Diamond deposits in Russia and abroad (Fundamentals of forecasting)]. Moscow: Geoinformmark Publ., 2000, 371 p. (In Russian).

Критерии авторства

Черемных А.В. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Cheremnykh A.V. has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 550.341

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-22-34>

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ БАЙКАЛЬСКОЙ СЕТИ

© А.А. Добрынина^а, А.В. Саньков^б, А.Н. Шагун^с

^{а-с}Институт земной коры СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

^аГеологический институт СО РАН,
670047, Российская Федерация, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а.

РЕЗЮМЕ. Цель. Оценка и анализ амплитудно-частотного состава фоновых микросейсмических колебаний и их возможных сезонных вариаций на территории Байкальской сейсмической зоны. **Методы.** В работе применялся метод спектральных отношений вертикальных и горизонтальных компонент микросейсм (H/V-отношения) или метод Накамуры. В качестве исходного анализируемого материала использовались записи непрерывной сейсмической регистрации, полученные 23 короткопериодными сейсмическими станциями Байкальского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук», расположенными на территории Байкальской сейсмической зоны. С целью исключения случайных ошибок, связанных с техногенными помехами, землетрясениями, промышленными взрывами и пр., для анализа выбирались длительные участки сейсмических записей продолжительностью не менее 1 ч. **Результаты.** Были получены кривые H/V-отношений и их сезонные вариации, характеризующие амплитудно-частотный состав фоновых микросейсмических колебаний в частотном диапазоне от 0,5 до 10 или 20 Гц в зависимости от типа регистрирующей аппаратуры. **Выводы.** Полученные кривые H/V-отношений условно можно разделить на две группы: стабильные и со значительными сезонными вариациями. К первой группе относятся станции с устойчивыми амплитудно-частотными характеристиками микросейсмического сигнала, не зависящими от сезона. Ко второй группе относятся станции, для которых получены кривые H/V-отношений со значительными сезонными вариациями. Сопоставление положения сейсмических станций и полученных кривых H/V-отношений показало существование зависимости амплитудно-частотных характеристик микросейсмического сигнала от локальных условий их в районе установки станций (на выходе скальных пород фундамента, в зоне крупных активных разломов или во впадинах с мощным осадочным чехлом).

Ключевые слова: Байкальская сейсмическая зона, амплитудно-частотный состав сейсмического сигнала, микросейсм, метод Накамуры, спектральный анализ.

Информация о статье. Дата поступления 15 июня 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Добрынина А.А., Саньков А.В., Шагун А.Н. Сезонные вариации амплитудно-частотных характеристик микросейсмических колебаний по данным сейсмических станций байкальской сети // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 22–34. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-22-34

^аДобрынина Анна Александровна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института земной коры СО РАН, Геологического института СО РАН, e-mail: dobrynina@crust.irk.ru
Anna A. Dobrynina, Candidate of Physical and Mathematical sciences, Senior Researcher of the Institute of the Earth's crust SB RAS, Geological Institute SB RAS, e-mail: dobrynina@crust.irk.ru

^бСаньков Алексей Владимирович, ведущий инженер, e-mail: alekseysankov@inbox.ru
Aleksey V. Sankov, Leading Engineer, e-mail: alekseysankov@inbox.ru

^сШагун Артем Николаевич, ведущий инженер, e-mail: shagin@crust.irk.ru
Artem N. Shagun, Leading Engineer, e-mail: shagin@crust.irk.ru

SEASONAL VARIATIONS OF AMPLITUDE-FREQUENCY PATTERNS OF LOCAL AMBIENT NOISES BY BAIKAL NETWORK SEISMIC STATION DATA

© A.A. Dobrynina^a, A.V. Sankov^b, A.N. Shagun^c

^{a-c}Institute of the Earth's crust SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

^aGeological Institute SB RAS,
6a Sakhyanova St., Ulan-Ude, 670047, Buryat Republic, Russian Federation

ABSTRACT. Purpose. The purpose of the paper is evaluation and analysis of the amplitude-frequency patterns of background microseisms (local ambient noises) and their possible seasonal variations in the territory of the Baikal seismic zone. **Methods.** The method of spectral relations of the vertical and horizontal components of the microseism (H/V-ratio) or Nakamura method is used. The continuous seismic recording data obtained by 23 short-period seismic stations of the Baikal Branch of the Federal Research Centre "Single Unified Geophysical Survey of the Russian Academy of Science" located in the Baikal seismic zone are used as an input material for the analysis. Only long segments of seismic records with the duration of at least 1 hour have been selected for the analysis in order to exclude possible random errors related to human-made noises, earthquakes, industrial explosions, etc. **Results.** The obtained curves of H/V-ratios and their seasonal variations characterize the amplitude-frequency patterns of local ambient noises in the frequency range from 0.5 to 10.0 or 20.0 Hz depending on the type of the recording equipment used. **Conclusions.** The obtained H/V-ratio curves can be conditionally divided into two groups: stable and featuring significant seasonal variations. The first group includes the stations with stable amplitude-frequency characteristics of the microseismic signal, which do not depend on the season. The second group includes the stations for which the H/V-ratio curves demonstrating significant seasonal variations have been obtained. Having compared the position of the seismic stations and the obtained H/V-ratio curves, the authors identified the dependence of the amplitude-frequency characteristics of the microseismic signal on their local conditions in the station setup area (at the outcrops of bedrock, in the zone of large active faults or in the rift depressions with a thick sedimentary cover).

Keywords: Baikal seismic zone, amplitude-frequency content of the seismic signal, microseisms (ambient noise), Nakamura method, spectral analysis

Article info. Received 15 June 2018; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Dobrynina A.A., Sankov A.V., Shagun A.N. Seasonal variations of amplitude-frequency patterns of local ambient noises by Baikal network seismic station data. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 22–34. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-22-34 (In Russian).

Введение

Многочисленные исследования последствий сильных и катастрофических землетрясений показали, что поверхностный осадочный слой может значительно усиливать проходящие сейсмические волны, что вызывает дополнительные разрушения [1, 2 и др.]. В связи с этим расчет влияния геологической среды на сейсмический сигнал является непременной составной частью всех работ по сейсмическому микрорайониро-

ванию областей с умеренной и высокой сейсмической активностью.

К настоящему времени разработан целый ряд методов для оценки амплитудно-частотных характеристик верхней части разреза [1, 3–6 и др.]. Наиболее часто применяется метод стандартных спектральных отношений [1, 6 и др.], согласно которому отклик среды на сигнал находится через отношения спектров землетрясений, записанных в исследуемом районе и на опорной станции, уста-

новленной на коренных породах. Часто используется метод одновременной инверсии, применяющийся для определения эффектов источника, пути распространения сигнала и отклика среды под станцией [3, 6 и др.]. Другим широко распространенным подходом является метод спектральных отношений горизонтальных и вертикальных компонент сейсмограммы H/V , он используется как для землетрясений (метод функций приемника) [7], так и для микросейсм (метод Накамуры) [8, 9 и др.]. Сопоставления амплитудно-частотных характеристик, полученных инверсионными методами, методами стандартных спектральных отношений, функций приемника и спектральных отношений микросейсм, показывают хорошее согласие наблюдаемых данных [10–12 и др.].

Целью настоящей работы является оценка и анализ амплитудно-частотного состава микросейсмических колебаний и их возможных сезонных вариаций на территории Байкальской сейсмической зоны методом спектральных отношений [8].

Район исследования

Байкальская сейсмическая зона является продуктом активно протекающих процессов рифтогенеза вдоль юго-восточного края Сибирской платформы (рис. 1). Она протягивается на расстояние 1600 км из северо-западной Монголии до Южной Якутии. Основу древней структуры региона представляют архейско-протерозойская Сибирская платформа и Саяно-Байкальская складчатая (подвижная) область, которые являются тектоническими структурами первого порядка. Внутри Саяно-Байкальской складчатой области выделяется ряд тектонических блоков – террейнов, возраст которых варьирует от позднего протерозоя до среднего палеозоя [13].

Байкальская сейсмическая зона является одним из наиболее сейсмически активных регионов России: за пери-

од инструментальных сейсмологических наблюдений (с 1950 г.) на ее территории произошло 13 землетрясений с магнитудой $M_s \geq 6$; согласно историческим данным в регионе отмечались события с магнитудой до 8,2 [14]. Последнее сильное событие произошло в районе Южного Байкала (Култукское землетрясение 27 августа 2008 г.) и по данным разных сейсмологических агентств имело моментную магнитуду $M_W = 6,1–6,3$.

Регистрация сейсмических событий в Байкальской сейсмической зоне ведется Байкальским филиалом ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук». Региональная сеть сейсмических станций (международный код BAGSR [15]) состоит из 25 станций (см. рис. 1), оборудованных цифровой сейсмической аппаратурой типа «Байкал-10, 11», разработанной в Геофизической службе СО РАН. Комплект аппаратуры имеет три короткопериодных сейсмометрических канала повышенной чувствительности (сейсмометры СМ-3, СМ-3КВ), регистрирующие скорости колебаний от 0,01–0,1 мкм/с до 100–1000 мкм/с; три грубых канала (сейсмометры ОСП-2М) для регистрации ускорений от 50–500 мкм/с² до 100–250 см/с². Частота дискретизации – 100 отсчетов в секунду [15].

Сейсмическая станция Иркутск (IRK) расположена на территории Сибирской платформы, на мощной толще консолидированных осадков палеозоя и мезозоя. Восемь станций находятся в складчатой области на выходах кристаллических пород: Закаменск (ZAK), Орлик (ORL), Тырган (TRG), Бодайбо (BOD), Тупик (TUP), Чита (CIT), Хапчанга (KPC), Талая (TLY). Остальные станции установлены в рифтовых впадинах или межвпадинных перемычках. Вблизи бортовых разломов впадин расположены станции Монды (MOY), Листвянка (LSTR), Онгурены (OGRR), Нижнеангарск (NIZ), Аршан (ARS),

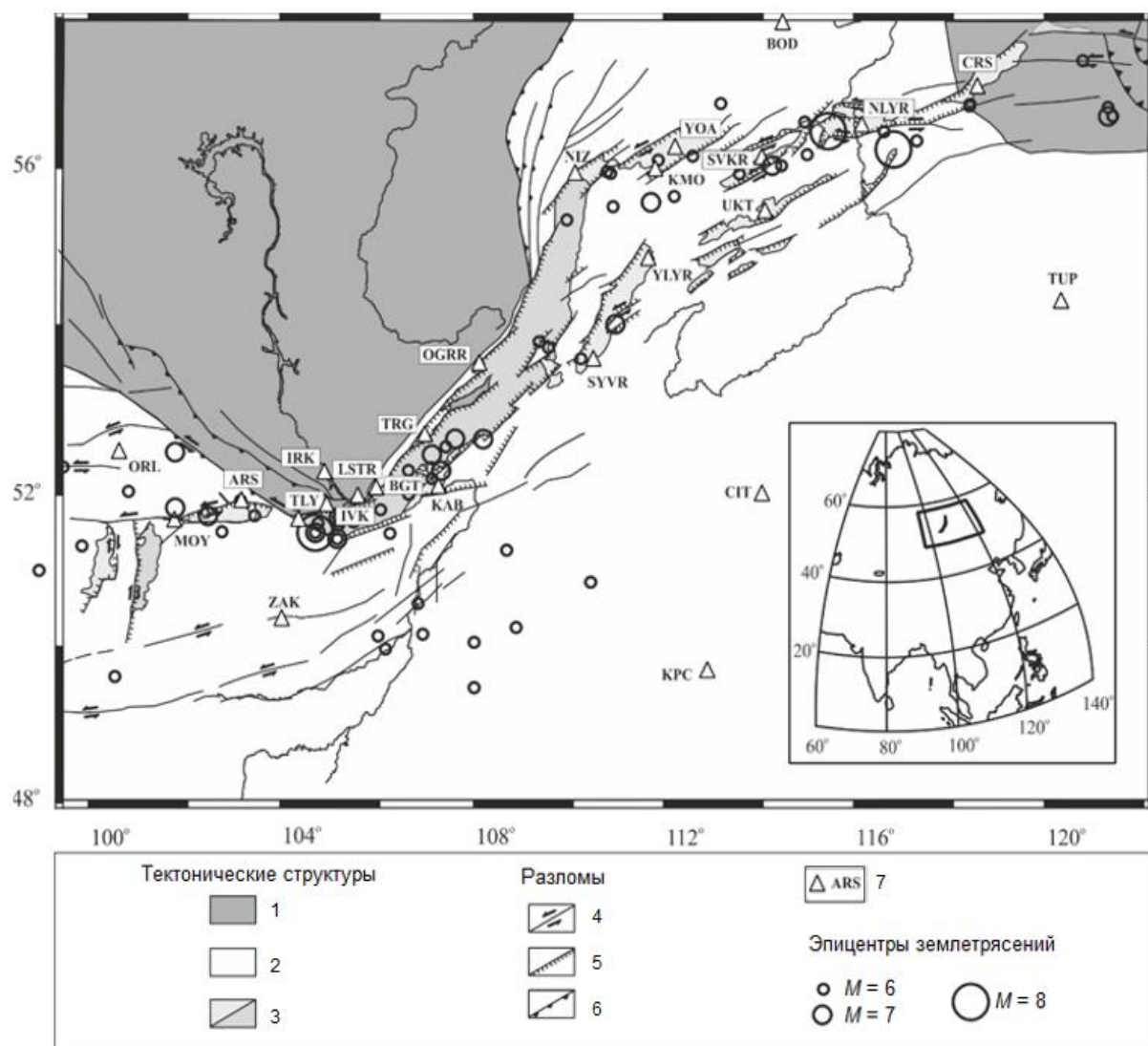


Рис. 1. Неотектоническая схема Байкальской сейсмической зоны

На врезке показано положение изучаемого района

Тектонические структуры: 1 – Сибирская платформа, 2 – Саяно-Байкальская подвижная область, 3 – кайнозойские рифтовые впадины; разломы: 4 – сдвиги, 5 – сбросы, 6 – взбросы и надвиги; 7 – сейсмическая станция

Fig. 1. Neotectonic diagram of the Baikal seismic zone

The inset shows the position of the area under investigation

Tectonic structures: 1 – Siberian platform, 2 – Sayan-Baikal manoeuvrable region, 3 – Cenozoic rift depressions; fractures: 4 – shifts, 5 – faults, 6 – uplifts and thrusts; 7 – seismic station

Улюнхан (YLYR), Суво (SYVR), Ивановка (IVK), Большое Голоустное (BGT). На межвпадинной перемычке располагается станция Северомуйск (SVKR). Остальные семь постоянных станций – Кабанск (KAB), Кумора (KMO), Уоян (YOA), Неляты (NLYR), Чара (CRS), Уа-кит (UKT) – находятся в рифтовых

впадинах, заполненных рыхлыми кайнозойскими осадками, мощность которых достигает 2300–2800 м (Тункинская, Баргузинская, Верхнеангарская, Муйская и Чарская впадины) [16]. Станции IVK и BGT в настоящей работе не рассматриваются из-за высокого уровня станционных помех.

Методы и материалы

Для оценки амплитудно-частотного состава микросейсмических колебаний и их возможных сезонных вариаций по данным сейсмических станций на территории Байкальской сейсмической зоны нами использовался метод спектральных отношений вертикальных и горизонтальных компонент микросейсм (H/V-отношения) или метод Накамуры [8]. Технология использования H/V-отношений для расчета отклика среды на сейсмический сигнал впервые была предложена в работе [9] и позже популяризована Ю. Накамурой [8]. Данный метод эффективно используется для расчета как фундаментальных периодов [4], так и соответствующих коэффициентов усиления колебаний [5].

Спектры микросейсмических колебаний и H/V-отношения рассчитывались с использованием программы SESAME [17]. Чтобы избежать случайных ошибок (техногенные помехи, транспорт, землетрясения, взрывы, погодные условия и др.) брался отрезок записи длительно-стью не менее 1 ч. Для этого участка записи выбиралось несколько десятков окон (длиной не более 30 с) так, чтобы избежать попадания в анализируемый участок записи случайных помех.

В работе [18] было показано, что уровень H/V-отношений на сейсмических станциях, расположенных в районах с высоким уровнем антропогенных помех (крупные населенные пункты, объекты промышленности, плотины ГЭС, авто- и железнодорожные магистрали), может значительно меняться в течение суток. Поэтому, для того чтобы избежать искажения результатов за счет антропогенного фактора, для оценки сезонных вариаций микросейсмических колебаний рассматривались данные непрерывной регистрации за сутки в разные дни недели (будни, выходные) и в разные сезоны (лето, зима). В окончательный расчет включались только те окна, для ко-

торых отношение STA/LTA лежало в пределах 0,5–2 (здесь STA и LTA – средние уровни амплитуды сигналов для короткого (1 с) и длинного (25 с) временных периодов).

Итоговые кривые H/V-отношений и соответствующие значения стандартных отклонений получались осреднением индивидуальных H/V-отношений для всех окон. Стандартные отклонения кривых H/V рассчитывались из среднего арифметического логарифмов всех индивидуальных кривых H/V для всех окон по формуле

$$\sigma(\log X) = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\log X_i - \log \langle X \rangle)^2 \right]^{1/2},$$

где X_i – кривая H/V, N – количество кривых, $\langle X \rangle$ – среднее арифметическое значение всех кривых H/V.

Для проверки надежности полученных кривых H/V использовались критерии, разработанные в ходе проекта SESAME [19]:

$$1) f_0 > \frac{10}{l_w};$$

$$2) n_c(f_0) > 200;$$

$$3) \sigma_A(f) < 2 \text{ для } 0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0,$$

если $f_0 > 0,5$ Гц.

Здесь f_0 – частота H/V пика; l_w – длина окна; $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$; n_w – количество окон для средней кривой H/V; $\sigma_A(f)$ – стандартное отклонение амплитуды $A_{H/V}(f)$; $A_{H/V}(f)$ – H/V амплитуда кривой на частоте f ; f – текущая частота.

Результаты и их обсуждение

В результате для 23 сейсмических станций Байкальского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» получены кривые H/V, характеризующие амплитудно-частотный состав фоновых микро-

сейсмических колебаний (рис. 2). В силу особенностей регистрирующей аппаратуры (рабочая полоса частот от 0,5 до 10 и 20 Гц в зависимости от прибора – «Байкал-10» и «Байкал-11» соответ-

ственно) надежные определения спектральных характеристик колебаний получены для частотного диапазона от 0,5 до 10 или 20 Гц.

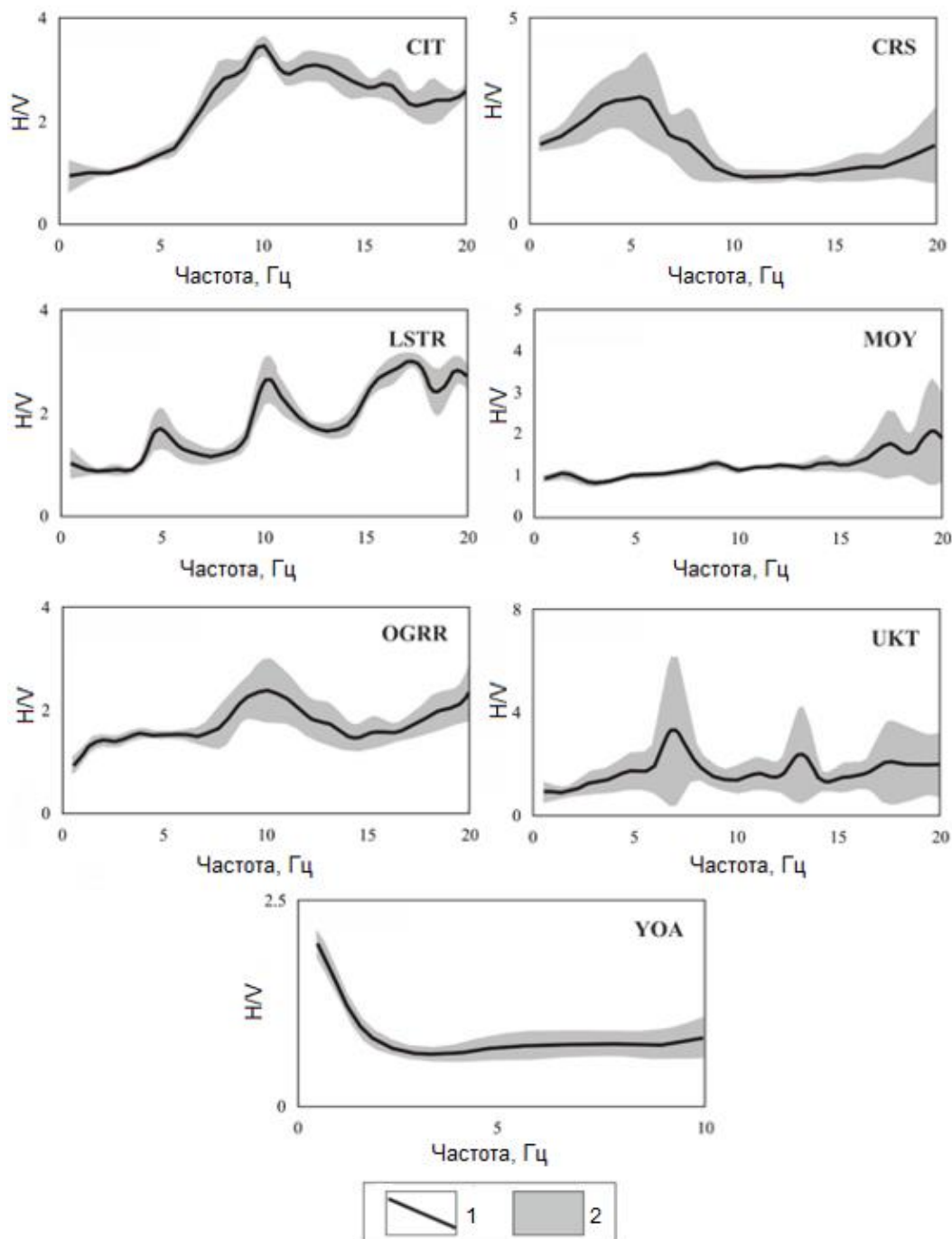


Рис. 2. Примеры стабильных кривых H/V-отношений

1 – кривая H/V, 2 – вариации кривых H/V;
CIT, CRS и др. – обозначения станций

Fig. 2. Examples of stable H/V ratio curves

1 – H/V curve; 2 – variations of H/V curves;
CIT, CRS etc. – indications of stations

По типу полученных кривых H/V-отношений сейсмические станции региона можно разделить на две группы. Первая группа – это сейсмические станции с устойчивыми амплитудно-частотными характеристиками микро-сейсмического сигнала, не зависящими от сезона. К этой группе относятся станции BOD, ZAK, KMO, LSTR, MOY, NLYR, OGRR, ORL, TUP, UKT, YLYR, YOA, KPC, CRS, CIT (см. рис. 2).

В целом кривые H/V-отношений для станций первой группы достаточно простые и представляют собой кривую, осложненную незначительными мало-амплитудными экстремумами. Иногда уровень этих кривых повышается в высокочастотной области, как, например, для станции MOY (см. рис. 2). Такой тип кривой H/V-отношений отмечается для станций, расположенных непосредственно на выходах коренных (скальных) пород фундамента. Теоретически для таких станций кривая H/V должна представлять собой прямую с амплитудой, близкой к 1. Полученные нами кривые H/V-отношений в целом соответствуют этому условию.

Для некоторых станций отмечаются достаточно широкие плавные пики на низких (CRS, YOA) и средних (CIT) частотах. Также для трех станций наблюдается присутствие узких пиков H/V-кривой, локализованных в частотном диапазоне 5–14 Гц (см. рис. 2).

Ко второй группе относятся станции, для которых получены кривые H/V-отношений со значительными сезонными вариациями: ARS, IRK, NIZ, SVKR, SYVR, TLY, TRG (рис. 3).

Характер проявления сезонных вариаций на разных станциях заметно отличается. Для некоторых станций отмечаются 1–2 достаточно узких пика на фоне общего незначительного повышения уровня H/V-кривой для теплого периода (станции SYVR и TRG). Для других станций в летний период наблюда-

ется почти линейный рост H/V-отношения с частотой (ARS), иногда осложненный пиком в области частот 7–8 Гц (NIZ, TLY). Для станций IRK и SVKR кривая H/V для теплого периода во всем рассматриваемом частотном диапазоне превышает кривую для холодного периода, в целом сохраняя форму (см. рис. 3).

Для сейсмической станции KAB получена очень нестабильная кривая H/V: отношения амплитуд горизонтальных и вертикальной компонент в области низких частот (менее 2,5 Гц) варьируются в течение суток в пределах 1–11,8, что послужило причиной исключения этой станции из рассмотрения сезонных колебаний.

Известно, что источником микро-сейсмических колебаний могут быть как экзогенные (морские волны, приливы, атмосферные циклоны, ветер, деятельность человека), так и эндогенные (процессы трещинообразования, смещение горных пород, перестройкой структур за счет тектонических сил и деформирующих воздействий различной природы) факторы. В Байкальской сейсмической зоне известны и хорошо изучены проявления байкальских микросейсм с периодами 2–3,5 с (частоты 0,25–0,5 Гц) [20]. Значительные суточные вариации амплитуд H/V-отношений на станции KAB могут объясняться суммарным воздействием прибойных эффектов оз. Байкал и неудачным расположением станции – во впадине, заполненной рыхлыми осадками, с глубоко залегающим фундаментом. Косвенным подтверждением влияния заполнения впадины на амплитудно-частотный состав микросейсм является стабильные кривые H/V-отношений для станций YOA и CRS, также осложненные пиками в области частот ниже 2,5 и 9 Гц соответственно (см. рис. 2).

Анализ спектров горизонтальных и вертикальных компонент для станций второй группы показывает большее

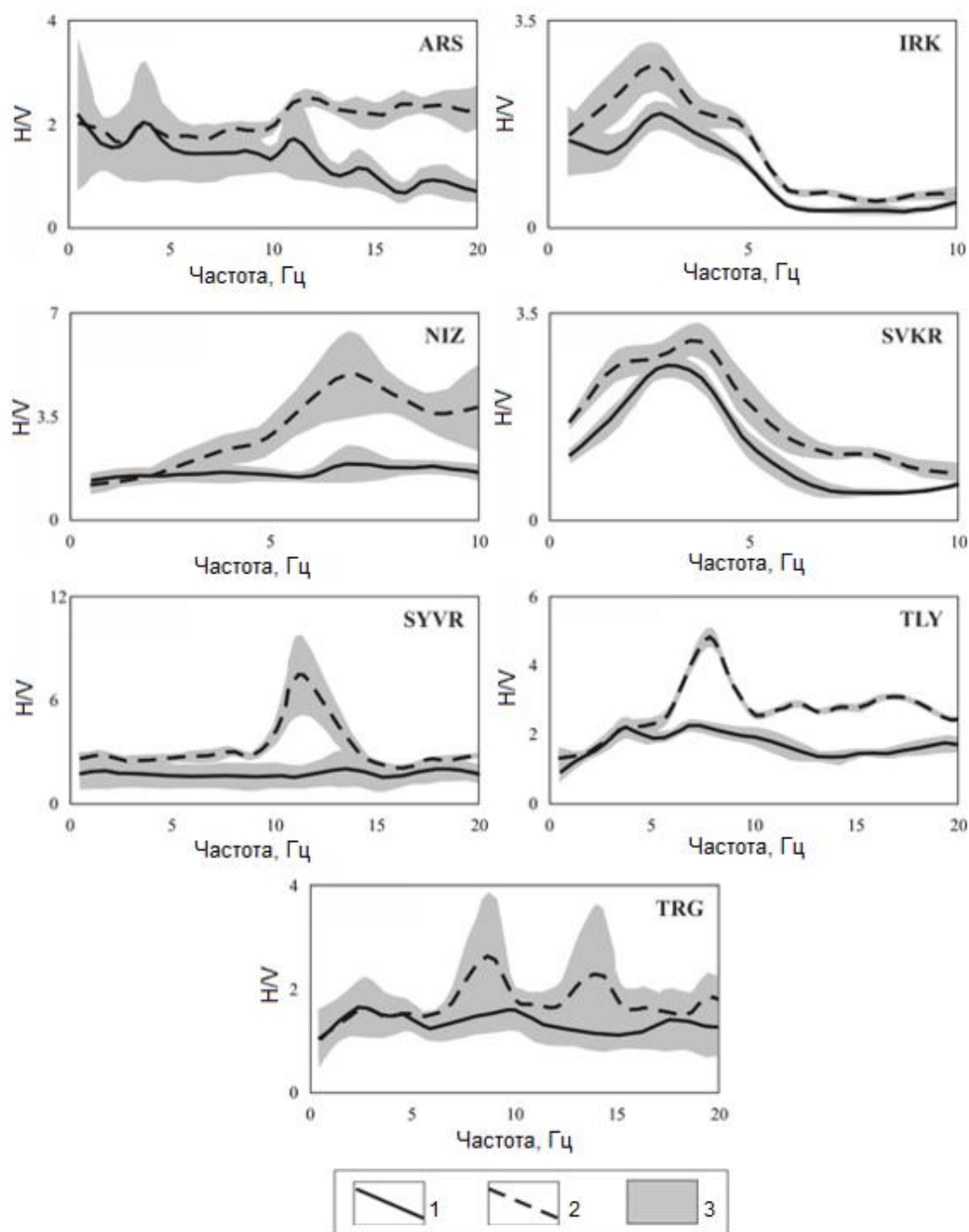


Рис. 3. Кривые H/V-отношений с сезонными вариациями

1 – кривая H/V в зимний период, 2 – кривая H/V в летний период, 3 – вариации кривых H/V;
ARS, IRK и др. – обозначения станций

Fig. 3. Curves of H/V-ratio with seasonal variations

1 – H/V curve in the winter period, 2 – H/V curve in the summer period, 3 – variations of H/V curves;
ARS, IRK etc. – indications of stations

увеличение амплитуд горизонтальных колебаний относительно вертикальных в летний период. Это увеличение может быть связано с изменением в волновом составе микросейсм в зависимости от

сезонных и техногенных условий. Интересно, что для станций TRG и TLY отмечается также сильное увеличение амплитуд колебаний в направлении север – юг относительно направления во-

сток – запад. В целом общее увеличение амплитуд H/V -отношений в теплые периоды может объясняться сезонным промерзанием и оттаиванием грунтов [21]. В то же время узкие локализованные пики, наблюдающиеся для станций SYVR, TLY и TRG в летние периоды, должны быть вызваны влиянием других факторов.

Помимо появления сезонных пиков для указанных станций обращает на себя внимание наличие локальных пиков H/V -отношений на частотах 5–10 Гц для некоторых станций со стабильными амплитудно-частотными характеристиками микросейсмического фона (LSTR, OGRR, UKT, см. рис. 2). Все шесть станций установлены на выходах коренных пород фундамента, так что наличие пиков не может объясняться локальными грунтовыми условиями. Кроме этого, общим для всех этих станций является их расположение – вблизи или непосредственно в зонах крупных активных разломов (см. рис. 1). Опыт исследований зон разломов методами микросейсмического зондирования показывает, что подобные пики наблюдаются вблизи зон повышенной трещиноватости и дробления с признаками активизации в плиоцен-четвертичное время [22]. Существование пиков H/V -отношений вблизи зон разломов может быть вызвано откликом сейсмического сигнала на прохождение через крупную структурную неоднородность. По-видимому, характерные частоты связаны с размерами и упругими свойствами среды в зоне разлома. Сезонный характер появления этих локальных пиков на кривой H/V -отношений в летний период и их отсутствие в зимний может объясняться тем, что зимой происходит промерзание грунтовых толщ, включая водопроводящие зоны тектонитов разлома, что зна-

чительно меняет упругие свойства среды [21].

Заключение

В результате проведенного исследования методом спектральных H/V -отношений получены амплитудно-частотные характеристики микросейсмического фона для сейсмических станций Байкальской сейсмической зоны и их сезонных вариаций.

Полученные H/V -кривые условно можно разделить на две группы: стабильные и со значительными сезонными вариациями. К первой группе относятся станции с устойчивыми амплитудно-частотными характеристиками микросейсмического сигнала, не зависящими от сезона. Ко второй группе относятся станции, для которых получены кривые H/V -отношений со значительными сезонными вариациями. Для станций второй группы характерно общее увеличение амплитуды H/V -отношений в теплые периоды, что может объясняться сезонным промерзанием и оттаиванием грунтов.

Для шести станций, расположенных в зонах крупных активных разломов, отмечается существование узких локальных пиков в частотном диапазоне 5–15 Гц. Для части станций эти пики наблюдаются постоянно, для остальных имеют сезонный характер, что может объясняться промерзанием и оттаиванием водопроводящих зон тектонитов разлома.

В работе использовались данные непрерывной цифровой регистрации, полученные Байкальским филиалом ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области (проект № 17–45–388088_р–а).

Библиографический список

1. Borchardt R.D. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1970. Vol. 60. P. 29–61.
2. Borchardt R.D., Glassmoyer G. On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1992. Vol. 82. P. 603–641.
3. Andrews D.J. Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different sizes // *Earthquake Source Mechanics* / ed. S. Das, J. Boatwright, C.H. Scholz. Washington: American Geophysical Union, 1986. P. 259–268.
4. Field E.H., Jacob K.H. The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise // *Geophysical Research Letters*. 1993. Vol. 20. P. 2925–2928.
5. Lermo J.F., Chavez-Garcia F.J., Are microtremors useful in site response evaluation? // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. Vol. 84. P. 1350–1364.
6. Drouet S., Chevrot S., Cotton F., Souriau A. Simultaneous Inversion of Source Spectra, Attenuation Parameters, and Site Responses: Application to the Data of the French Accelerometric Network // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2008. Vol. 98. P. 198–219.
7. Langston C.A. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves // *Journal of Geophysical Research*. 1979. Vol. 84. P. 4749–4762.
8. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*. 1989. Vol. 30. P. 25–33.
9. Nogoshi M., Igarashi T. On the amplitude characteristics of microtremor (part 2) // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1971. Vol. 24. P. 26–40.
10. Field E.H., Jacob K.H. A comparison and test of various site response estimation techniques, including three that are non reference-site dependent // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1995. Vol. 86. P. 991–1005.
11. Lachet C., Hatzfeld D., Bard P.-Y., Theodulidis N., Papaioannou C., Savva A. Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece): comparison of different approaches // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1996. Vol. 86. P. 1692–1703.
12. Bonilla L.F., Steidl J.H., Lindley G.T., Tumarkin A.G., Archuleta R.J. Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site effect estimation using S-wave, coda, and H/V methods // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1997. Vol. 87. P. 710–730.
13. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. М.: Наука, 1977. 536 с.
14. Гордиенко И.В. Металлогения различных геодинамических обстановок Монголо-Забайкальского региона // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2014. S3-1. С. 7–13
15. Масальский О.К., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Современное состояние сейсмических наблюдений в Прибайкалье // *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы II Междунар. сейсмологической школы* / под ред. В.И. Уткина. Обнинск: Изд-во ГС РАН, 2007. С. 140–144.
16. Солоненко В.П., Хилько С.Д., Хромовских В.С. [и др.]. Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. Новосибирск: Наука, 1977. 304 с.

17. SESAME group. Final report on measurements guidelines, LGIT Grenoble, CETE Nice, WP02, H/V technique: experimental conditions. 2003 [Электронный ресурс]. URL: http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/D08-02_Texte.pdf

18. Chernykh E.N., Dobrynina A.A. Variations of the microseism spectral ratios for Baikal seismic station network // Geophysical Research Abstracts. 2010. Vol. 12. EGU2010-479. [Электронный ресурс]. URL: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2010/EGU2010-479.pdf>

19. Bard P.-Y. Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues // 10th European Conference on Earthquake Engineering, Duma (Editor). Rotterdam: Balkema, 1995. P. 305–323.

20. Табулевич В.Н., Дреннова Н.Н., Потапов В.А., Черных Е.Н. Влияние

штормовых микросейсм на проявление сейсмичности в береговой зоне озера Байкал // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 8. С. 1271–1278.

21. Дреннов А.Ф., Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннова Н.Н. Влияние верхней зоны разреза на амплитудно-частотный состав сейсмического сигнала на примере сейсмических станций Прибайкалья и Забайкалья // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 2. С. 15–25.

22. Sankov A.V., Dobrynina A.A., Chernykh E.N., Sankov V.A., Shagun A.N. Investigation of the boundary and internal fault zones of Tunka basin (Baikal rift system) using HVSR method // Proceedings of the International Conference on Astronomy and Geophysics in Mongolia. Ulaanbaatar, Mongolia, 20–22 July 2017. Ulaanbaatar: Mongol Altay printing CoLtd, 2017. P. 231–234.

References

1. Borchardt R.D. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. Bulletin of the Seismological Society of America, 1970, vol. 60, pp. 29–61.

2. Borchardt R.D., Glassmoyer G. On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, vol. 82, pp. 603–641.

3. Andrews D.J. Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different sizes. Earthquake Source Mechanics. Washington: American Geophysical Union, 1986, pp. 259–268.

4. Field E.H., Jacob K.H. The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise. Geophysical Research Letters, 1993, vol. 20, pp. 2925–2928.

5. Lermo J.F., Chavez-Garcia F.J., Are microtremors useful in site response evaluation? Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, vol. 84, pp. 1350–1364.

6. Drouet S., Chevrot S., Cotton F., Souriau A. Simultaneous Inversion of Source Spectra, Attenuation Parameters, and Site Responses: Application to the Data of the French Accelerometric Network. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, vol. 98, pp. 198–219.

7. Langston C.A. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. Journal of Geophysical Research, 1979, vol. 84, pp. 4749–4762.

8. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 1989, vol. 30, pp. 25–33.

9. Nogoshi M., Igarashi T. On the amplitude characteristics of microtremor (part 2). Journal of the Physical Society of Japan, 1971, vol. 24, pp. 26–40.

10. Field E.H., Jacob K.H. A comparison and test of various site response estimation techniques, including three that are non reference-site dependent. Bulletin of

the Seismological Society of America, 1995, vol. 86, pp. 991–1005.

11. Lachet C., Hatzfeld D., Bard P.-Y., Theodulidis N., Papaioannou C., Savvaidis A. Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece): comparison of different approaches. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, vol. 86, pp. 1692–1703.

12. Bonilla L.F., Steidl J.H., Lindley G.T., Tumarkin A.G., Archuleta R.J. Site amplification in the San Fernando Valley, California: variability of site effect estimation using S-wave, coda, and H/V methods. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, vol. 87, pp. 710–730.

13. Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. *Novyi katalog sil'nykh zemletryasenii na territorii SSSR s drevneishikh vremen do 1975 g.* [A new catalog of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975]. Moscow: Nauka Publ., 1977, 536 p. (In Russian).

14. Gordienko I.V. Metallogeny of various geodynamic settings in the Mongol-Transbaikalia region. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* [Geology and mineral resources of Siberia], 2014, vol. S3-1, pp. 7–13. (In Russian).

15. Masal'skii O.K., Chechel'nitskii V.V., Gileva N.A. *Sovremennoe sostoyanie seismicheskikh nablyudenii v Pribaikal'e* [Current state of seismic observations in the Baikal region]. *Materialy II Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannyykh"* [Materials of the Second International Seismological School: Modern methods of seismological data processing and interpretation]. Obninsk: Geophysical Survey RAS Publ., 2007, pp. 140–144. (In Russian).

16. Solonenko V.P., Khil'ko S.D., Khromovskikh V.S. *Seismicheskoe raionirovanie Vostochnoi Sibiri i ego geologo-geofizicheskie osnovy* [Seismic zoning of Eastern Siberia and its geological and geo-

physical foundations]. Novosibirsk: Nauka, 1977, 304 p. (In Russian).

17. SESAME group. Final report on measurements guidelines, LGIT Grenoble, CETE Nice, WP02, H/V technique: experimental conditions, 2003. Available at: http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/D08-02_Texte.pdf

18. Chernykh E.N., Dobrynina A.A. Variations of the microseism spectral ratios for Baikal seismic station network. *Geophysical Research Abstracts*, 2010, vol. 12, EGU2010-479. Available at: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2010/EGU2010-479.pdf>

19. Bard P.-Y. Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues. 10th European Conference on Earthquake Engineering, Duma (Editor). Rotterdam: Balkema, 1995, pp. 305–323.

20. Tabulevich V.N., Drennova N.N., Potapov V.A., Chernykh E.N. The effect of storm microseisms on seismicity manifestation in the coastal zone of lake Baikal. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2001, vol. 42, no. 8, pp. 1271–1278. (In Russian).

21. Drennov A.F., Dzhurik V.I., Serebrennikov S.P., Drennova N.N. Influence of the upper section on the amplitude-frequency content of a seismic signal by the example of seismic stations in Pribaikalye and Trans-Baikal area. *Seismicheskie pribory* [Seismic Instruments], 2010, vol. 46, no. 2. pp. 15–25. (In Russian).

22. Sankov A.V., Dobrynina A.A., Chernykh E.N., Sankov V.A., Shagun A.N. Investigation of the boundary and internal fault zones of Tunka basin (Baikal rift system) using HVSR method. *Proceedings of the International Conference on Astronomy and Geophysics in Mongolia*. Ulaanbaatar, Mongolia, 20–22 July 2017. Ulaanbaatar: Mongol Altay printing Co Ltd, 2017, pp. 231–234.

Критерии авторства

Добрынина А.А., Саньков А.В., Шагун А.Н. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Dobrynina A.A., Sankov A.V., Shagun A.N. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.243

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-35-49>

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ТРЕЩИНОВАТОСТИ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЛЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ИНТРУЗИВНОГО МАССИВА ТАЖЕРАН В ПРИБАЙКАЛЬЕ)

© Ю.П. Бурзунова^а

^аИнститут земной коры СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

РЕЗЮМЕ. Цель. Провести комплексный анализ трещиноватости и сравнить результаты двух принципиально различных методов реконструкции полей тектонических напряжений на основе геолого-структурных данных участка Тажеран в Прибайкалье. **Методы.** В работе применен новый подход к парагенетическому анализу статистических замеров «немой» трещиноватости, позволяющий восстановить напряженное состояние локального объема горных пород и установить его принадлежность к зоне разлома определенного морфогенетического типа и ориентировки. Вторым способом реконструкции полей напряжений являлся кинематический метод на основе анализа векторов смещений по разрывам. **Результаты.** Проведен анализ 22 массовых замеров элементов залегания трещин (по 100 шт.) и 158 замеров штрихов скольжения в 16 пунктах наблюдения. Получено 70 решений парагенетического метода и 26 решений кинематического метода о полях напряжений локального ранга. Трещинные парагенезисы формировались в полях сжатия, сдвига и растяжения примерно в равном количестве, следы смещений больше проявлены в сдвиговых полях. Сравнение итогов по каждому пункту наблюдений показало, что большая часть решений кинематического метода (22 из 26) имеет аналогичное по типу и ориентировке решение парагенетического метода о поле напряжений первого или второго порядка. **Выводы.** Результаты реконструкции локальных полей напряжений двумя методами сопоставимы и в целом дополняют и частично подтверждают друг друга. Восстановленные разными методами идентичные поля напряжений предположительно относятся к одному этапу. Остальные – преимущественно парагенетические – решения свидетельствуют о полях напряжений на ранних стадиях развития мелких разломных зон в пределах участка. Рекомендуется комплексное применение парагенетического и кинематического методов.

Ключевые слова: реконструкция поля напряжений, разрывы, разломная зона, трещинная сеть, разрывной парагенезис, зеркало скольжения, штрихи скольжения.

Информация о статье. Дата поступления 31 июля 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Бурзунова Ю.П. Применение различных методов анализа трещиноватости для реконструкции полей тектонических напряжений (на примере интрузивного массива Тажеран в Прибайкалье) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 35–49. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-35-49

^аБурзунова Юлия Петровна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер лаборатории тектонофизики, e-mail: burzunova@crust.irk.ru

Yulia P. Burzunova, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Leading Engineer of the Laboratory of Tectonophysics, e-mail: burzunova@crust.irk.ru

USE OF DIFFERENT FRACTURE ANALYSIS METHODS FOR TECTONIC STRESS FIELDS RECONSTRUCTION (ON EXAMPLE OF THE TAZHERAN INTRUSIVE MASSIF IN PRIBAIKALIE)

© Yu.P. Burzunova^a

^aInstitute of the Earth's Crust SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

ABSTRACT. The **Purpose** of the paper is to carry out a complex analysis of fracturing and compare the results of two fundamentally different reconstruction methods of tectonic stress fields on the basis of geological and structural data of the Tazheran site in Pribaikalie. **Methods.** The study employs a new approach to the paragenetic analysis of statistical measurements of «mute» fracturing, which allows to restore the stressed state of a local rock volume and determine its belonging to the fault zone of a certain morphogenetic type and orientation. The second reconstruction method of stress fields is a kinematic method based on the analysis of fracture displacement vectors. **Results.** The analysis of 22 mass measurements of fracture attitude (100 joints each) and 158 measurements of slickensides at 16 observation points has been carried out. We have obtained 70 solutions of the paragenetic method and 26 solutions of the kinematic method on local stress fields. Fracture parageneses were formed in the fields of compression, shear and strike-slip in approximately equal amounts. The traces of displacements are more developed in strike-slip fields. A comparison of results for each observation point has showed that most of kinematic solutions (21 of 26) have a paragenetic solution similar in type and orientation for the stress field of the first or second order. **Conclusions.** The reconstruction results of local stress fields by two methods are comparable and in general complement and partially confirm each other. The identical stress fields restored by different methods are presumably referred to one stage. The other mainly paragenetic solutions indicate stress fields in the early development stages of small fault zones within the site. A complex use of paragenetic and kinematic methods is recommended.

Keywords: reconstruction of a stress field, fractures, fault zone, joint system, fracture paragenesis, slickenside, slickenlines

Article info. Received 31 July 2018; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Burzunova Yu.P. Use of different fracture analysis methods for tectonic stress fields reconstruction (on example of the Tazheran intrusive massif in Pribaikalie). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 35–49. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-35-49 (In Russian).

Введение

Исследование напряженного состояния земной коры, позволяющее определять механизмы формирования и развития тектонических структур, является одной из основных задач геодинамики и тектонофизики. Широко применяются полевые тектонофизические методы изучения тектонических напряжений, основанные на представлениях о деформации и разрушении горных пород и опирающиеся на данные физических экспериментов, натурных наблюдений и теоретических исследований. Посредством измерений и последующего

анализа геолого-структурных данных решается обратная задача – реконструкция разновозрастных полей напряжений какого-либо участка верхней части земной коры по следам воздействия этих напряжений. Методы определения напряженного состояния в специализированных обзорах [1, 2 и др.] делятся на две группы, предполагающие анализ различных типов исходных данных: структурно-парагенетические, основанные на изучении парагенезисов (определенные совокупности пластических и разрывных структур), и кинематические, использующие признаки смещений по

разрывам или механизмы очагов землетрясений. Каждая группа позволяет получить уникальную информацию – поля напряжений, действовавшие при деформации и разрушении горных пород (парагенетические методы) или способствующие перемещению блоков пород относительно друг друга (кинематические методы). Комплексирование методик из разных групп и обобщение полученных результатов повышает достоверность решений обратной задачи [1, 3–5 и др.] в случае, когда поле напряжений послужило причиной формирования одновременно трещинных парагенезисов и следов смещения. С другой стороны, отличные друг от друга решения разных методов на одном участке исследования могут свидетельствовать о разновременных напряженных состояниях и, таким образом, взаимно дополнять друг друга при реконструкции истории геодинамического развития.

В настоящее время в результате многолетних исследований трещиноватости в разломных зонах методическую завершенность получил метод спецкартирования разломной структуры и полей напряжений, базирующийся на парагенетическом анализе трещинных сетей [6, 7]. Фактическим материалом служат статистические массовые замеры ориентировок тектонических трещин. Парагенетический анализ позволяет определять элементы зоны скалывания и восстанавливать поле напряжений, в котором сформирована изучаемая трещинная сеть. В настоящей работе впервые поставлена задача на примере участка в Прибайкалье применить данную методику совместно с одним из видов кинематического анализа полевых геологоструктурных данных, на локальном уровне сопоставить между собой результаты и провести сравнительную оценку полученных решений. В качестве второго способа обработки данных по трещиноватости применялась методика

кинематического анализа Д. Дельво [8, 9] на основе метода инверсии Ж. Анжелле [10], которая дает возможность проводить реконструкцию палеонапряженного состояния, инициировавшего смещения блоков горных пород, путем анализа векторов тектонических перемещений на зеркалах скольжения.

Полигон для комплексного исследования полей напряжений локального ранга находится в тектонически активной области, неоднократно подвергавшейся активизации, – центральной части Байкальской рифтовой системы (рис. 1, А), в зоне регионального Морского (Ольхонского) разлома. В таких районах происхождение трещин в горных породах преимущественно тектоническое (либо под значительным влиянием тектонических напряжений), что является необходимым условием для применения парагенетического метода. Геологоструктурные наблюдения проведены в районе Тажеранского интрузивного массива [11], ограниченного с юго-востока опущенной и скрытой под водой частью рифтового грабена. В процессе сбора исходного материала следы смещений были обнаружены только в прибрежной, наиболее близкой к сместителю Морского разлома и более нарушенной разрывами юго-восточной части массива, которая в данной работе принята в качестве участка для комплексного исследования полей напряжений (рис. 1, В). На уровне денудационного среза участок сложен палеозойскими породами: сиенитами, нефелиновыми сиенитами, габбро, метаморфизованными вулканическими основными породами, карбонатами, подчиненное значение имеют граниты, пегматиты, сиенито-гнейсы, кварциты [12]. Участок имеет сложное геологическое строение, тем не менее в целом структурно-вещественные неоднородности различных типов не препятствуют применению парагенетического метода [13].

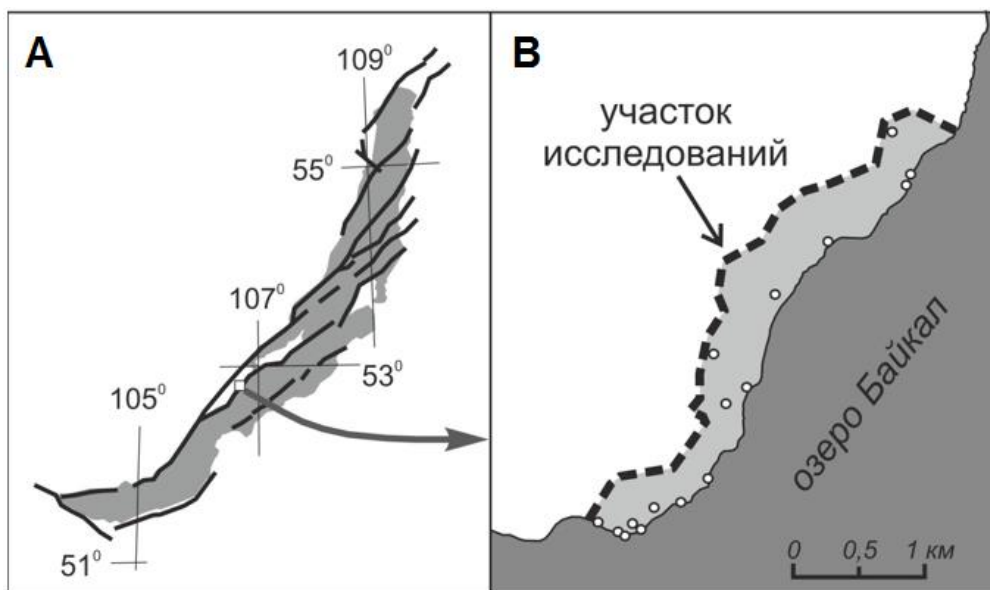


Рис. 1. Участок комплексного исследования трещиноватости:

А – местонахождение участка на карте главных структурообразующих активных разломов Байкальской впадины (по источнику [14] с изменениями);
В – схема расположения пунктов геолого-структурных наблюдений
51°, 53°, 55° – широта; 105°, 107°, 109° – долгота

Fig. 1. Area of complex fracture research:

А – site location on the map of main structure-forming active faults of Baikal depression (according to [14] with changes);
В – location scheme of the points of geological and structural observations
Latitude is 51°, 53°, 55°; longitude is 105°, 107°, 109°

В горных породах наблюдаются системные или хаотические (многосистемные) (по 8–16 систем) разрывные сети, в основном с преобладанием трещин сколового типа, что свидетельствует об их тектоническом генезисе [13].

Для сравнительного анализа результатов реконструкции локальных полей напряжений двумя методами выбрано 16 пунктов наблюдения, в которых зафиксированы следы смещений по плоскостям разрывов – штрихи и борозды скольжения. Количество данных по штрихам в каждом пункте наблюдения составляет от 4 до 43. Кроме того, выполнена стандартная документация структурных особенностей коренных выходов, проведено 22 массовых замера элементов залегания трещин (по 100 шт. в каждом замере).

Методы

Применяемые в работе методические приемы позволяют восстанавли-

вать поля тектонических напряжений, действовавших при разрушении горных пород трещинами и при смещении блоков пород относительно друг друга.

Парагенетический подход к анализу приразломной трещиноватости в рамках метода спецкартирования [6, 7] заключается в сравнении природных сетей трещин с эталонными трещинными сетями. Эталонные сети (эталонные) – это модели трещинных сетей в зонах скалывания разломного типа, составленные для трех основных типов динамических обстановок: сжатия, сдвига и растяжения. Эталон включает главный разломный сместитель первого порядка и семь направлений опережающих мелких разломов второго порядка (R -, t -, n -, T -типа), а также соответствующие каждому из них парагенезисы еще более мелких разрывов в виде троек взаимно перпендикулярных систем опережающих трещин. Исходным материалом для анали-

за служат статистические массовые замеры элементов залегания широко пространственных «немых» трещин в горных породах с указанием их типа (скол или отрыв), представленные в виде круговых диаграмм (стереограмм) в изолиниях плотности стереографических полюсов трещин (сетка Вульфа, верхняя полусфера, окно осреднения 10° , шаг между изолиниями – 1 %) (рис. 2).

Для сравнения и сопоставления с диаграммами природных трещинных сетей каждый эталон представлен в виде кругового трафарета в равноугольной проекции верхней полусферы, на котором значками показаны полюсы плоскостей магистрального сместителя, второстепенных разломов и троек систем трещин. Наиболее подходящий для диаграммы эталон по совокупности совпадающих систем определяет решение: поле напряжений, в котором сформировалась трещинная сеть, а также ориентировку и морфогенетический тип зоны скалывания (разломной зоны) локального ранга и структур второго порядка (см. рис. 2). Данные о задокументированных структурных особенностях коренного выхода служат дополнительным подтверждением тому или иному решению. Для одной диаграммы может быть получено 1–3 и более решений (см. рис. 2, А, В, С). Метод позволяет восстановить напряженное состояние локального объема горных пород для одного коренного выхода и установить его принадлежность к зоне локального разлома.

Кинематический метод реконструкции главных нормальных векторов осей напряжений основан на анализе направлений тектонических сдвиговых перемещений, возникающих под действием единого поля напряжений как по вновь образованным разрывам, так и по существующим более древним различно ориентированным разрывным нарушениям [10, 15, 16]. В основу метода положена зависимость между погружением глав-

ных осей напряжений, направлением смещения по трещине и компонентами тензора напряжений, вызвавших это смещение. В данной работе реконструкция поля напряжений и расчет параметров стресс-тензора проводилась с помощью программы TENSOR, разработанной Д. Дельво [9] на основе метода инверсии Ж. Анжелье [10] с добавлением метода оптимизации вращением Д. Дельво [8]. Исходными данными для анализа являются в первую очередь элементы залегания зеркал скольжения на плоскостях трещин. Вначале с помощью программы определяется предварительный тензор напряжений с использованием процедур PBT (определение средней ориентировки кинематических осей для всех данных по штрихам скольжения) и усовершенствованного метода Right Dihedra (определение по взаимному положению частных квадрантов сжатия и растяжения наиболее подходящего для выборки положения осей с минимальной суммой отклонений частных решений от рассчитанного общего стресс-тензора). Затем результаты уточняются с помощью процедуры оптимизации вращения.

Программа TENSOR позволяет разделять массив трещин на несколько групп и для каждой выборки реконструировать поле тектонического напряжения, в котором была активной данная генерация трещин. Итоговое решение представлено в виде тензора осей главных нормальных напряжений с выборкой геолого-структурных данных (трещин со штрихами скольжения), по которой восстановлено данное поле напряжений (рис. 3). В соответствии с пространственным положением осей и значением коэффициента формы эллипсоида напряжений полученный стресс-тензор относится к одному из режимов деформирования – радиальное растяжение, чистое растяжение, транстенсия, чистый сдвиг, транспрессия, чистое сжатие,

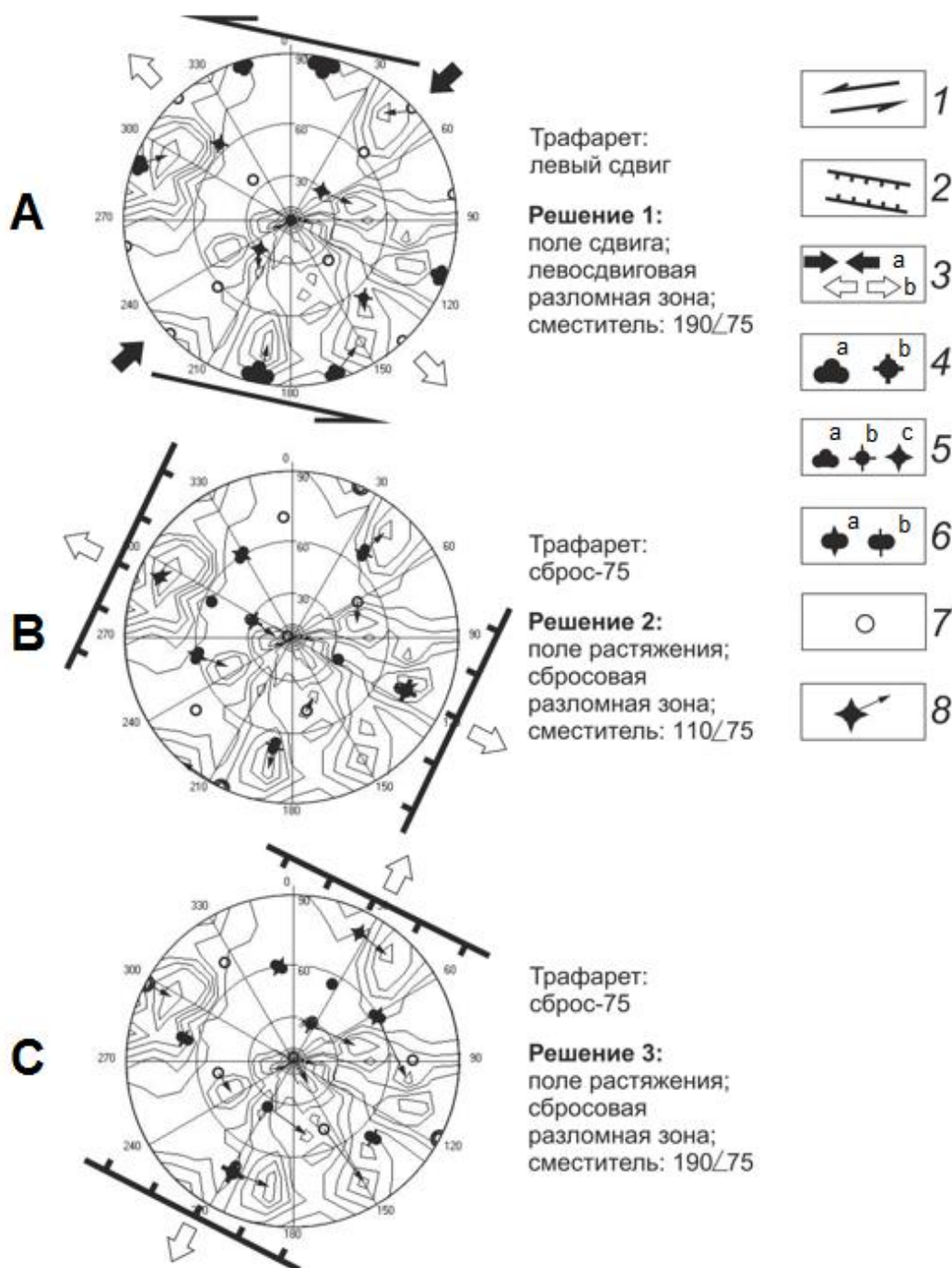


Рис. 2. Реконструкция полей напряжений локального ранга методом парагенетического анализа (на примере трещинной сети в пункте наблюдения b1020, участок Тажеран в Прибайкалье, количество трещин – 100 шт.):

А–С – три итоговых решения о динамических обстановках сдвига и растяжения
1–2 – положение левосдвиговой (1) и сбросовой (2) зоны локального ранга, в которых формировалась часть систем трещин, представленных на стереограмме; 3 – направление действия осей главных нормальных напряжений сжатия (а) и растяжения (b); 4–7 – элементы эталонного трафарета:
4 – полюсы сдвигового (а) и сбросового (b) сместителя первого порядка; 5 – полюсы сдвигового (а), сбросового (b) и взбросового (с) сместителя второго порядка; 6 – полюсы взбросо-сдвигового (а), сдвига-сбросового (b) сместителя второго порядка; 7 – полюс второстепенной или дополнительной системы тройственного парагенезиса трещин; 8 – стрелкой указаны центры максимумов плотности трещин, которые соответствуют разрывам эталонного парагенезиса

Fig. 2. Reconstruction of local stress fields by the method of paragenetic analysis (on example of a fracture system in the observation point b1020, Tazheran site in Pribaikalie, number of fractures – 100 pcs):

A–C – three final solutions of dynamic conditions of the strike-slip and extension
1–2 – position of the sinistral strike-slip (1) and fault (2) local zones where a part of fracture sets represented on the stereogram was formed; 3 – direction of axes of the main normal stresses of compression (a) and extension (b); 4–7 – elements of the standard paragenesis stereogram: 4 – poles of strike-slip (a) and fault (b) 1st order plane; 5 – poles of strike-slip (a), fault (b) and thrust (c) 2nd order planes; 6 – poles of thrust strike-slip (a), faulting strike-slip (b) 2nd order plane, 7 – pole of the secondary or additional set of triple fracture paragenesis; 8 – arrow indicates the centers of joint density maxima that correspond to the fractures in the standard paragenesis

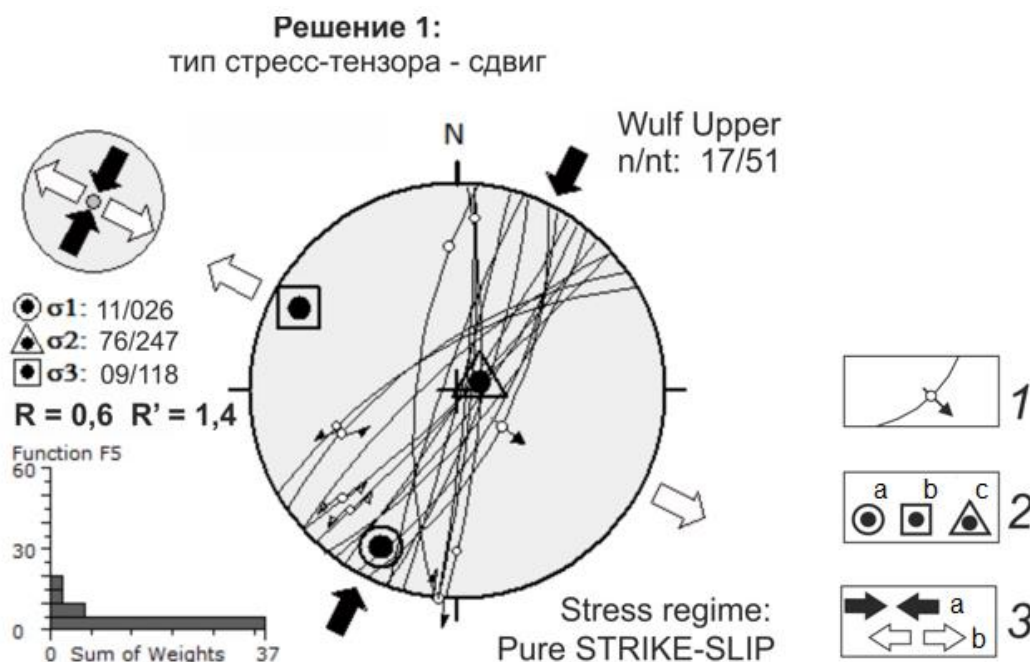


Рис. 3. Реконструкция поля напряжений локального ранга методом кинематического анализа (на примере трещинной сети в пункте наблюдения b1020, участок Тажеран в Прибайкалье, количество штрихов скольжения – 17 шт.) – итоговое решение о динамической обстановке сдвига:

1 – трещина в виде дуги большого круга и направление кинематики штрихов скольжения на ней (стрелкой показано смещение лежачего крыла); 2 – полюсы осей главных нормальных напряжений сжатия (a), промежуточной оси (b) и растяжения (c); 3 – направление действия осей главных нормальных напряжений сжатия (a) и растяжения (b)

Fig. 3. Reconstruction of a local stress field by the method of kinematic analysis (on example of a fracture system in the observation point b1020, Tazheran site in Pribaikalie, number of slickenlines – 17) – final solution of fault dynamic condition:

1 – joint in the form of an arc of a large circle and the direction of slickenline kinematics on it (arrow shows the displacement of the footwall); 2 – poles of axes of the main normal compressive stresses (a), intermediate axis (b) and extension (c); 3 – direction of axes of the main normal stresses of compression (a) and extension (b)

радиальное сжатие, а тип стресс-режима полностью определяется рассчитанным стресс-индексом R' (от 0 до 3) [17].

Результаты

Собранные в пределах участка данные об ориентировках трещин и штрихов скольжения послужили исход-

ным материалом для восстановления полей тектонических напряжений с применением парагенетического и кинематического методов.

По методике в ходе парагенетического анализа 22 трещинных сетей получены решения о напряженном состоянии

локального ранга на уровне обнажения горных пород, в котором произведен статистический массовый замер элементов залегания трещин. Для каждого коренного выхода определено несколько решений (2–4 шт.), что характерно для тектонически активных районов. Это свидетельствует о разновозрастных напряженных состояниях, имевших место в процессе тектонического развития исследуемого участка [7]. Специальные критерии оценки диаграмм [13] определяют уровень достоверности каждого решения и обеспечивают надежность полученных решений: специфический структурный рисунок эталонной диаграммы, количественные и качественные структурные характеристики сети трещин, геолого-структурные данные коренного выхода, повторяемость трещинного парагенезиса в соседних пунктах наблюдения. Всего восстановлено 70 локальных полей напряжений разного морфогенетического типа и различной ориентировки. Кроме того, метод позволяет определить в полученных решениях поля напряжений второго порядка.

В ходе кинематического анализа ряды исходных данных о штрихах скольжения дополнены полевой информацией о зонах тектонитов, зеркалах скольжения без видимой штриховки, смещениях маркеров, трещинах отрыва. Это позволило повысить качество решений, которое определяется количеством и типом исходных материалов и уровнем достоверности кинематического типа. Всего в процессе анализа кинематическим методом получено 26 решений о режиме деформирования и поле напряжений (в среднем 1–2 решения о стресс-тензоре в одном пункте наблюдения), из которых 2 решения имеют смешанный тип поля (угол падения всех трех осей главных нормальных напряжений варьирует в диапазоне от 26° до 47°).

Парагенетический анализ показал, в каких полях напряжений формирова-

лась трещиноватость, а кинематический анализ – при каких условиях происходили смещения по трещинам. В целом оценка типов полученных решений показала, что трещинные сети в горных породах исследуемого участка формировались в полях сжатия, растяжения и сдвига приблизительно в равном количестве случаев (рис. 4, А). В частности, парагенетический анализ дает возможность установить не только погружение осей главных нормальных напряжений, но и ориентировку зоны скалывания, что определяет в сдвиговом поле лево- или правостороннее направление смещения ее крыльев. Выяснилось, что сдвиговые локальные поля напряжений инициировали больше смещений, чем поля сжатия и растяжения (рис. 4, В). Это может свидетельствовать о более интенсивных напряжениях сдвигового типа по сравнению с остальными.

В процессе парагенетического анализа трещиноватости в пунктах наблюдения получено значительно больше решений (70 шт.), чем по итогам кинематического (26 шт.), то есть снятие напряжений большей части восстановленных полей происходило только за счет формирования сети трещин при превышении предела прочности горных пород в условиях всестороннего сжатия, но без значительных смещений породных блоков, необходимых для образования макроскопически определяемых штрихов скольжения. В процессе эволюции разломной зоны это, как правило, характерно для ранней стадии [6, 18], когда вдоль будущего сместителя формируется широкая зона относительно равномерно расположенных в массиве мелких разрывов. Если внешнее поле напряжений на первой стадии ослабевает или перестает действовать, дальнейшее развитие разломной зоны прекращается (зона скрытого разлома). В случае последующего развития разломной зоны происходит объединение мелких



Рис. 4. Типы локальных полей напряжений на участке исследования, восстановленных разными методами
Fig. 4. Types of local stress fields in the study area reconstructed by different methods

разрывов в более крупные, по которым осуществляются более существенные перемещения блоков (поздняя стадия и стадия полного разрушения по источникам [6, 18]). При этом на поверхности разрывов под давлением крыльев образуются зеркала скольжения, штрихи и борозды, которые сконцентрированы обычно в узких зонах крупных дизъюнктивов или в сложно деформированных участках. В случае расположения пункта наблюдения вблизи такой зоны тип напряженного состояния можно восстановить по парагенезису трещин и одновременно по следам смещений. Кроме того, штрихи скольжения могут образоваться в последующем поле напряжений другого типа и ориентировки, когда сформированные ранее трещины используются в качестве путей транспорта материала.

При сравнении результатов разных методов в отдельных пунктах наблюдения (таблица) проводилось сопоставление погружения осей главных нормальных напряжений (сжатия, промежуточная, растяжения) в полученных локальных решениях о поле напряжений, включая поля второго порядка в парагенетических решениях. Выяснилось, что большинство решений кинематического

метода (22 из 26) имеют аналогичное по типу и ориентировке решение (о поле напряжений первого или второго порядка) парагенетического анализа трещинной сети в частных пунктах. На данном локальном уровне исследований предполагается, что идентичные поля напряжений (обозначены как «общие» в таблице), восстановленные разными методами, относятся к одному этапу. При этом угловое расстояние между выходами на верхнюю полусферу одной и той же оси в решениях разных методов составляла, как правило, 5–15° (реже до 40°). Это может быть обусловлено изменчивостью локального поля напряжения в процессе длительного трещинообразования, а также возможными вариациями изменения ориентировок трещин при последующих деформациях и, как следствие, различной точностью восстановления направления главных напряжений.

Вблизи 14 (из 16) пунктов наблюдения (таблица) получены сходные с парагенетическими решениями поля напряжений в результате применения кинематического метода. Например, для пункта наблюдения b1020 имеется кинематическое решение сдвига с СЗ-ЮВ простиранием оси растяжения и СВ-ЮЗ

Локальные поля напряжений, восстановленные разными методами
Local stress fields reconstructed by different methods

Пункты геолого-структурных наблюдений				Восстановленные поля напряжений – количество решений				
Номер	Наименование	Количество МЗ		Парагенетический метод		«Общие» решения для обоих методов	Кинематический метод	
		В пункте	На расстоянии от пункта	Всего	«Новые»		Всего	«Новые»
1	b1020	1	–	3	2	1	–	1
2	b1028	1	–	3	1	2	–	2
3	b1031	1	–	3	1	2	–	2
4	b1041	1	–	4	3	1	–	1
5	b1047	1	–	3	2	1	–	1
6	b1048	4	–	10	9	1	–	1
7	b1056	1	–	4	3	1	–	1
8	b1058	1	–	4	3	1	–	1
9	b1059	1	–	5	3	2	–	2
10	b1062	2	–	5	2	3–4	1	5
11	s1071	1	–	2	2	–	1	1
12	b1097	2	–	7	5	2	–	2
13	b1034	–	1 МЗ в 30 м	4	2	2	–	2
14	b1033	–	1 МЗ в 85 м	4	3	1	–	1
15	s1061	–	1 МЗ в 50 м	3	3	–	2	2
16	s10167	–	2 МЗ в 95 м	6	5	1	–	1
Всего				70	49	21–22	4	26

Примечание. МЗ – массовый замер элементов залегания трещин.

Note. M3 is a statistical mass measurement of fracture attitude.

простираем оси сжатия (см. рис. 3), подобное одному из трех парагенетических решений (см. рис. 2, А, решение 1). В пункте наблюдения b1062 одному и тому же парагенетическому решению (сдвиг) подходят два кинематических решения (сжатие и растяжение) как второстепенные поля напряжений. В четырех пунктах данные по штрихам и массовый замер ориентировок трещин были отобраны на расстоянии в пределах 100 м друг от друга (см. таблицу). Тем не менее в трех случаях кинематические решения совпали с парагенетическими, что объясняется принадлежностью мест отбора данных к одной разломной зоне.

Кроме «общих» решений по результатам применения каждого методического подхода имеются также «новые» решения (см. таблицу) – полученные только по одной методике. Во время действия «новых» полей напряжений, восстановленных в зонах скалывания парагенетическим методом, физико-механические условия по глубине, давлению, напряженному состоянию, скорости и амплитуде перемещения крыльев зоны в каждом изучаемом локальном массиве, по-видимому, не отвечали необходимым условиям для формирования зеркал скольжения. Вероятнее всего, развитие соответствующих разлом-

ных зон прекратилось на ранней стадии. Кроме того, не исключен вариант, когда пункт наблюдения расположен в отдалении от частных и магистральных сместителей зоны в случае их наличия. «Новые» решения кинематического метода о полях напряжений, не связанных с трещинными парагенезисами, обусловлены тем, что смещения происходили по имеющимся разрывам благоприятной ориентировки более древней трещинной сети.

При комплексном применении методов необходимо учитывать особенности проведения полевых работ по сбору и первичной обработке исходного геолого-структурного материала по трещиноватости в соответствии с требованиями рассмотренных методов. Массовые измерения трещин для парагенетического анализа и процедура первоначального сравнения с эталонными разрывными сетями трудоемки и требуют больше времени. С другой стороны, повсеместная распространенность «немых» трещин позволяет строить и детализировать сравнительно равномерную сеть пунктов наблюдений согласно поставленным задачам исследования и в рамках уровня обнаженности пород участка. Для кинематического метода наблюдается обратная ситуация: сбор данных менее трудозатратен, однако имеет место неравномерность пространственного распределения зеркал скольжения. Например, на исследовательском полигоне Тажеран [11] штрихи скольжения в пунктах площадной сети обнаружены только на склоне береговой зоны. Встречаемость следов смещений в обнажениях горных пород зависит преимущественно от близости расположения пункта наблюдения к разломному сместителю, а полевые маршруты при целенаправленном сборе кинематических данных проходят, как правило, вдоль разломов.

Принимая во внимание площадную

неравномерность расположения данных о смещениях в горных породах, а также различные условия формирования трещин и зеркал скольжения, которые возникают в одном и том же либо в разных полях напряжений, рекомендуется совместное применение рассматриваемых методик. Результаты реконструкции полей напряжений парагенетического и кинематического методов дополняют друг друга при исследовании истории тектонического развития района.

Необходимо подчеркнуть, что приведенная сравнительная оценка затрагивает локальный уровень исследования в пределах объемов документированных коренных выходов. С другой стороны, полученные разнотипные парагенетические и (или) кинематические локальные решения о напряженном состоянии могут быть связаны общим региональным полем более низкого порядка. Это обусловлено известными закономерностями разрывообразования [19 и др.], согласно которым внутренняя структура разломных зон земной коры формируется в разнотипных полях напряжений второго порядка, которые сменяют друг друга при переиндексации осей напряжений в одном и том же объеме горных пород. Для анализа генетической соподчиненности различающихся («новых») решений, а также для более достоверной оценки принадлежности одинаковых («общих») решений к одному этапу необходимы исследования на основе большего статистического материала с применением порангового анализа полей напряжений.

Выводы

1. На примере комплексного исследования приразломной трещиноватости одного из участков в Прибайкалье проведена сравнительная оценка результатов применения двух методик по реконструкции полей тектонических напряжений – парагенетического анализа и кинематического метода. Получены

решения о полях напряжений локального ранга разного типа и ориентировки. Исходный фактический материал представляет статистические массовые замеры элементов залегания трещин и ориентировки зеркал скольжения, задокументированные в одних и тех же пунктах наблюдения (16 пунктов).

2. Парагенетический анализ позволил получить в целом больше решений о локальном напряженном состоянии (70 шт.), чем кинематический метод (26 шт.). По-видимому, большая часть реконструированных локальных полей сжатия, сдвига и растяжения действовала на ранних стадиях развития мелких разломных зон разного возраста до формирования фрагментов разломного сместителя и проявилась в образовании трещинных парагенезисов без значительных смещений по трещинам. Что касается случаев подвижек породных блоков, они реализованы на более поздних стадиях развития разломов и в большей степени в сдвиговых полях напряжений.

3. Сравнительная оценка результатов по каждому пункту наблюдений показала, что большинство решений кинематического метода имеет аналогичное по типу и ориентировке решение

среди парагенетических решений о локальном поле напряжений первого или второго порядка, полученных вблизи или в этом же коренном выходе. Идентичные решения двух методов о напряженном состоянии предположительно относятся к одному этапу. Остальные решения относятся к периодам действия полей напряжений, проявленных только в образовании парагенезиса трещин (49 решений) либо в следах перемещений по активизированным более древним разрывам (4 решения).

4. Результаты реконструкции локальных полей напряжений на участке Тажеран, полученные разными методами, дополняют и частично подтверждают друг друга при изучении разновозрастных напряженных состояний, в этой связи рекомендуется совместное применение методов.

Автор выражает искреннюю благодарность кандидату геолого-минералогических наук А.В. Черемных, ведущему инженеру А.А. Тарасовой за помощь в экспедиционных работах.

Исследования проводились при частичной поддержке РФФИ (проект № 16-05-00154А).

Библиографический список

1. Шерман С. И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. 158 с.

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

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

4. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 572 с.

5. Lunina O.V., Gladkov A.S., Novikov I.S., Agatova A.R., Vysotskii E.M., Emanov A.A.. Geometry of the fault zone of the 2003 Ms=7.5 Chuya earthquake and associated stress fields, Gornyy Altai // Tectonophysics. 2008. № 453. P. 276–294.

6. Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика. 2014.

Т. 5. № 2. С. 445–467.
<https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0136>.

7. Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 1. С. 1–43.

8. Delvaux D. The TENSOR program for paleostress reconstruction: examples from the east African and the Baikal rift zones // Terra Nova. 1993. Vol. 5. P. 216.

9. Delvaux D., Sperner B. Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program. In.: New Insights into Structural Interpretation and Modelling / ed. D. Nieuwland // Geological Society London Special Publications. 2003. Vol. 212. P. 75–100.

10. Angelier J. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data // Journal of Structural Geology. 1989. Vol. 11. P. 37–50.

11. Бурзунова Ю.П. Разломные зоны Тажеранского массива сиенитов (Западное Прибайкалье) по результатам структурно-парагенетического анализа трещиноватости // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2015. № 1 (50). С. 58–67.

12. Федоровский В.С., Скляр Е.В., Мазукабзов А.М., Котов А.Б., Лавренчук А.В., Старикова А.Е. Геологическая карта массива Тажеран. Масштаб 1:10000. М: Группа компаний А1 ТИС, 2009.

13. Бурзунова Ю.П. Трещины горных пород вблизи разломов: особенности применения структурно-парагенетического анализа // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 3. С. 673–693.

14. Levi K.G., Miroshnitchenko A.I., San'kov V.A., Babushkin S.M., Larkin G.V., Badardinov A.A., Wong H.K., Colman S., Delvaux D. Active faults of the Baikal depression // Bulletin du Centre de recherches Elf Exploration Production. 1997. № 21 (2). P. 399–434.

15. Гущенко О.И. Анализ ориентировок сколовых тектонических смещений и их тектонофизическая интерпретация при реконструкции палеонапряжений // Доклады Академии наук СССР. 1973. Т. 210. № 2. С. 331–334.

16. Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 7–25.

17. Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnitchenko A., Ruzhich V., San'kov V. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Pt. II: Cenozoic rifting // Tectonophysics. 1997. Vol. 282. P. 1–38.

18. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Гео, 2003. 243 с.

19. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. Vol. 7. № 3/4. P. 437–457.

References

1. Sherman S. I., Dneprovskii Yu.I. *Polya napryazhenii zemnoi kory i geologo-strukturnye metody ikh izucheniya* [Earth crust stress fields and the geological-structural methods of their study]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1989, 158 p. (In Russian).

2. Rebetskii Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. *Ot zerkal skol'zheniya k tektonicheskim napryazheniyam. Metody i algoritmy* [From slickenside to tectonic stresses. Methods and algorithms]. Moscow: GEOS Publ., 2017, 234 p. (In Russian).

3. Rastsvetaev L.M. *Parageneticheskii metod strukturnogo analiza diz'yunktivnykh tektonicheskikh narushenii* [Paragenetic method of structural analysis of disjunctive tectonic disturbances]. *Problemy strukturnoi geologii i fiziki tektonicheskikh protsessov* [Problems of structural geology and physics of tectonic processes]. Part 2. Moscow: Geological Institute of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1987, pp. 173–235. (In Russian).
4. Gintov O.B. *Polevaya tektonofizika i ee primeneniye pri izuchenii deformatsii zemnoi kory Ukrainy* [Field tectonophysics and its application to study Earth's crust deformations in Ukraine]. Kiev: Feniks Publ., 2005, 572 p. (In Russian).
5. Lunina O.V., Gladkov A.S., Novikov I.S., Agatova A.R., Vysotskii E.M., Emanov A.A.. Geometry of the fault zone of the 2003 Ms=7.5 Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai. *Tectonophysics*, 2008, no. 453, pp. 276–294.
6. Seminskii K.Zh. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 1: Basic theoretical concepts and principles. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 2014, vol. 5, no. 2, pp. 445–467. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0136>. (In Russian).
7. Seminskii K.Zh. Specialized mapping of crustal fault zones. Part 2: Main stages and prospects. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 2015, vol. 6, no. 1, pp. 1–43. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170>. (In Russian).
8. Delvaux D. The TENSOR program for paleostress reconstruction: examples from the east African and the Baikal rift zones. *Terra Nova*, 1993, vol. 5, p. 216.
9. Delvaux D., Sperner B. Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program. In: *New Insights into Structural Interpretation and Modelling* / ed. D. Nieuwland. Geological Society London Special Publications, 2003, vol. 212, pp. 75–100.
10. Angelier J. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *Journal of Structural Geology*, 1989, vol. 11, pp. 37–50.
11. Burzunova Yu.P. Tazheran syenite massif fault zones (West Pribaikalie) by the results of structural paragenetic analysis of meso-fracturing. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2015, no. 1 (50), pp. 58–67. (In Russian).
12. Fedorovskii V.S., Sklyarov E.V., Mazukabzov A.M., Kotov A.B., Lavrenchuk A.V., Starikova A.E. *Geologicheskaya karta massiva Tazheran* [Geological map of the Tazheran massif]. Scale 1:10000. Moscow: Gruppa kompanii A1 TIS Publ., 2009. (In Russian).
13. Burzunova Yu.P. Rock fractures near faults: specific features of structural-paragenetic analysis. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics], 2017, vol. 8, no. 3, pp. 673–693. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-3-0312>. (In Russian).
14. Levi K.G., Miroshnitchenko A.I., San'kov V.A., Babushkin S.M., Larkin G.V., Badardinov A.A., Wong H.K., Colman S., Delvaux D. Active faults of the Baikal depression. *Bulletin du Centre de recherches Elf Exploration Production*, 1997, no. 21 (2), pp. 399–434.
15. Gushchenko O.I. Analysis of the orientations of the shear tectonic displacements and their tectonophysical interpretation under paleostress reconstruction. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1973, vol. 210, no. 2, pp. 331–334. (In Russian).
16. Gushchenko O.I. *Metod kinematicheskogo analiza struktur razrusheniya pri*

rekonstruktsii polei tektonicheskikh napryazhenii [Method of kinematic analysis of fracture structures under tectonic stress fields reconstruction]. *Polya napryazhenii i deformatsii v litosfere* [Fields of stresses and deformations in lithosphere]. Moscow: Nauka Publ., 1979, pp. 7–25. (In Russian).

17. Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnitchenko A., Ruzhich V., San'kov V. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal

region, Central Asia. Pt. II: Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 1997, vol. 282, pp. 1–38.

18. Seminskii K.Zh. *Vnutrennyaya struktura kontinental'nykh razlomnykh zon. Tektonofizicheskii aspekt* [Internal structure of continental fault zones. Tectonophysical aspect]. Novosibirsk: Geo Publ., 2003, 243 p. (In Russian).

19. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 1985, vol. 7, no. 3/4, pp. 437–457.

Критерии авторства

Бурзунова Ю.П. написала статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Burzunova Yu.P. has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.243.8:552.578.2.061.33(571.5)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-50-61>

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ИСТОРИКО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

© Л.А. Рапацкая^a

^aИркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. Цель. Анализ нефтегазоносности Сибирской платформы (СП) на основе исследования глобальных историко-генетических и геологических аспектов онтогенеза углеводородов. **Методы.** Интерпретация геодинамических, структурно-тектонических, литолого-фациальных факторов нефтегазоносности Сибирской платформы путем изучения особенностей месторождений углеводородов на ее территории. Анализ следующих наиболее важных глобальных предпосылок нефтегазоносности юга СП: 1) огромных площадей распространения рифейско-вендско-кембрийских отложений на территории СП в обширных рифейских осадочно-породных бассейнах; 2) литолого-фациального состава пород, наличия мощных пластов каменных солей, присутствия многочисленных водорослево-археоциативных биогермов в рифей-венд-кембрийских отложениях как убедительных доказательств благоприятной палеогеографической и палеоклиматической обстановки этих периодов, обусловленных положением Земли в зоне низких широт; 3) длительности рифейского этапа развития СП (более 1 млрд лет), отличающегося формированием разнообразных по кинематике и масштабам типов структурных зон, в том числе многочисленных рифтов; 4) существования на территории СП инкратонных и перикратонных рифтов – наиболее проницаемых структур литосферы, создающих оптимальные условия транзита глубинных флюидных потоков и играющих важнейшую роль в процессах нафтидогенеза; 5) наличия разновозрастных генетических типов природных резервуаров с набором литогеодинамических комплексов, сформированных на разных геотектонических стадиях развития породно-осадочных бассейнов. **Результаты.** На основе обобщения геолого-геофизической информации последних лет проанализированы глобальные геологические и историко-генетические предпосылки нефтегазоносности СП, создающие максимально благоприятные условия онтогенеза углеводородов. **Выводы.** Перечисленные предпосылки подтверждены доказанной и перспективной нефтегазоносностью рифей-венд-кембрийских отложений юга СП, к которым приурочены многочисленные месторождения углеводородов.

Ключевые слова: Сибирская платформа, месторождения углеводородов, нефтегазоносность, породно-осадочные бассейны, рифтовые структуры, перикратонные и инкратонные рифты, палеоочаги генерации углеводородов, природные резервуары, нефтегазоносные и литогеодинамические комплексы.

Информация о статье. Дата поступления 28 июля 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Рапацкая Л.А. Геологические и историко-генетические аспекты нефтегазоносности юга Сибирской платформы // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 50–61. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-50-61

GEOLOGICAL AND HISTORICO-GENETICAL ASPECTS OF SOUTH SIBERIAN PLATFORM OIL AND GAS POTENTIAL

© L.A. Rapatskaya^a

^aIrkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

^aРапацкая Лариса Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем, e-mail: rapalarisa@yandex.ru

Larisa A. Rapatskaya, Candidate of Geology and Mineralogy, Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems, e-mail: rapalarisa@yandex.ru

ABSTRACT. Purpose. The purpose of the work is to analyze the oil and gas content of the Siberian platform based on the study of global historical-genetic and geological aspects of hydrocarbon ontogenesis. **Methods.** The methods used include interpretation of geodynamic, structural-tectonic and lithofacial factors of the oil and gas potential of the Siberian platform through studying the features of hydrocarbon deposits on its territory. The following most important global conditions for oil and gas potential of the south of the Siberian platform are analyzed: 1) huge areas of Riphean-Vendian-Cambrian sediment distribution in the vast Riphean sedimentary basins of the Siberian platform; 2) lithofacial composition of rocks, availability of thick layers of rock salt, presence of numerous archaeocyathid algae bioherms in the Riphean-Vendian-Cambrian deposits as a convincing proof of favorable paleogeographic and paleoclimatic conditions of these periods, which were determined by the position of the earth in the zone of low latitudes; 3) duration of the Riphean stage of Siberian platform development (more than 1 billion years) characterized by the formation of types of structural zones and numerous rifts different in kinematics and scales; 4) presence of intracratonic and pericratonic rifts as the most permeable lithospheric structures on the territory of the Siberian Platform. They create optimal conditions for the transit of deep fluid flows, which are critical for naftidogenesis processes; 5) availability of different age genetic types of natural reservoirs with a set of lithogeodynamic complexes formed at different geotectonic stages of rock-sedimentary basin development. **Results.** Having summarized the geological and geophysical information of the recent years, the author analyzes global geological and historical-genetic backgrounds of the petroleum potential of the Siberian Platform that create the most favorable conditions for hydrocarbon ontogenesis. **Conclusions.** The listed backgrounds are confirmed by the proven and promising oil and gas potential of the Riphean – Vendian – Cambrian sediments of the south of the Siberian Platform, to which numerous hydrocarbon deposits are confined.

Keywords: Siberian platform, hydrocarbon deposits, oil and gas content, rock-sedimentary basins, rift structures, pericratonic and intracratonic rifts, paleo-centers of hydrocarbon generation, natural reservoirs, petroleum and lithogeodynamic complexes

Article info. Received 28 July 2018; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Rapatskaya L.A. Geological and historico-genetical aspects of South Siberian platform oil and gas potential. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 50–61. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-50-61 (In Russian).

Целью данного исследования является определение глобальных закономерностей образования, распространения и местоположения месторождений углеводородов (УВ) на территории Сибирской платформы (СП). Объектами исследования являются месторождения и проявления УВ по латерали: от Енисей-Хатангского палеорифта на севере через Алданский щит, территории Вилуйской, Тунгусской синеклиз до Енисейского кряжа на западе, до Непско-Ботубинской антеклизы и Предпатомского прогиба на востоке и далее до Ангара-Ленской ступени (Иркутского амфитеатра) на юге. По вертикали месторождения встречаются в разрезах стратонов разного ранга: рифея – венда на юго-западе – Байкитский свод (Юрубчено-Тохомское и др.); венда – кембрия на юго-востоке – Непско-Ботубинская антеклиза (Верхне-

чонское, Талаканское и др.); раннего мезозоя на востоке – Вилуйская синеклиза (Средне-Вилуйское, Усть-Вилуйское и др.) и позднего мезозоя на севере – Енисей-Хатангский прогиб (Пеляткинское, Мессояхское и др.).

Для достижения поставленной цели был изучен онтогенез месторождений УВ разного возраста на СП, их принадлежность к типам тектонических структур, литологический состав, условия формирования и сохранения. По площади и масштабам доказанной и перспективной нефтегазоносности на территории юга СП выделяются отложения рифея, венда и кембрия. Это обусловлено целым рядом глобальных факторов.

1. Широкое площадное распространение и большая мощность рифейских отложений подтверждается обширным развитием рифейских осадочно-пород-

ных бассейнов на территории СП (рис. 1).

2. Палеогеографическая и палеоклиматическая обстановка на территории СП сложилась к началу предвендского размытия и определила накопление мощных соленосных толщ, являющихся лучшими флюидоупорами. Палеомагнитными исследованиями В.Э. Павлова установлено, что СП в первые периоды существования почти целиком располага-

лась в зоне низких широт и лишь ее северный (в современных координатах) край был открыт к югу от экватора, то есть в начале своего дрейфа платформа была развернута почти на 180° относительно ее современного положения и сохраняла эту ориентировку (с небольшими вращениями по и против часовой стрелки) вплоть до середины второй половины мезопротерозоя.

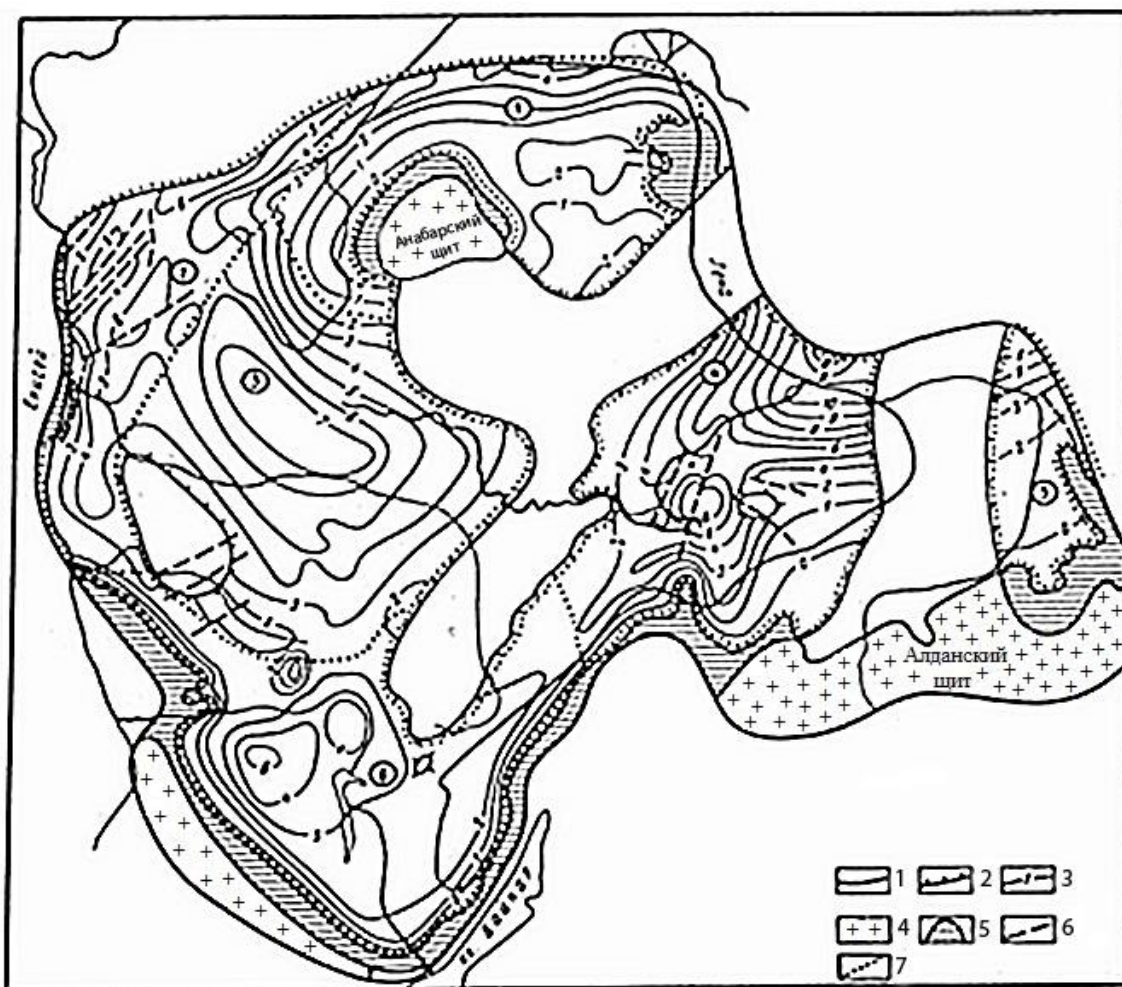


Рис. 1. Схема расположения рифейских осадочно-породных бассейнов Сибирской платформы:
1 – граница Сибирской платформы; 2 – выходы рифейских отложений; 3 – изогипсы кровли рифея, км;
4 – выходы пород фундамента на поверхность; 5 – области отсутствия рифейских отложений;
6 – разрывные нарушения; 7 – осадочно-породные бассейны и их границы (цифры в кружках):

1 – Анабаро-Оленекский, 2 – Приенисейский, 3 – Тунгусский, 4 – Вилюйский,

5 – Юдомско-Майский, 6 – Приангарский

Fig. 1. Location map of the Riphean sedimentary basins of the Siberian platform:

1 – boundary of the Siberian platform; 2 – outcrops of the Riphean deposits; 3 – hypsometric curve of the Riphean top, km; 4 – outcrops of basement rocks; 5 – regions of the lack of the Riphean deposits;

6 – faults; 7 – sedimentary basins and their boundaries (numbers in circles):

1 – Anabar-Olenek, 2 – Yenisei, 3 – Tunguska, 4 – Vilui,

5 – Udomsko-Maisky, 6 – Angara

Модель кривой магнитных полюсов, разработанная В.Э. Павловым, позволила определить широтное положение СП и ее ориентацию относительно меридиана на протяжении почти двух миллиардов лет – от времени ее возникновения, около 1,9 млрд лет назад, до позднего кайнозоя (рис. 2). «Почти все это время платформа находилась в тропических и субэкваториальных широтах, периодически смещаясь то в южное, то в северное полушарие».

Результаты исследований палеомагнетизма СП подтверждаются целым рядом геологических факторов: литологическим составом пород, присутствием

водорослево-археоциатовых биогермов, наличием мощных пластов каменных солей в разрезах рифей-венд-кембрийских отложений.

3. Взаимно обусловленные факторы пространственной, временной и генетической связей между нефтегазоносными и соленосными формациями подтверждаются такими неоспоримыми данными: большая часть мировых ресурсов УВ приурочена к древним соленосным осадочным бассейнам СП, более молодым – Персидского залива и современному бассейну Мексиканского залива, где процессы солеобразования и генерация УВ протекают в настоящее время [1].

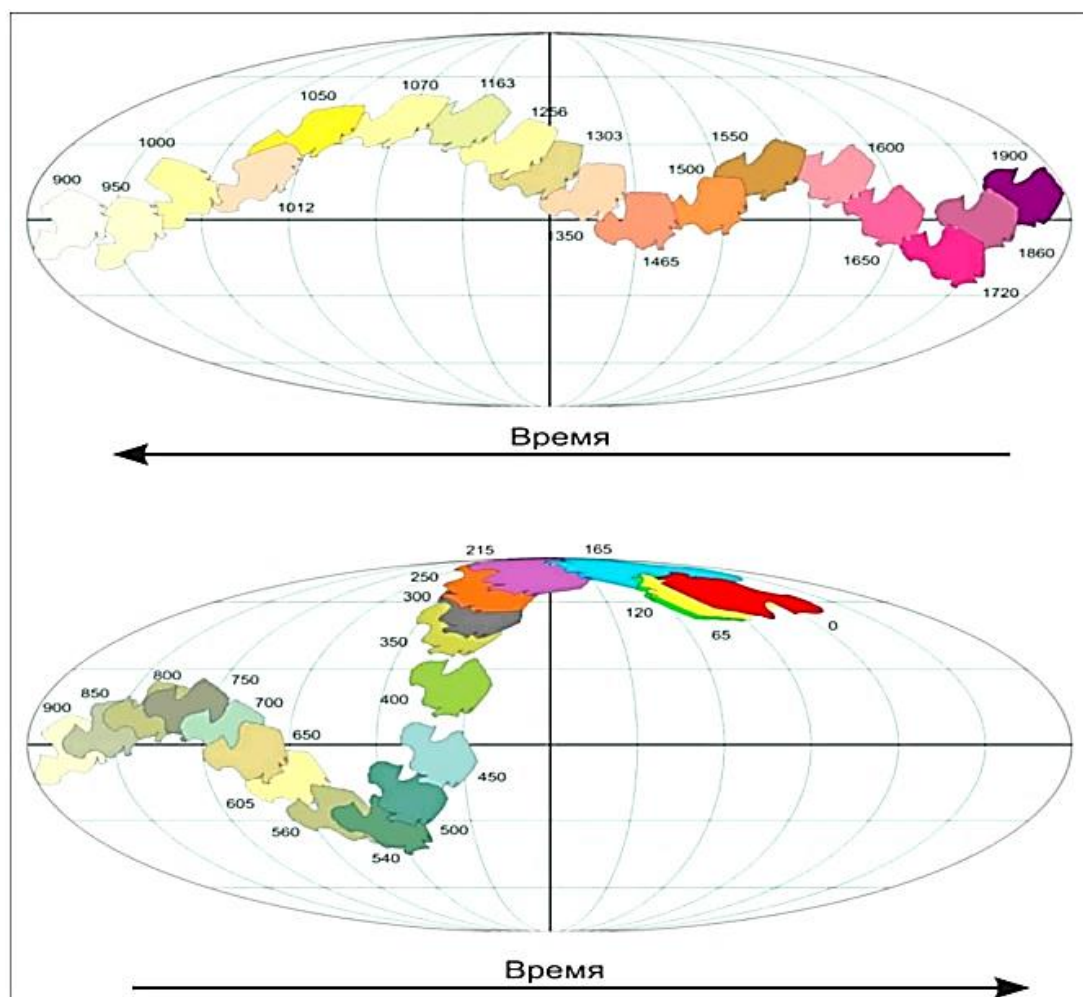


Рис. 2. Дрейф Сибирской платформы в позднем протерозое и фанерозое
Цифры – возраст, млн лет

Fig. 2. Drift of the Siberian platform in late Proterozoic and Phanerozoic
Numbers show the age in millions of years

Такая взаимосвязь не случайна и объясняется цикличностью процессов нефтедогенеза и галогенеза, что, в свою очередь, обусловлено цикличностью тектогенеза. Все взаимно связанные глобальные процессы создают благоприятные условия для формирования и сохранения скоплений УВ при закономерной перемещаемости в разрезах нефтегазоносных и соленосных комплексов.

Эпохи интенсивного нефтегазонакопления, приуроченные к начальным и средним частям циклов Вилсона и Бертра, совпадали по времени с эпохами деструкции литосферных плит и формирования обширных океанических бассейнов [2]. Итогом служил естественный процесс удлинения границ осколков литосферных плит и окружающего бассейна осадконакопления, что сопровождалось увеличением количества осадочного материала и массы органики.

Эпохи интенсивного галогенеза сопровождают заключительные стадии циклов Вилсона и Бертра, поэтому соленосные толщи, как правило, перекрывают в разрезах нефтегазоносные отложения, что создает благоприятные условия для сохранения скоплений УВ.

Анализ современного распределения эвапоритов также указывает на приуроченность СП к низким широтам, причем максимум соленакопления приходится на широты 30–40° в северном и 20–30° в южном полушарии. Примерно такое же распределение эвапоритов наблюдается и в раннем кембрии. Соленосные осадочные бассейны с мощными толщами солей разного возраста – от докембрийского до современного – широко распространены на всех континентах.

По данным Г.А. Беленицкой [1], одним из четырех крупнейших соленосных бассейнов-супергигантов является Восточно-Сибирский венд-кембрийский бассейн на территории СП (также Прикаспийский, Средиземноморский и бассейн Мексиканского залива, каждый из

которых вмещает 1,5–2,5 млн м³ солей).

Самым крупным временным максимумом количественного распределения солей, по данным этого же автора, является V₂–Є₂ [1], что отражено в огромной площади распространения этого бассейна и суммарных толщинах пластов каменной соли усольской свиты нижнего кембрия в центральном и южных районах СП (рис. 3).

При изучении первичной намагниченности пород из классических разрезов верхов докембрия и раннего кембрия в южной части СП, в бассейнах рек Лены и Алдана, В.Э. Павловым [4] было установлено, что в течение раннего кембрия платформа переместилась более чем на 30°. Скорость ее движения составляла примерно 1° за 1 млн лет и палеоэкватор в томмотское время проходил через СП с северо-запада на юго-восток.

Палеотемпературы в осадочных бассейнах достигали 25–56 °С, что, естественно, по мнению И.В. Николаевой, районам современного эвапоритообразования – бассейнам с повышенной соленостью, находящимся в областях с жарким климатом [5]. Подтверждением этих исследований служат отложения раннекембрийских эвапоритов, сложенные мощными толщами доломитов, гипсов и солей, причем солей так много, что они используются в промышленных целях. Крупные месторождения каменной соли расположены в юго-западной части СП на территории Иркутской области (Усольское и Тиретское) и на юге Красноярского края (Троицкое и Канарайское).

Эти данные подтверждаются и анализом распределения водорослево-археоциатовых биогермов в зоне низких широт морских бассейнов раннего кембрия, что отмечено их обильным присутствием в разрезах нефтегазоносных структур Байкитской и Непско-Ботубинской антеклиз.

4. На территории СП распространены рифей-вендский нефтегазоносный

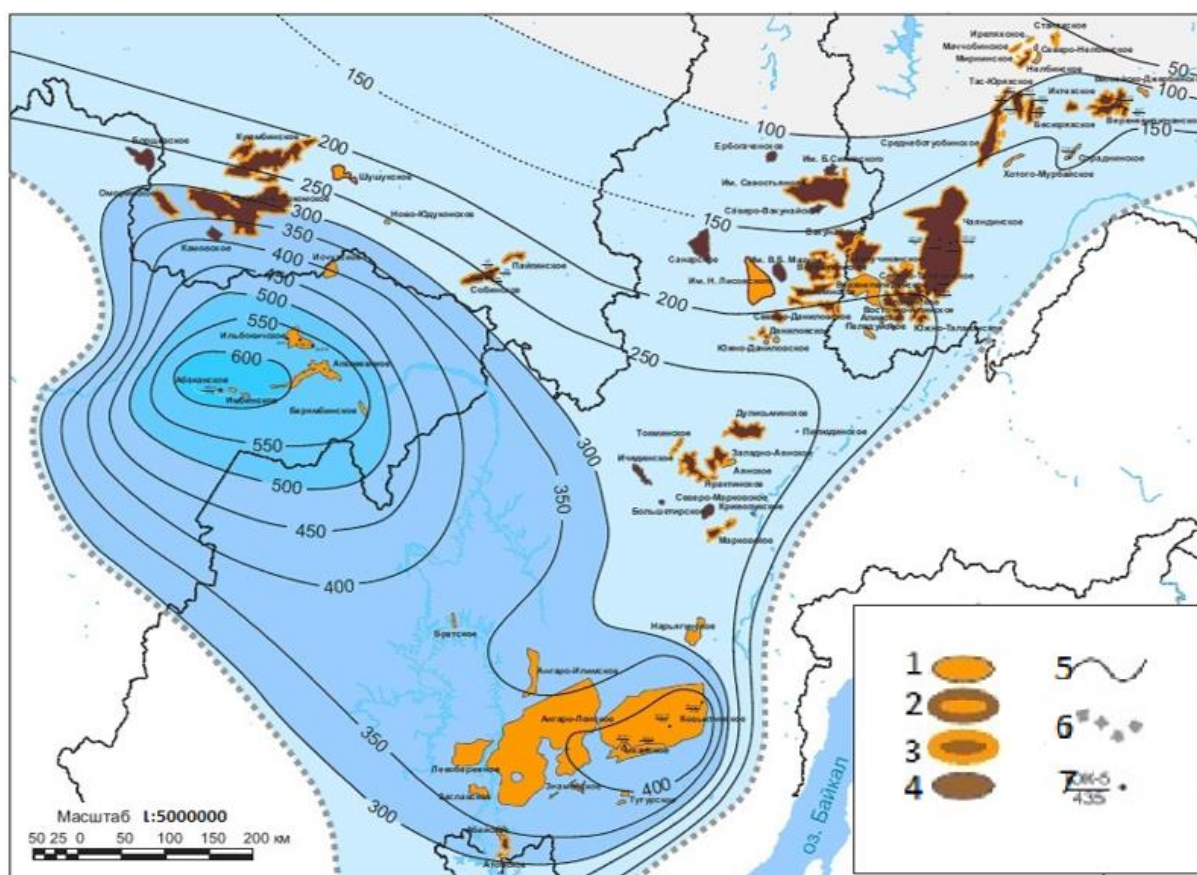


Рис. 3. Схема суммарных толщин пластов каменной соли в разрезе усольской (юрегинской) свиты нижнего кембрия центральных и южных районов Сибирской платформы [3]

Месторождения углеводородов: 1 – газовые и газоконденсатные, 2 – газонефтяные, 3 – нефтегазовые и нефтегазоконденсатные, 4 – нефтяные; 5 – изолиния суммарных толщин солей усольской (юрегинской) свиты, м; 6 – граница распространения соленосной толщи усольской (юрегинской) свиты; 7 – скважина: в числителе – номер скважины, в знаменателе – толщина соли, м

Fig. 3. Diagram of total thicknesses of rock salt layers in the section of the Urengi (Urengi) suite of the Lower Cambrian of the central and southern regions of the Siberian platform [3]

Hydrocarbon deposits: 1 – gas and gas condensate, 2 – gas and oil, 3 – oil and gas and gas condensate, 4 – oil; 5 – isoline of the total thicknesses of salts of the Urengi (Urengi) suite, m; 6 – boundary of the salt-bearing strata of the Urengi (Urengi) suite; 7 – well: the numerator stands for the number of the well, the denominator – for the salt thickness, m

и венд-кембрийский нефтегазоконденсатные комплексы [6]. В стратиграфических разрезах большинства месторождений УВ южной части СП по структурно-литологическим особенностям выделяется три формационных комплекса: подсолевой, соленосный и надсолевой. К подсолевому комплексу карбонатно-терригенных пород рифей-венда – нижнего кембрия приурочены продуктивные горизонты УВ. Породы солевого комплекса – толщи усольской, бельской и ангарской свит кембрия – сложены чередующимися

прослоями каменной соли, доломитов, известняков и ангидритов и служат флюидоупорами. Важно отметить значение соленосных флюидоупоров, особенно в районах широкого развития трапповых интрузий в осадочном чехле СП. Каменные соли «залечивали» трещины, образующиеся при внедрении траппов, что обеспечивало сохранность залежей УВ. Мощность комплекса может достигать 1800 м. Надсолевой комплекс сложен терригенно-карбонатными породами среднего и верхнего кембрия, перекры-

тыми терригенными породами ордовика.

5. Важнейшим глобальным фактором нефтегазоносности СП является приуроченность большинства месторождений УВ к рифтовым структурам. Длительный рифейский этап (более 1 млрд лет) характеризуется формированием разнообразных по кинематике и масштабам типов структурных зон, в том числе многочисленных рифтов. При этом одна ветвь рифтов глубоко внедряется во внутренние области СП – инкратонные рифты, другая, сопряженная с прогибами и трогами, обрамляющими СП, обладает чертами структур океанического типа – перикратонные рифты. В.В. Харахинов отмечает, что рифты как наиболее проницаемые структуры литосферы создают оптимальные условия для транзита глубинных флюидных потоков [7]. Они играют большую роль в процессах нефтегенеза в пороодо-осадочных бассейнах, которые, как правило, формируются над рифтами после завершающей фазы их активного расширения.

На СП развита крупнейшие рифтогенные мегасистемы: Байкало-Енисейская перикратонная и Ангара-Котуйская инкратонная. В последнюю входит сеть рифтов: Котуйский, Туринский, Куюмбинский и Иркиннеево-Ванаварский (Иркиннеево-Чадобецкий) [8]. К Куюмбинскому рифту приурочен гигантский Куюмбинско-Юрубчено-Тохомский ареал нефтегазонакопления – первый в мире регион, где в рифейских толщах открыты месторождения УВ [8].

Иркиннеевско-Чадобецкий авлакоген представляет собой инкратонный рифт рифейского возраста, пересекающий юго-западную часть СП и заполненный карбонатными и терригенно-карбонатными отложениями верхов нижнего (?), среднего и верхнего рифея мощностью до 8–10 км. Основными нефтегазогенерирующими толщами считаются обогащенные органическим веществом глинистые породы аянской свиты рифея.

В 2005–2007 гг. аэрогеофизической съемкой в зоне нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» получены материалы, устанавливающие площадь распространения рифейских отложений в Иркиннеевско-Чадобецком авлакогене и их мощности [9]. По главной магнитоактивной поверхности четко выделяются структуры первого порядка: Непско-Ботуобинская и Байкитская антеклизы, Катангская седловина, Присяно-Енисейская (Ангара-Ленская) синеклиза, Камовский свод, Нюйско-Джербинская впадина. Отчетливо выражены также и некоторые структуры второго порядка: Юрубченский выступ, Иркиннеевский вал, Собинское поднятие и другие (то есть все нефтегазоносные структуры являются надрифтовыми).

6. Структурно-тектоническое положение рифтов, служащих палеоочагами генерации УВ, является еще одной важной глобальной предпосылкой нефтегазоносности СП.

Для прогноза нефтегазоносности осадочных бассейнов П.Н. Соболев [10] использует «историко-генетический подход, предусматривающий анализ всех стадий и условий формирования и сохранности скоплений УВ в тесной связи с историей развития нефтегазоносных бассейнов». Результаты таких исследований позволяют прогнозировать положение палеоочагов генерации УВ.

По окраинам Сибирский кратон окружен перикратонными (краевыми) прогибами: с севера – Енисей-Хатангским, с северо-востока – Предверхожанским, с востока-юго-востока – Предпатомским и с запада – Предъенисейским и Ангара-Котуйским. Все прогибы обладают общностью признаков: значительным прогибанием в течение длительного времени, накоплением мощных толщ осадков с большим количеством органики, интенсивным прогревом в процессе дальнейшего развития. Эти прогибы с позиции теории нефтегазообразования и

служили палеоочагами генерации УВ.

Более трех десятилетий назад А.Н. Золотов [11] назвал главными очагами генерации УВ в Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции Приенисейскую и Прибайкальско-Патомскую зоны перикратонных опусканий (в современной терминологии – «перикратонные рифты») с большой мощностью рифейских и вендских отложений, богатых органикой и обладающих большим нефтегазогенерационным потенциалом. Докембрийские нефти СП, генерированные морским мелководным органическим веществом, являются катагенно зрелыми [12]. По расчетам А.Н. Золотова на них приходится 56 % генерированных и эмигрировавших из древних толщ УВ. Он считал Присяно-Енисейскую и Курейскую синеклизы вторыми по значению очагами онтогенеза УВ, где был генерирован 41 % УВ в верхнепротерозойских и нижнепалеозойских отложениях. Залежи нефти и газа формировались в результате миграции УВ из очагов генерации в местоскопления, которыми служили структуры Байkitской, Непско-Ботубинской антеклиз, Ангара-Ленской ступени и Катангской седловины, являющиеся, как правило, надрифтовыми.

По площадям распространения, объемам нефтегазоносных толщ, интенсивности процессов нефтегазообразования на территории Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции В.И. Соболев [10] выделяет несколько крупных палеоочагов нефтегазообразования, размещение которых в значительной мере определяется положением крупных осадочных палеобассейнов: Предпатомского, Байkitского и Лено-Вилуйского (по А.Э. Конторовичу). Более поздними исследованиями детализируется количество и положение палеоочагов генерации УВ. Так, на севере региона выделяется крупный Чуньско-Котуйский палеоочаг, где мощность рифейских пород достигает 5–7 км. К югу от него расположен

еще Ирkinеево-Ванаварский очаг, переходящий к западу в другой, связанный с мощными черносланцевыми толщами Енисейского кряжа, испытавшими интенсивное катагенетическое преобразование (рис. 4).

В Байkitском палеобассейне накопились мощные рифейские нефтегазоносные комплексы, занимающие площадь складчатых сооружений Енисейского кряжа, около 570 тыс. км², при средней мощности 2,5 км. Интенсивность эмиграции битумоидов здесь достигала 3500 тыс.т/км². Начало активизации этого палеоочага связывают со второй половиной рифейского времени. Такие же процессы нефтегазообразования протекали и в Ирkinеево-Ванаварском палеоочаге, в центральной части которого мощность рифейских отложений достигает 6–15 км [10].

В региональном плане эти палеоочаги окружали центральную часть Байkitской антеклизы – Камовский свод в виде «подковы» с запада, юга и востока. Видимо, поэтому именно здесь находится гигантская Юрубчено-Тохомская зона нефтегазоаккумуляции (месторождения Юрубченское, Куюмбинское, Оморинское и др.).

На юго-восточной окраине Сибирского кратаона существует крупный Предпатомский палеоочаг нефтегазообразования, связанный с Предпатомским перикратонным региональным прогибом (Прибайкальско-Патомская зона перикратонных опусканий), где распространены мощные черносланцевые толщи рифейского возраста и где интенсивность эмиграция битумоидов достигала 3000–5000 тыс.т/км². Ранее многими исследователями отмечалось, что образование месторождений УВ Непско-Ботубинской антеклизы проходило при латеральной миграции УВ – флюидов со стороны Предпатомского палеоочага. Здесь сформировались такие крупные месторождения венд-кембрийского и

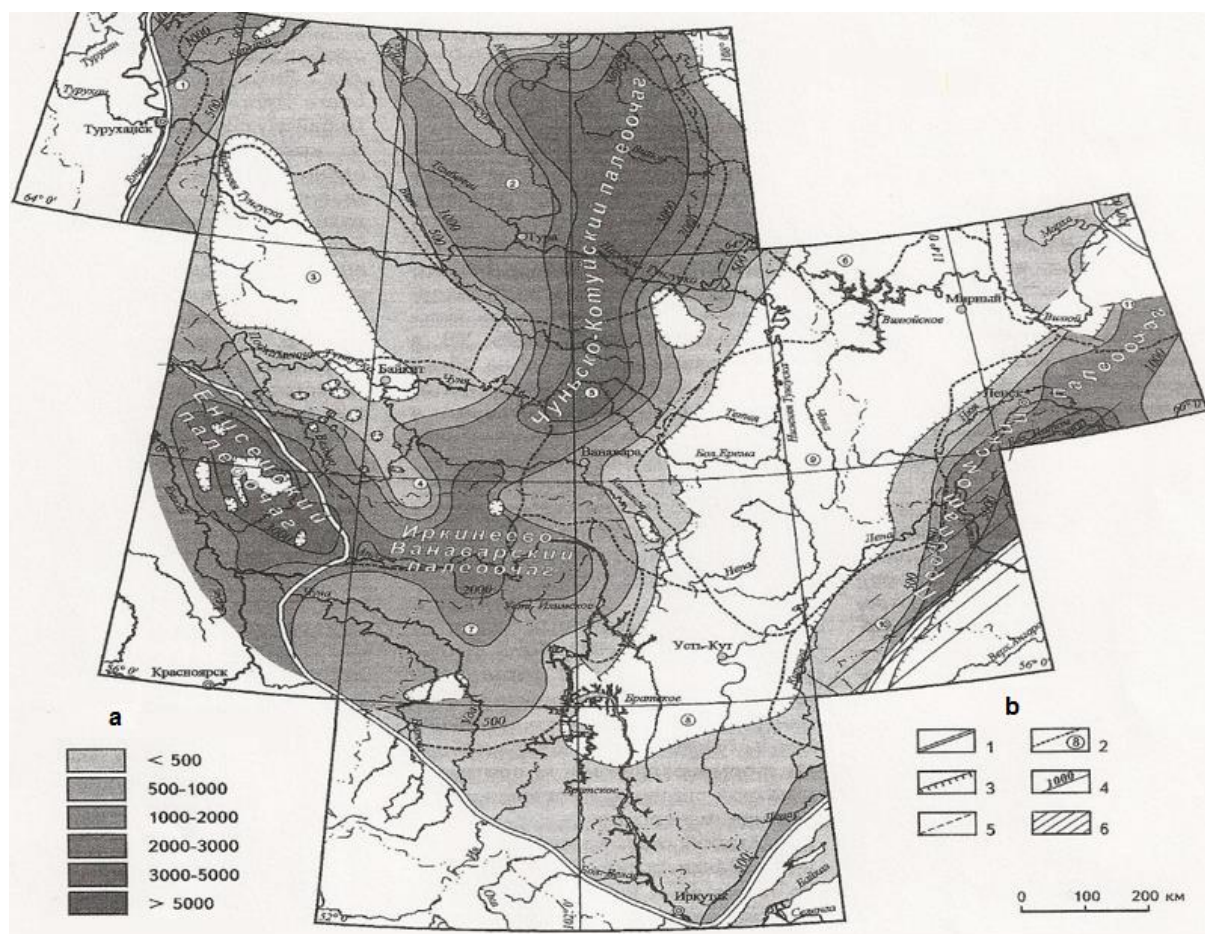


Рис. 4. Схематическая карта интенсивности эмиграции битумоидов в рифейских отложениях Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции [10]

a – интенсивность эмиграции битумоидов; b – границы: 1 – Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции, 2 – нефтегазоносных областей (1 – Туруханско-Норильский нефтегазоносный район, 2 – Северо-Тунгусская, 3 – Южно-Тунгусская, 4 – Байкитская, 5 – Катангская, 6 – Сюгджерская, 7 – Присаяно-Енисейская, 8 – Ангара-Ленская, 9 – Непско-Ботубобинская, 10 – Предпатомская, 11 – Западно-Вилуйская), 3 – современного распространения отложений, 4 – изолиний интенсивности эмиграции битумоидов, тыс./км², 5 – разрывных нарушений, 6 – зон шарьяжных перекрытий

Fig. 4. Contour map of bitumoid migration intensity

in the Riphean deposits of the Lena-Tunguska oil and gas province [10]

a – intensity of bitumoid migration; b – boundaries of: 1 – the Lena-Tunguska oil and gas province, 2 – oil and gas fields (1 – Turukhano-Norilsk oil and gas area, 2 – North-Tunguska, 3 – South-Tunguska, 4 – Baikit, 5 – Katanga, 6 – Sugzherskaya, 7 – Sayan-Yenisei, 8 – Angara-Lena, 9 – Nepa-Botuoba, 10 – Fore-Patoma, 11 – West-Viluy), 3 – modern distribution of sediments, 4 – isolines of bitumoid emigration intensity, thousand/km², 5 – faults, 6 – areas of overthrust-folding overlaps

кембрийского возраста, как Верхнечонское, Талаканское, Чаяндинское и целый ряд других.

7. Немаловажное значение в процессе онтогенеза УВ в рифейских толщах имеет характер генетических типов природных резервуаров, отличающихся определенным набором литогеодинамических комплексов, сформированных на

разных геотектонических стадиях развития осадочного бассейна.

В объеме рифей-венд-кембрийского осадочного бассейна юга СП О.В. Постникова [13] выделяет несколько уровней развития природных резервуаров, «распределение которых по латерали и вертикали, генетический тип, а также особенности строения определя-

ются принадлежностью к тем или иным геодинамическим и палеогеографическим зонам палеобассейнов». В состав литогеодинамических комплексов на юге СП в разрезах позднего докембрия и кембрия выделяется рифейский нефтегазовый мегакомплекс, приуроченный к отложениям синрифтовой и позднерифтовой стадий стабилизации, региональной покрывкой для которого служат соли и сульфатно-карбонатные породы усольской свиты нижнего кембрия. Характерной особенностью мегакомплекса является наличие в его основании мощной толщи древнейших нефтегазоматеринских пород, включающих терригенно-карбонатные отложения, образовавшиеся в условиях раскрытия рифтов.

Общая мощность нефтегазоматеринских отложений может достигать 6 км,

а зона их распространения ограничена палеорифтовыми депрессиями. В объеме рифей-венд-кембрийского осадочного бассейна юга СП выделяется несколько уровней развития природных резервуаров, распределение которых по латерали и вертикали, генетический тип, а также особенности строения определяются принадлежностью к тем или иным геодинамическим и палеогеографическим зонам палеобассейнов [13].

Результаты, полученные в статье, позволяют оценить глобальные геологические и историко-генетические предпосылки, определяющие пространственную и генетическую взаимосвязь и взаимообусловленность нефтегазоносности рифей-венд-кембрийских отложений, широко распространенных на юге СП.

Библиографический список

1. Беленицкая Г.А. Соли и нафтиды: глобальные пространственные и кинетические взаимосвязи // Региональная геология и металлогения. 2014. № 59. С. 97–112.

2. Хаин В.Е. Основные проблемы современной геологии. 2-е изд. М.: Научный мир, 2003. 348 с.

3. Коротков С.Б., Франчук А.А., Семенова Е.В. Галогенные флюидоупоры Ковыктинского кластера газодобычи Иркутской области // Вести газовой геологии. 2017. № 3 (31). С. 298–307.

4. Павлов В.Э., Галле И., Шацилло А.В., Водовозов В.Ю. Палеомагнетизм нижнего кембрия долины нижнего течения р. Лена – новые ограничения на кривую кажущейся миграции полюса Сибирской платформы и аномальное поведение геомагнитного поля в начале фанерозоя // Физика Земли. 2004. № 2. С. 28–49.

5. Николаева И.В. Эволюция обстановок осадко- и рудообразования по данным изучения глауконита // Обстановка

осадконакопления и их эволюция. М.: Наука, 1984. С. 60–67.

6. Рапацкая Л.А., Тонких М.Е., Вахромеев А.Г., Буглов Н.А. Нефтегазовые комплексы: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. 450 с.

7. Харахинов В.В. Древние рифты Восточной Сибири и их нефтегазоносность // Геология нефти и газа 2016. № 4. С. 3–18.

8. Конторович А.А., Конторович А.Э., Кринин В.А., Кузнецов Л.Л., Накаряков В.Д., Сибгатуллин В.Г., Сурков В.С., Трофимук А.А. Юрубчено-Тохомская зона нефтегазонакопления – важный объект концентрации региональных и поисково-разведочных работ в верхнем протерозое Лено-Тунгусской нефтегазональной провинции // Геология и геофизика. 1988. № 11. С. 45–55.

9. Буш В.А. Строение Иркийско-Чадобецкого авлакогена по данным комплексных аэрогеофизических съемок // Современные аэрогеофизические методы и технологии: сб. статей ГНПП

«Аэрогеофизика». 2009. Вып. 1. Т. 1. С. 143–153.

10. Соболев П.Н., Шиганова О.В., Дыхан С.В. Перспективы увеличения нефтегазового потенциала докембрийских отложений Лено-Тунгусской провинции // Геология нефти и газа. 2009. № 9. С. 62–71.

11. Золотов А.Н. Тектоника и нефтегазоносность древних толщ. М.: Недра, 1982. 240 с.

12. Петров А.А., Арефьев О.А. Биомаркеры и геохимия процессов нефтеобразования // Геохимия. 1990. № 5. С. 704–714.

13. Постникова О.В., Фомичева Л.Н., Соловьева Л.В. Палеогеографические и палеогеодинамические условия формирования рифей-вендского осадочного бассейна юга Сибирской платформы в связи с его нефтегазоносностью // Геология нефти и газа. 2008. № 1. С. 8–15.

References

1. Belenitskaya G.A. Solt and naphthides: global spatial and kinetic interrelation. *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and Metallogeny], 2014, no. 59, pp. 97–112. (In Russian).

2. Khain V.E. *Osnovnye problemy sovremennoi geologii* [The main problems of modern geology]. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2003, 348 p. (In Russian).

3. Korotkov S.B., Franchuk A.A., Semenova E.V. Halogen fluid traps at the Kovykta gas production cluster of Irkutsk Region. *Vesti gazovoi geologii* [Gas Geology News], 2017, no. 3 (31), pp. 298–307. (In Russian).

4. Pavlov V.E., Galle I., Shatsillo A.V., Vodovozov V.Yu. Paleomagnetism of the Lower Cambrian of the Lena river lower course valley – new constraints on the curve of the apparent migration of the Siberian platform pole and the anomalous behavior of the geomagnetic field at the beginning of the Phanerozoic. *Fizika Zemli* [Izvestiya, Physics of the Solid Earth], 2004, no. 2, pp. 28–49. (In Russian).

5. Nikolaeva I.V. *Evolutsiya obstanovok osadko- i rudoobrazovaniya po dan-nym izucheniya glaukonita* [Evolution of sediment and ore formation environments according to the glauconite study data]. *Obstanovka osadkonakopleniya i ikh evolyutsiya* [Environment of sedimentation and its evolution]. Moscow: Nauka Publ., 1984, pp.

60–67. (In Russian).

6. Rapatskaya L.A., Tonkikh M.E., Vakhromeev A.G., Buglov N.A. *Neftegazovosnye komplekсы* [Oil-gas complexes]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 450 p. (In Russian).

7. Kharakhinov V.V. Ancient West-Siberian rifts and their oil-gas bearing capacity. *Geologiya nefi i gaza* [Oil and Gas Geology], 2016, no. 4, pp. 3–18. (In Russian).

8. Kontorovich A.A., Kontorovich A.E., Krinin V.A., Kuznetsov L.L., Nakaryakov V.D., Sibgatullin V.G., Surkov V.S., Trofimuk A.A. Yurubcheno-Tohomskaya oil and gas accumulation zone as an important object of regional and prospecting works concentration in the upper Proterozoic of the Lena-Tunguska oil and gas province. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1988, no. 11, pp. 45–55. (In Russian).

9. Bush V.A. Irkineyevo-Chadobetskaya aulacogen structure according to comprehensive airborne geophysical survey data. *Sbornik statei GNPP "Aerogeofizika" "Sovremennye aerogeofizicheskie metody i tekhnologii"* [Collection of articles of the State Research and Production Enterprise "Aerogeofizika". Modern airborne geophysical methods and technologies], 2009, issue 1, vol. 1, pp. 143–153. (In Russian).

10. Sobolev P.N., Shiganova O.V., Dykhan S.V. Prospects of increase in oil and

gas potential of Pre-Cambrian deposits of Lena-Tungus province. *Geologiya nefti i gaza* [Oil and Gas Geology], 2009, no. 9, pp. 62–71. (In Russian).

11. Zolotov A.N. *Tektonika i neftegazonosnost' drevnikh tolshch* [Tectonics and petroleum potential of ancient strata]. Moscow: Nedra Publ., 1982, 240 p. (In Russian).

12. Petrov A.A., Aref'ev O.A. Biomarkers and geochemistry of petroleum

formation processes. *Geokhimiya* [Geochemistry International], 1990, no. 5, pp. 704–714. (In Russian).

13. Postnikova O.V., Fomicheva L.N., Solov'eva L.V. Paleogeographic and paleogeodynamic formation conditions of Riphean-Vendian sedimentary basin in the south of Siberian platform regarding its oil and gas presence. *Geologiya nefti i gaza* [Oil and Gas Geology], 2008, no. 1, pp. 8–15. (In Russian).

Критерии авторства

Рапацкая Л.А. написала статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Rapatskaya L.A. has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.276.6

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-62-77>

ОБОРУДОВАНИЕ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЕ ЦИКЛ БУРЕНИЯ СКВАЖИН ПЕНОЙ НА ОСНОВЕ «КОМПОЗИТА СП»

© В.Г. Заливин^а

^аИркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. Цель. Обосновать компоновку бурового оборудования и схему поверхностной обвязки устья при бурении скважин с очисткой забоя саморазрушающейся пеной по замкнутому циркуляционному циклу. **Методы.** На основании обзора и анализа технологии и технических средств произведена разработка схем обвязки оборудования для бурения скважин пенами. Оборудование применимо для различных глубин скважин, способов получения пены для геологоразведочного бурения. Результаты разработки апробированы при бурении производственных скважин. **Результаты.** Обеспечено оптимальное регулирование расхода воздуха, пенообразователя и получение необходимого давления нагнетания пены. Разработаны специальные компрессорно-дожимные устройства, монтирующиеся на гидравлической части насосов типа 11ГРИ или НБ-4 и исполняющие роль второй ступени компрессора, которые позволяют нейтрализовать отрицательное действие вредного пространства при работе на сжимаемой среде. Приготовление пены в специальных поверхностных пеногенераторах позволяет получить пену высокого качества, более рационально расходовать пенообразующий раствор. Обусловлена возможность регулирования кратности пены при предварительном ее получении путем подбора оптимального соотношения расхода воздуха и пенообразователя или изменения конструктивных параметров пеногенератора. **Выводы.** С использованием предлагаемых технологических схем обвязки оборудования (компрессора низкого давления и бурового насоса со смонтированными на нем аэраторами, камерами сжатия, бустерами, а также компрессорами высокого давления для вспенивания общего потока) для конкретных геолого-технических условий бурения с пеной достигается оптимальный режим безаварийной проходки осложненных горизонтов с регулированием гидростатического давления.

Ключевые слова: пена саморазрушающаяся, замкнутый цикл циркуляции, обвязка оборудования для получения пен, пеногенераторы, бустеры, компрессоры, дозирующие устройства.

Информация о статье. Дата поступления 19 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Заливин В.Г. Оборудование, обеспечивающее цикл бурения скважин пеной на основе «Композита СП» // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 62–77. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-62-77

EQUIPMENT FOR WELL FOAM DRILLING BASED ON “COMPOSITE SP”

© V.G. Zalivin^a

^aIrkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

^аЗаливин Владимир Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела,
e-mail: ZalivinVG@yandex.ru
Vladimir G. Zalivin, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas
Business, e-mail: ZalivinVG@yandex.ru

ABSTRACT. The **purpose** of the paper is to justify the assembly of drilling equipment and the diagram of well-head surface piping when drilling wells with bottom hole cleaning by a self-destructing foam in a closed-loop circulation cycle. **Methods.** The schemes of equipment piping for foam drilling of wells have been developed on the basis of the performed review and analysis of the technology and technical means. The equipment under consideration is applicable for various depth wells, methods of foam production for exploration drilling. The development results have been tested in the drilling of production wells. **Results.** The optimal regulation of airflow, foaming agent consumption and required pressure of foam injection is provided. Special booster compressors, which are mounted on the hydraulic part of the pumps of 11GRI or NB-4 type have been developed. They operate as compressor second stage and allow to neutralize the adverse effect of the hazardous space when working on a compressible environment. Preparation of foam in special surface foam generators allows to produce the high quality foam and ensure more rational use of the foaming mud. Justification is given to the possibility to control foam expansion ratio under its preliminary production by the selection of the optimal ratio of airflow and foaming agent consumption or variation of design parameters of a foam generator. **Conclusions.** The use of the proposed technological schemes of equipment piping (a low pressure compressor and a drilling pump with mounted aerators, compression chambers, boosters, as well as high pressure compressors for general flow foaming) for specific geological and technical conditions of foam drilling allows to achieve an optimal mode of trouble-free penetration of complicated horizons with the controlled hydrostatic pressure.

Keywords: self-destructive foam, closed-loop circulation cycle, piping of foam producing equipment, foam generators, boosters, compressors, metering devices

Article info. Received 19 December 2017; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Zalivin V.G. Equipment for well foam drilling based on "Composite SP". *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 62–77. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-62-77 (In Russian).

Введение

В ходе проведенных ранее исследований [1] разработаны составы саморазрушающихся пен для бурения по замкнутому циркуляционному циклу, методы их получения, режимно-технологические параметры бурения, технология перевода исследованных составов пен в агломерированный и экстрагированный продукт, легко приготавливаемый в стандартных условиях на буровой.

Скважинные условия, особенно при разведочном бурении, часто непредсказуемы и меняются настолько резко, что приходится оперативно корректировать параметры процесса бурения, применяя на протяжении проводки одного ствола разнообразные буровые технологические жидкости.

Применение структурированных пен обеспечивает высокие технико-экономические показатели процесса бурения, снижение его себестоимости и при уменьшении затрат времени на лик-

видацию геологических осложнений способствует сокращению сроков сооружения скважин [2].

Их использование эффективно в самых неблагоприятных для жидкостной промывки условиях [3]: при бурении по многолетнемерзлым породам, в зонах катастрофических потерь циркуляции, при затруднениях с водоснабжением в пустынной, высокогорной и труднопроходимой местности или в районах с суровым климатом.

Бурение скважин на твердые полезные ископаемые рационально осуществлять на пенах или полимерных растворах [4], однако пены более привлекательны благодаря относительно низкой стоимости и доступной технологии их производства.

Очистка забоя скважины пеной при бурении на твердые полезные ископаемые имеет следующие достоинства [5]:

1. Низкие скорости восходящего потока в затрубном пространстве и ста-

билизирующее воздействие пены на водовосприимчивые формации сводит к минимуму возможность осыпания неустойчивых пород и позволяет вести бурение в этих зонах без разрушения стенок скважины и образования каверн. Устраняется выпучивание, размыв стенок скважины и обвалов пород, естественная структура которых нарушается при смачивании водой.

2. Исключается развитие интенсивности поглощения в зоне низкого пластового давления и в зонах поглощения.

3. Увеличивается механическая скорость бурения, срок службы породоразрушающего инструмента при меньшем загрязнении горных пород и продуктивных пластов, обеспечивается значительный рост качественных и технико-экономических показателей.

4. Происходит уменьшение затрат мощности на бурение за счет снижения коэффициента трения колонны бурильных труб о горные породы.

5. Высокая несущая способность пены, в 7–10 раз превышающая несущую способность воды, обеспечивает хорошую очистку забоя скважины и дает возможность провести оценку проходимых пород по шламу.

6. Улучшается сохранность керна, снижается вероятность его самозаклинивания.

7. Исключается возможность растрескивания стенок скважины при бурении без предварительного охлаждения пены ввиду ее низкой теплопроводности.

8. Резко снижается потребление воды.

Для бурения скважин с использованием в качестве очистного агента пены на основе композита применяются серийно выпускаемые и широко используемые буровые станки, оборудование и инструмент геологоразведочного профиля, оснащенные необходимым комплектом контрольно-измерительных

приборов и аппаратуры.

Дополнительно они должны быть укомплектованы:

- источниками получения сжатого воздуха;

- устройствами дозированной подачи пенообразующего состава;

- устройствами генерирования (получения) пены;

- компрессорно-дожимными устройствами (камерами сжатия), устанавливаемыми на буровые насосы при увеличении глубины бурения скважин;

- устьевыми герметизаторами (при высоконапорном выходе пены из скважины);

- обратными клапанами для бурильной колонны и других устройств, устанавливаемых в нагнетательной линии циркуляционной системы;

- дополнительными емкостями (не менее 2 м³) для приготовления пенообразующих составов;

- контрольно-измерительными приборами для контроля расхода и давления потоков воздуха и жидкости, а также определения газожидкостного состава получаемой пены.

Источники получения сжатого воздуха

В качестве источников получения сжатого воздуха в зависимости от требуемого давления, нагнетания и расхода газожидкостной смеси, необходимости применения эжекторных устройств или вытяжных вентиляторов для отвода выходящей из скважины пены и ряда других условий могут быть использованы марки передвижных компрессорных станций или стационарных компрессоров [6], используемых на геологоразведочных работах (табл. 1).

Перечисленные марки компрессоров позволяют бурить скважины с промывкой забоя пеной до глубины не более 80–150 м из-за повышения давления нагнетания.

Таблица 1

Краткая техническая характеристика компрессоров общего назначения,
используемых в геологоразведочных работах

Table 1

Brief technical characteristic of general-purpose compressors
used in geological exploration

Марка компрессорной станции	Производительность		Рабочее давление, кг/см ²	Масса, кг	Тип привода	Мощность привода, кВт
	м ³ /мин	м ³ /с				
Стационарные станции низкого давления для бурения без эжекторного удаления пены						
ЭК-16/1	2,70	0,045	8	1485	электро-двигатель	20
КТ-6	2,75	0,046		646		44
ВУ-3/86	3	0,05	8	1350		28
ВУ-3/8	3	0,05	8	622		28
КСЭ-5	5	0,083	7	560		33
ВУ-6/8	6	0,10	8	1860		40
Передвижные станции низкого давления для бурения с эжекторным удалением пены						
ИФ-51 (ЗИФ-55)	5	0,083	7	1700 (1920)	ЗД(ДВС)	81
ПКС-5М	6	0,10	7	2550	ДВС	73,5
КС-9	9	0,15	8	—		59
ЭК-9М(ДК-9М)	9(10)	0,15(0,17)	7	4000 (5200)	Э/Д(ДВС) ДВС	75
ПК-10	10	0,17	8	5000		79
ПВ-10	10	0,17	8	3200		79
НВ-10	10	0 17	8	2780		132

При бурении скважин глубиной до 1000 м и более могут быть использованы компрессоры высокого давления типа КВД-Г и АВШ-1,5/45 с производительностью 10 и 15 м³/мин и рабочим давлением 60 и 45 кгс/см² соответственно, а также компрессор ВК-25. При отсутствии таких компрессоров или невозможности их применения по другим причинам используют компрессоры низкого давления и дожимные устройства – бустеры, устанавливаемые на буровые насосы.

Дозирующие устройства

Для дозированной подачи пенообразующего состава в устройство для получения пены или прямо в нагнетательную линию рекомендуется использовать специальные дозирочные насосы с регулируемой подачей, характеристика которых приведена в табл. 2.

При отсутствии специальных дозирочных насосов можно использовать буровые плунжерные насосы со ступенчатой подачей типа НБЗ-120/40, НБЗ-63/40 и ИБ1-25/16, в которых для уменьшения подачи до 3–15 л/мин отключают один или два плунжера из трех, однако это резко ухудшает условия эксплуатации насосов и приводит к их преждевременному выходу из строя.

Пеногенерирующие устройства

Способ получения пены непосредственно в нагнетательном шланге и колонне буровых труб за счет турбулизации в них воздушного потока и одновременной подачи пенообразующего состава приводит к образованию неоднородной пены с трудно достигаемым необходимым газожидкостным соотношением и повышению расхода пенообразователя.

Таблица 2

Краткая характеристика дозирующих насосов с регулируемой подачей
Table 2
Brief characteristic of metering pumps with a controlled feed

Марка насоса	Максимальная производительность			Предельное рабочее давление, кг/см ²	Масса, кг
	л/ч	л/мин	м ³ /с		
НД-400/16	400	6,66	$0,111 \cdot 10^{-3}$	16	99
НД-630/10	630	10,5	$0,175 \cdot 10^{-3}$	10	103
НД-1000/10	1000	16,7	$0,277 \cdot 10^{-3}$	10	132
НД-1600/10	1600	26,7	$0,444 \cdot 10^{-3}$	10	221

Анализ существующих способов и устройств для генерации пены показывает, что генерирование пены на буровой осуществляется путем перемешивания водного раствора поверхностно-активных веществ и воздуха за счет турбулизации потока при движении смеси по нагнетательному шлангу и буровой трубе или в пеногенераторах.

Эти недостатки отсутствуют при приготовлении пены в специальных поверхностных пеногенераторах, в которых получается пена высокого качества, более рационально расходуется пенообразующий раствор и появляется возможность регулирования ее кратности при предварительном получении путем подбора оптимального соотношения расхода воздуха и пенообразователя или изменения конструктивных параметров пеногенератора (рис. 1).

Компрессорно-дожимные устройства

Серийно выпускаемые легко транспортабельные компрессорные установки не удовлетворяют условиям бурения геологоразведочных скважин с промывкой пеной на глубину более 500 м в роли второй ступени компрессора.

Одной из главных причин, сдерживающих развитие метода бурения с использованием пены, является недостаток мощного насосно-компрессорного оборудования. Остродефицитными яв-

ляются серийно-выпускающиеся компрессорные установки и КПУ 16/100, КПУ 16/200, а их значительный вес в 26–28 тонн затрудняет использование в условиях геологоразведки. Еще не освоен серийный выпуск компрессорных установок на базе дизель-компрессоров высокого давления ДК-10. Поэтому для геологоразведочного бурения скважин с очисткой забоя пеной используются компрессоры низкого давления и специальные дожимные устройства, смонтированные на базе серийных буровых насосов типа 11ГР и другие, позволяющие нейтрализовать отрицательное действие вредного пространства при работе на сжимаемой среде.

Специальные компрессорно-дожимные устройства) монтируются на гидравлической части насосов типа 11ГРИ или НБ-4 и выполняют роль второй ступени компрессора. Устройство состоит из четырех цилиндров, которые все полностью или частично, в зависимости от требуемого давления нагнетания пены, устанавливаются взамен нагнетательных клапанов насоса. Между собой и с нагнетающим компрессором цилиндры соединяются быстроразборными наружными трубопроводами, а к корпусу насоса крепятся удлиненными шпильками.

Схема установки камеры сжатия приведена на рис. 2.

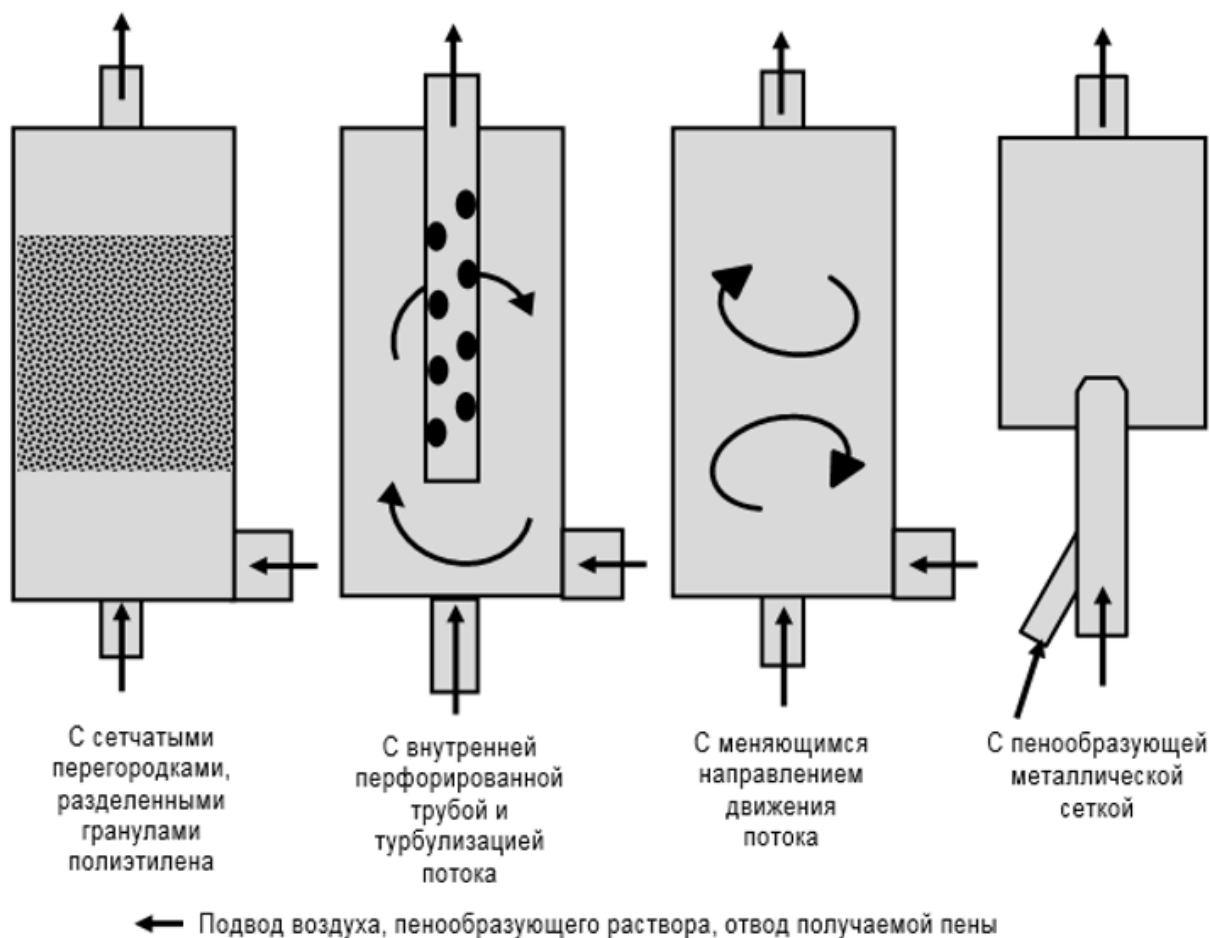


Рис. 1. Схемы пеногенераторов для бурения неглубоких скважин (до 150 м)
Fig. 1. Diagrams of foam generators for drilling shallow wells (up to 150 m)

Камеры сжатия устанавливаются в конусах, предназначенных для седел выпускных клапанов, и увеличивают объем цилиндров насоса.

Принцип работы заключается в следующем: во время такта всасывания клапан 3 закрывается, а через клапаны 2 и 4 поступает сжатый воздух и дозированный объем поверхностно-активных веществ, смешение которых происходит в камере сжатия. При обратном ходе плунжера клапаны 2 и 4 закрываются, а выпускной клапан 3 открывается и порция газожидкостной смеси поступает в нагнетательную линию под давлением, равным сумме сопротивления в циркуляционной системе.

Компоновки низа бурильного инструмента, осевая нагрузка и частота

вращения долота те же, что и при использовании буровых растворов.

Расход пены определяется по формуле

$$Q = 0,078 \cdot V_{\text{cp}} \cdot (D^2 - d_{\text{т}}^2),$$

где Q – расход пены, л/с; V_{cp} – средняя скорость восходящего потока пены, м/с; D – диаметр долота, см; $d_{\text{т}}$ – наружный диаметр бурильных труб, см.

Расходы газообразного ($Q_{\text{в}}$) и жидкого ($Q_{\text{ж}}$) агентов определяются по формулам

$$Q_{\text{ж}} = \frac{\pi}{4} V_{\text{cp}} \frac{(D^2 - d_{\text{т}}^2)(\gamma_{\text{п}} - \gamma_{\text{в}})}{\gamma_{\text{ж}} - \gamma_{\text{в}}},$$

$$Q_{\text{в}} = \frac{\pi}{4} V_{\text{cp}} \frac{(D^2 - d_{\text{т}}^2)(\gamma_{\text{п}} - \gamma_{\text{в}})}{\gamma_{\text{ж}} - \gamma_{\text{в}}},$$

где $\gamma_{\text{ж}}$, $\gamma_{\text{в}}$ и $\gamma_{\text{п}}$ – плотности жидкости, воздуха и пены соответственно, г/см³.

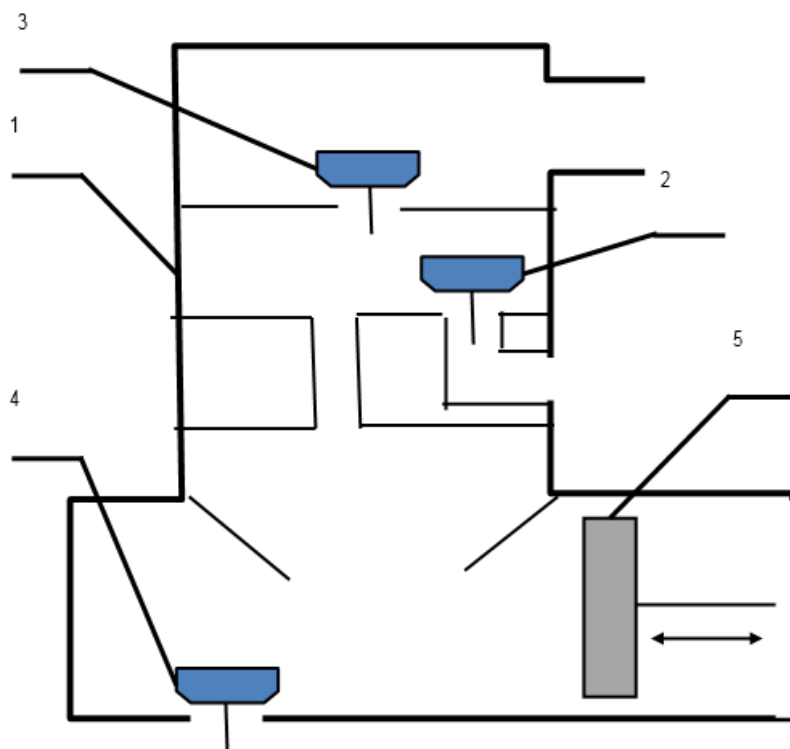


Рис. 2. Схема установки камеры сжатия КС-1:

1 – камера сжатия; 2 – воздушный обратный клапан;
3 – нагнетательный клапан; 4 – всасывающий клапан; 5 – поршень насоса

Fig. 2. Diagram of the KS-1 unit pressure chamber:

1 – pressure chamber; 2 – return air valve;
3 – injection valve; 4 – suction valve; 5 – pump piston

В основном применяют пену средней кратности с соотношением газообразной и жидкой фаз от 100:1 до 300:1 (в ряде случаев применяется пена кратностью ниже 100:1 и выше 300:1 с плотностью, изменяющейся от 32 до 960 кг/м³).

Для хорошего выноса шлама достаточно скорость 0,5–1 м/с (в зависимости от диаметра скважины). При этом улучшается устойчивость ствола скважины.

Как правило, используется в качестве пенообразователя раствор поверхностно-активных веществ 0,2–2 %-й концентрации по активному веществу.

В качестве дозированных насосов для подачи пенообразующего раствора композита в насосно-компрессорную систему могут быть использованы насосы, характеристика которых приведена в табл. 3.

В качестве насосов, подающих пенообразующий раствор, целесообразно применять насосы 1НБ-8 или НБ-73, развивающие давление до 15 кг/см² при производительности 10–25 л/мин.

Технологические схемы поверхностной обвязки

Для бурения геологоразведочных скважин с очисткой забоя пенами разработано достаточное число различных схем нагнетания и обвязки применяемого оборудования и устройств, которые зависят от многих конкретных факторов и условий бурения, в частности:

- способа, диаметра и глубины бурения;
- технических возможностей имеющихся буровых и дозирочных насосов и компрессорных установок;
- концентрации пенообразователя в пенообразующем растворе.

Таблица 3

Характеристика насосов для подачи пенообразующего раствора
при использовании компрессорно-дожимных устройств

Table 3

Characteristics of pumps for foaming solution supply
when using compressor-booster devices

Марка насоса	Производительность (мин.–макс.)		Максимальное давление, кгс/см ²	Мощность привода, кВт	Масса, кг
	л/мин	м ³ /с			
Гр 16/40	30–240	0,0005–0,004	40	22	550
11 ГР	222–300	0,0037–0,005	63	25	1150
НБ-1-25/16	60	0,001	16	1,5	44
НБ-4-320/63	96–240	0,0016–0,004	63	22	1250
НБ-63/40	30–60	0,005–0,001	40	3	145

Для бурения неглубоких (до 150 м) скважин и забуливания наносов сплошным забоем и твердосплавными коронками диаметром 93 и 76 мм целесооб-

разно использовать схему прямого нагнетания пены в скважину (рис. 3) [7]. При этом возможны два варианта.

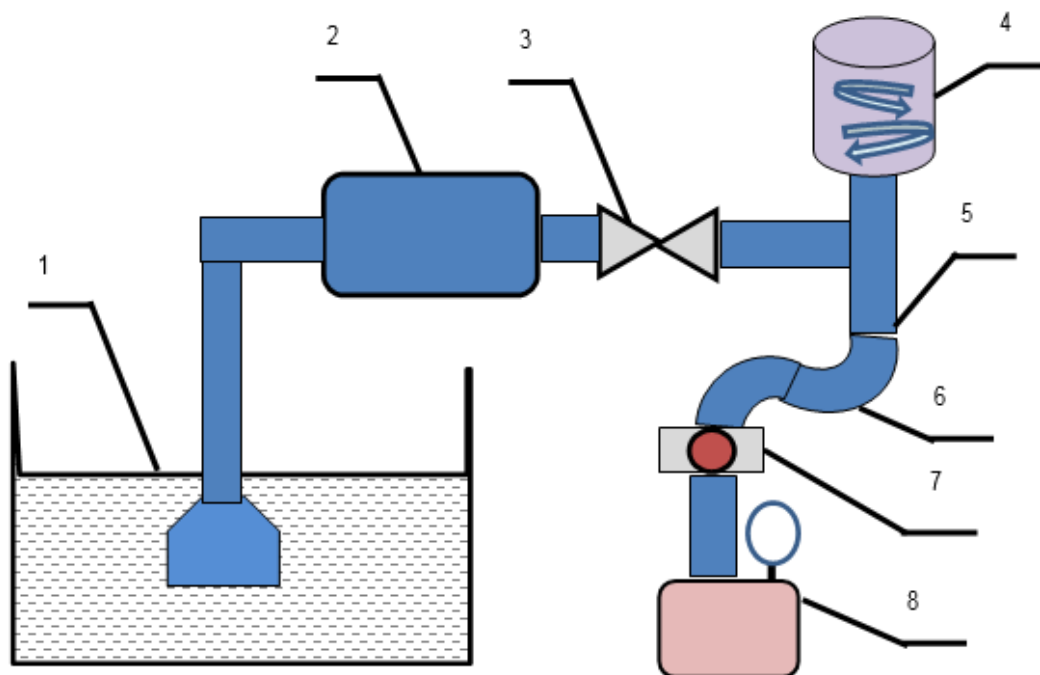


Рис. 3. Схема прямого нагнетания газожидкостной смеси:

- 1 – емкость с раствором поверхностно-активных веществ; 2 – насос дозировочный;
3 – предохранительный клапан; 4 – смеситель; 5 – штуцер для ввода воздуха;
6 – шланг подвода воздуха; 7 – обратный клапан; 8 – компрессор

Fig. 3. Diagram of gas-liquid mixture direct injection

- 1 – tank with the solution of surface active agents; 2 – metering pump;
3 – safety valve; 4 – mixer; 5 – air injection choke;
6 – air supply hose; 7 – back-pressure valve; 8 – compressor

Первый вариант: отсутствие насоса для дозированного нагнетания пенообразующего состава и невозможность применения для этого бурового насоса. В этом случае необходимо применение одного или двух герметично закрывающихся дозаторов емкостью по 0,5–1 м³, которые должны быть опрессованы на давление до 15–20 кг/см², и компрессора низкого давления. В качестве таких дозаторов могут быть использованы ресиверы от передвижных компрессорных станций. Схема поверхностной обвязки

оборудования и устья скважины при этом представлена на рис. 4.

Также используется прямое нагнетание газожидкостной смеси с использованием компрессоров низкого давления, например СО-7А или «Мидко» (производство Индия) с максимальным рабочим давлением до 10 атм. и производительностью 1 м³/мин (см. рис. 3). Все оборудование размещается на стандартном двухосном прицепе с пневмоколесным ходом, выпускаемым отечественной промышленностью.

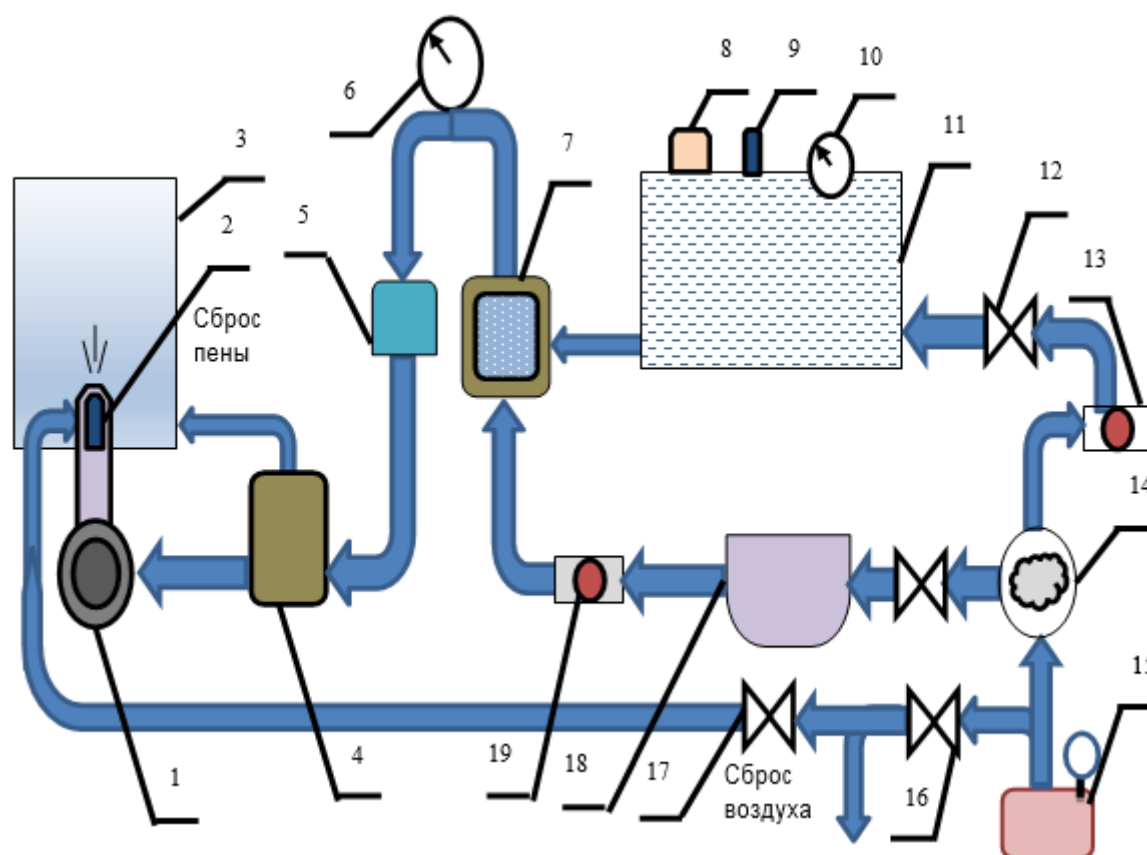


Рис. 4. Схема поверхностной обвязки устья при бурении неглубоких скважин (до 150 м) с очисткой забоя пеной на основе «Композита СП»:

1 – устье скважины; 2 – эжекторное устройство; 3 – зумпф; 4 – трехходовой кран; 5 – измеритель газожидкостного соотношения пены; 6, 10 – манометры; 7 – пеногенератор; 8 – заливная горловина; 9 – предохранительный клапан; 11 – герметически закрывающаяся емкость для композита 0,5–1 м³ (дозатор); 12, 16, 17 – вентили; 13, 19 – обратные клапаны; 14 – расходомер воздуха; 15 – компрессор; 18 – диафрагма

Fig. 4. Diagram of surface wellhead piping when drilling shallow wells (up to 150 m) with bottom hole cleaning by “Composite SP”-based foam:

1 – wellhead; 2 – ejector; 3 – dib hole; 4 – T-valve; 5 – foam gas-fluid ratio meter; 6, 10 – manometers; 7 – foam generator; 8 – filler; 9 – safety valve; 11 – hermetically closed container for the composite 0.5–1 m³ (metering unit); 12, 16, 17 – gate valves; 13, 19 – back-pressure valves; 14 – air flow meter; 15 – compressor; 18 – diaphragm

На прицеп устанавливаются и крепятся компрессор низкого давления, буровой насос НБЗ-120/40 для подачи раствора поверхностно-активных веществ и смеситель (аэратор) для более тщательного смешивания сжатого воздуха с раствором поверхностно-активных веществ.

Установка работает следующим образом. Насос из бурового агрегата прокачивает раствор пенообразователя во всасывающий коллектор насоса пеногенераторной установки. Компрессор из ресивера подает воздух в дожимные камеры, где он перемешивается с раствором пенообразователя и подается в нагнетательную линию. Необходимое давление воздуха можно отрегулировать специальным винтом, находящимся в пусковой коробке компрессора. Компрессор, автоматически включаясь и выключаясь, поддерживает необходимое давление в ресивере. Дозирующему насосу (находящемуся в буровой) обычно включают первую скорость, (можно отсоединить один плунжер для уменьшения подачи воды), а дожимному насосу – третью или четвертую скорость.

Для предотвращения попадания раствора поверхностно-активных веществ в ресивер предусмотрен обратный клапан.

Для предотвращения обратной циркуляции пены при наращивании колонны или ее подъеме в снаряде устанавливают обратные клапаны: один внизу, другой вверху. При подъеме инструмента на клапан надевают специальный переходник и сбрасывают давление пены в отводной шланг. После этого продолжают подъем.

Установка размещается около бурового агрегата так, чтобы были удобные подходы, нагнетательный шланг от вертлюг-сальника свободно доставал до дожимного насоса, а манометр и все оборудование установки были видны бурильщику.

Пенообразующий раствор готовится в емкости (зумпфе). В процессе бурения пена от устья скважины стекает в зумпф, где гасится и освобождается от шлама.

Перед началом бурения включается дозировочный насос, при этом по открытому контрольному крану необходимо убедиться, что насос дает требуемое количество жидкости. Затем перекрывается контрольный кран и включается дожимной насос и компрессор. Кран на ресивере сразу открывать полностью не следует, так как, если в нем есть избыточное давление, воздух может подбросить нагнетательные клапаны и они не попадут в свои гнезда. Когда давление нагнетания поднимется до 5–6 атм., кран можно открыть полностью.

При остановке необходимо сначала выключить дозировочный, потом дожимной насосы и компрессор. Затем открыть сбросной (контрольный) кран.

В процессе бурения необходимо внимательно следить за амперметром (или на слух контролировать затраты мощности на вращение снаряда) и манометром. При повышении затрат мощности на вращение или давления нагнетания, указывающем на прекращение циркуляции в коронке, необходимо сделать расходку.

Получение пены производится следующим образом (рис. 5). Один из всасывающих клапанов бурового насоса глушится, через клапанную крышку в это место подводится сжатый воздух. Перед клапанной крышкой ставится обратный клапан для предотвращения попадания раствора пенообразователя в воздушную магистраль и компрессор.

При работе насоса во всасывающей камере гидравлического блока насоса происходит смешивание сжатого воздуха и раствора поверхностно-активных веществ. Образовавшаяся газожидкостная смесь через нагнетательные клапаны гидравлического блока

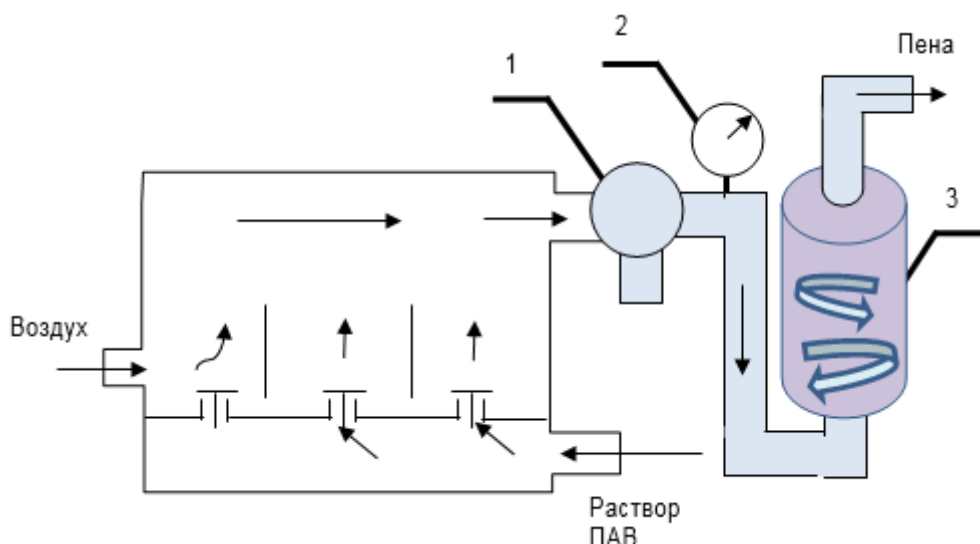


Рис. 5. Схема нагнетания газожидкостной смеси с подачей воздуха в рабочую камеру насоса:

1 – трехходовой кран; 2 – манометр; 3 – смеситель

Fig. 5. Diagram of liquid-gas mixture injection with air feed in the pump work chamber:

1 – T-valve; 2 – manometer; 3 – mixer

поступает под давлением в смеситель, где еще дополнительно перемешивается в манифольде, откуда через снаряд подается на забой для очистки и выноса шлама на поверхность. При выходе пены из скважины она поступает в зумпф-емкость.

Второй вариант: имеется дозировочный насос необходимой марки, компрессор и другое требуемое оборудование. В этом случае берется любая емкость (не менее 2 м³) для приготовления пенообразующего состава, из которой он дозировочным насосом подается в поверхностное пеногенерирующее устройство, устанавливаемое вертикально. Снизу к нему в осевом направлении подводится воздух, расход которого регулируется вентилем по показателям расходомера. Диафрагма в данном случае в нагнетательную воздушную линию не устанавливается. Получаемая пена определенного газожидкостного отношения поступает в скважину, ее расход регулируется трехходовым краном, а также подачей дозировочных насосов и компрессора. Давление нагнетания фиксируется манометром [8].

В обоих случаях в трубе, отводящей выходящую из скважины пену, желательно дополнительно монтировать эжектирующее устройство для возможно быстрого ее разрушения.

Для бурения интервалов от 150 до 500 м в зависимости от способа и диаметра бурения возможно использование компрессоров высокого давления и малой производительности (ВК-25, КВД-Г или АВШ-1,5/45) по схеме прямого нагнетания пены.

Преимущества этой схемы:

- нет необходимости установки дожимных камер;
- свободная регулировка подачи жидкости;
- в любой момент можно отключить гидравлическую или пневматическую линию;
- компрессоры КВД-Г небольшие по габаритам, имеют производительность 10 м³/ч и потребляемую мощность 4 кВт, что достаточно для бурения скважин малого диаметра с отбором керна (охлаждение компрессоров водяное, принудительное).

Всю пневматическую линию можно также разместить на двухосном прицепе с пневматическими колесами, что дает возможность быстрой доставки установки к месту ведения работ. На установке монтируются также пульт управления, аварийное отключение, заземление. Для летнего варианта достаточно крыши, для зимнего нужно утепленное помещение с калорифером. Для начала работы достаточно подключить электропитание, подсоединить нагнетательный шланг к аэратору и от аэратора к буровому насосу.

Однако дефицит компрессоров высокого давления и их отсутствие в нужный момент не позволяют широко использовать этот способ получения пен и их нагнетания при бурении скважин.

Таким образом, наиболее распространенным способом приготовления и нагнетания пен при бурении геологоразведочных скважин глубиной до 1000 м и более является использование компрессоров низкого давления в компоновке с буровыми насосами [9], оснащенными дожимными устройствами, которые обеспечивают необходимое давление прокачивания (до 30 кг/см² при $H_{скв.} = 1000$ м) газожидкостных систем с удельным весом до 500 кг/м³.

Возможная схема обвязки оборудования и вспомогательных устройств при таком способе приведена на рис. 6, 7.

При этом в компоновку оборудования должны входить:

- компрессор низкого давления ПК-10 или ДК-9М, СО-7А;
- дозировочный насос МБЗ-120/40 или НД-400/16;
- дожимное устройство УКД-Н-4 (для буровых насосов МБ-4-320/63 и НБ-5-320/100) или УПБ (для насосов 11ГР, 11ГРИ, НГР- 250/50);
- обратные клапаны;
- приспособление для безопасного сбрасывания давления из колонны бу-

рильных труб при их подъеме;

- компенсатор давления дозировочного насоса (для равномерной подачи пенообразующего состава во все камеры дожимного устройства).

При бурении пенами с использованием дожимных устройств обязательна следующая последовательность выполнения операций:

- включается дозировочный насос, и камеры сжатия заполняются пенообразующим составом 0,25–1 %-го водного раствора композита;

- контроль заполнения системы осуществляется путем частичного отвинчивания контрольных пробок, установленных на камерах сжатия ниже нагнетательных клапанов

- одновременно включаются буровой насос и подача сжатого воздуха от компрессора;

- после окончания прокачивания пены выключаются все агрегаты, а на компрессоре закрывается рабочий кран на нагнетательной линии (для предотвращения попадания в него пены).

Необходимое давление нагнетания на компрессоре регулируется сбрасыванием части сжатого воздуха через кран в атмосферу или при наличии установкой в нагнетательную линию стеклянных ротаметров РМ-25 или РМ-40, работающих при давлении воздуха в системе до 0,6 МПа.

Оптимальное регулирование расхода воздуха и пенообразователя достигается следующим образом:

- при подаче воздуха во все смонтированные на насосе камеры сжатия дожимного устройства перерабатывается максимальное количество воздуха, а расход пенообразователя регулируется дозировочным насосом;

- при отключении подачи воздуха в одну из камер устройства через нагнетательную полость (клапан) насоса, с которой эта камера связана, в скважину

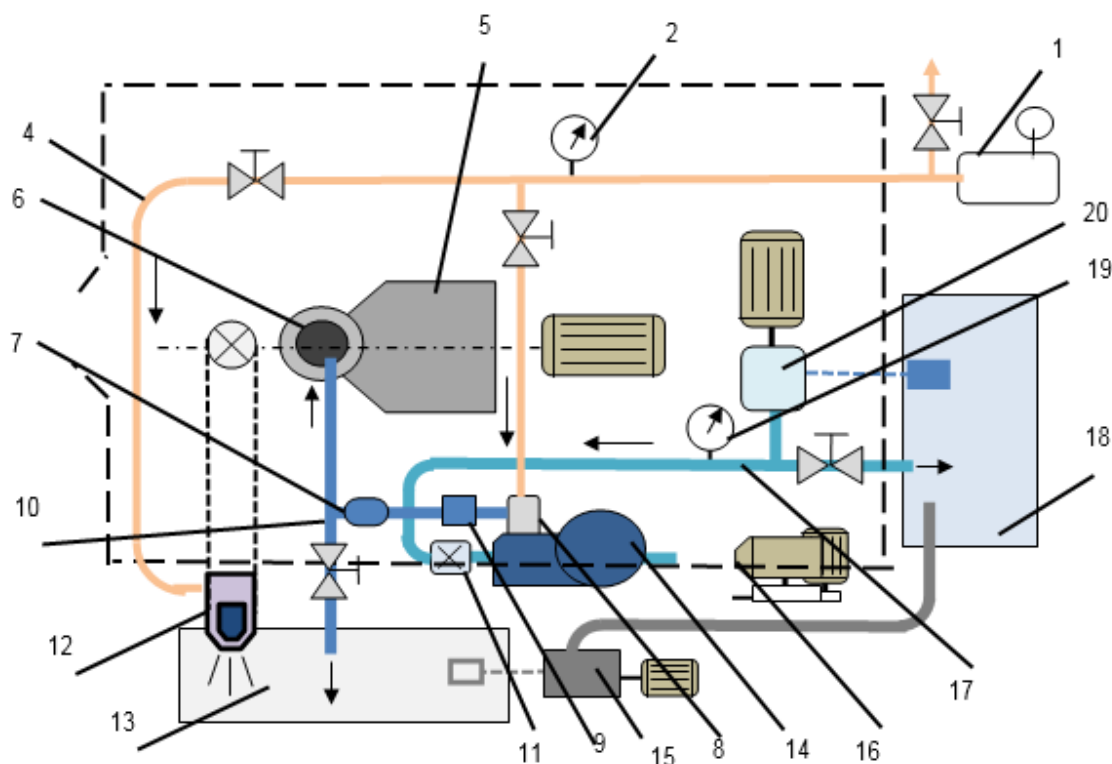


Рис. 6. Схема обвязки оборудования при бурении скважин (до 1000 м) с применением пен на основе композита:

1 – компрессор; 2, 7, 19 – манометры; 3, 4 – воздухопроводы; 5 – буровой станок; 6 – устье скважины; 8 – дожимное устройство; 9 – измеритель газожидкостного отношения пены; 10, 17 – трубопроводы; 11 – расходомер поверхностно-активных веществ; 12 – эжекторное устройство; 13, 18 – емкости для сбора пены и поверхностно-активных веществ; 14 – буровой насос; 15 – насос для перекачки поверхностно-активных веществ; 16 – дожимной насос; 20 – дозировочный насос

Fig. 6. Diagram of equipment piping when drilling wells (up to 1000 m) using composite foams:

1 – compressor; 2, 7, 19 – manometers; 3, 4 – flues; 5 – oil-rig; 6 – wellhead; 8 – booster device; 9 – liquid-gas and foam ratio meter; 10, 17 – flues; 11 – surfactant meter; 12 – ejector device; 13, 18 – tanks for foam and surfactant collection; 14 – mud pump; 15 – surfactant pump; 16 – booster pressure pump; 20 – controlled-volume pump

будет нагнетаться раствор пенообразователя, увеличивая общий его расход.

Таким образом, отключая и включая подачу воздуха в камеры сжатия дожимного устройства, можно в широких пределах регулировать подачу жидкой фазы и воздуха, добиваясь требуемого газожидкостного соотношения получаемой пены.

Возможными причинами отказов в работе дожимного устройства может быть:

– прекращение (снижение) нагнетания раствора дозированным насосом;

– нарушение герметичности клапанов.

Внешним признаком снижения подачи дожимного устройства служит значительное повышение давления на входе в воздушном или жидкостном коллекторе по сравнению с первоначальным, а также уменьшение пульсации шланга, соединенного с нагнетательным коллектором.

При длительной остановке и окончании работы с солевыми растворами дожимное устройство необходимо промыть водой, которую следует слить.

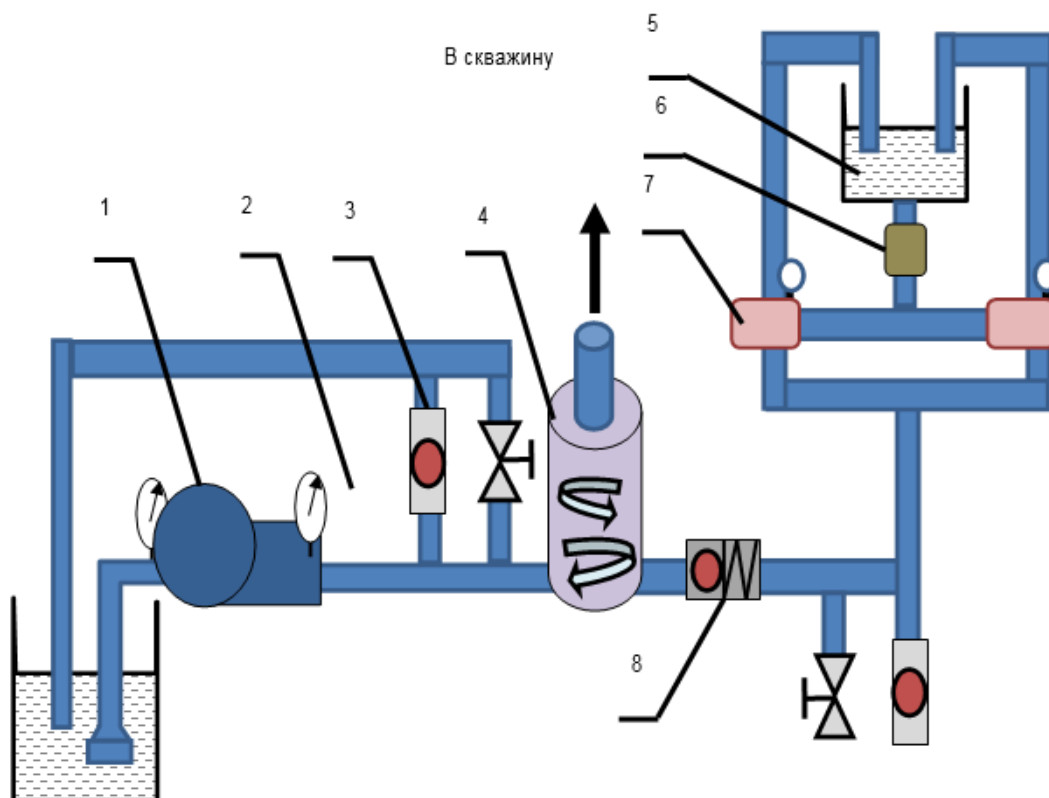


Рис. 7. Схема нагнетания газожидкостной смеси в скважину с использованием компрессора высокого давления КВД-Г:

1 – насос буровой; 2 – манометр; 3 – клапан предохранительный; 4 – смеситель;
5 – бак с водой; 6 – насос (Агидель); 7 – компрессор КВД-Г; 8 – клапан обратный

Fig. 7. Diagram of liquid-gas mixture injection in a well using a high-pressure KVD-G compressor:

1 – mud pump; 2 – manometer; 3 – safety valve; 4 – mixer;
5 – water tank; 6 – Agidel pump; 7 – KVD-G compressor; 8 – back-flow valve

При постановке на хранение обработанные поверхности, клапаны, их седла и пружины должны быть покрыты защитной смазкой.

Заключение

Предлагаемое оборудование для получения пен и схемы поверхностной обвязки устья скважин при геологоразведочном бурении позволят обеспечить оптимальное регулирование расхода воздуха, пенообразователя и получение необходимого давления нагнетания пены, то есть создать наиболее оптимальные режимы бурения на экологически чистых разрушаемых пенах.

Применение легко разрушаемых в статике пен обеспечит замкнутый цикл

циркуляции, что в первую очередь повысит культуру производства.

Предлагаемая технология не загрязняет место проведения буровых работ, снижает необоснованные затраты дорогостоящих реагентов-пеногасителей, обеспечивает повторное применение пенообразующего раствора, исключается применения дополнительных технических средств и специального оборудования для пеногашения, сокращает время сооружения скважины и себестоимость проводимых работ. При этом снижается аэрогидродинамическое давление, что облегчает отделение выбуренных частиц породы от забоя, тем самымкратно увеличивается механическая скорость бурения.

Библиографический список

1. Заливин В.Г. Технология бурения скважин на саморазрушающихся пенах // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 1 (44). С. 50–54.

2. Пат. США № 4276934. Method and device for blocking wells to extinguish fires, prohibit saltwater intrusion / W.M. Fraser. Заявл. 06.03.1980; опубл. 07.07.1981.

3. Заливин В.Г., Сапожников Ю.М. Влияние солей металлов на технологические параметры стабилизированных карбамидной смолой пен // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2011. № 2 (39). С. 177–187.

4. Яковлев А.И., Коваленко В.И. Бурение скважин с пеной на твердые полезные ископаемые. Л.: Недра, 1987. 128 с.

5. Бронзов А.С. Бурение скважин с использованием газообразных агентов. М.: Недра, 1989. 288 с.

6. Мураев Ю.Д. Газожидкостные системы в буровых работах. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного горного института, 2004. 123 с.

7. Кирсанов А.И., Крылов Г.А., Нефедов В.П. Пены и их использование в бурении // Экспресс-информация. Техника и технология геологоразведочных работ; организация производства. М.: Изд-во ВИЭМС, 1980. С. 60.

8. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1983. 264 с.

9. Пат. № 2498036 РФ. Способ бурения скважин на саморазрушающейся пене по замкнутому циркуляционному циклу, установка и композиция саморазрушающейся пены для его осуществления / В.Г. Заливин, Н.А. Буглов. Заявл. 23.04.2012; опубл. 10.11.2013.

References

1. Zalivin V.G. Self-destructive foam-based drilling technology. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2014, no. 1 (44), pp. 50–54. (In Russian).

2. Fraser W.M. Method and device for blocking wells to extinguish fires, prohibit saltwater intrusion. Patent USSA, no. 4276934, 1981.

3. Zalivin V.G., Sapozhnikov Yu.M. Influence of metal salts on technological parameters of foams stabilized by carbamide resin. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya*

niya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2011, no. 2 (39), pp. 177–187. (In Russian).

4. Yakovlev A.I., Kovalenko V.I. *Burzenie skvazhin s penoi na tverdye poleznye iskopaemye* [Well drilling with foam for solid minerals]. Leningrad: Nedra Publ., 1987, 128 p. (In Russian).

5. Bronzov A.S. *Burzenie skvazhin s ispol'zovaniem gazoobraznykh agentov* [Well drilling with the use of gaseous agents]. Moscow: Nedra Publ., 1989, 288 p. (In Russian).

6. Muraev Yu.D. *Gazozhidkostnye sistemy v burovyykh rabotakh* [Gas-liquid systems in drilling operations]. Saint Petersburg: Saint-Petersburg state mining Institute named after G.V. Plekhanov Publ., 2004, 123 p. (In Russian).

7. Kirsanov A.I., Krylov G.A., Nefedov V.P. *Peny i ikh ispol'zovanie v burenii* [Foams and their application in drilling]. *Ekspress-informatsiya. Tekhnika i tekhnologiya geologorazvedochnykh rabot; organizatsiya proizvodstva* [Express information. Machinery and technology of exploration, production organization]. Moscow: All-Russian research Institute of mineral raw materials named after N.M. Fedorovsky Publ., 1980, p. 60. (In Russian).

8. Tikhomirov V.K. *Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya* [Foams. Theory and practice of their production and destruction]. Moscow: Khimiya Publ., 1983, 264 p. (In Russian).

9. Zalivin V.G., Buglov N.A. *Sposob bureniya skvazhin na samorazrushayushcheisya pene po zamknutomu tsirkulyatsionnomu tsiklu, ustanovka i kompozitsiya samorazrushayushcheisya peny dlya ego osushchestvleniya* [Well drilling method using self-destructive foam in a closed-loop circulation cycle, installation and composition of self-destructive foam for its implementation]. Patent RF, no. 2498036, 2013. (In Russian).

Критерии авторства

Заливин В.Г. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Zalivin V.G. has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 550.8.05

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-78-92>

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ПАРФЁНОВСКОГО ГОРИЗОНТА КОВЫКТИНСКОЙ ЗОНЫ ГАЗОНАКОПЛЕНИЯ ПО МАТЕРИАЛАМ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН И РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ СКВАЖИН

© П.Н. Кокарев^а, И.А. Диких^б, В.А. Сердюкова^с

^{а-с}ООО «Газпром геологоразведка»,
625000, Российская Федерация, г. Тюмень, ул. Герцена, 70.

РЕЗЮМЕ. Цель. Исследования направлены на изучение геологического строения Ковыктинского газоконденсатного месторождения (ГКМ) Иркутской области, выявление и оконтуривание зон, неоднородного строения продуктивных отложений парфёновского горизонта чорской свиты венда, а также оценку необходимости пересмотра петрофизической модели коллекторов, представленной в 2013 году при пересчете запасов углеводородов парфёновского горизонта Ковыктинского ГКМ. **Методы.** Анализ распределения подсчетных параметров (эффективной толщины, коэффициента открытой пористости) и промысловых характеристик (дебитов) коллекторов парфёновского горизонта по площади месторождения и по разрезу. Сопоставление дифференциальных распределений эффективных толщин и пористости коллекторов до и после деления Ковыктинского ГКМ на зоны с различным типом разреза парфёновского горизонта. **Результаты.** Приведены сведения об особенностях строения пород-коллекторов парфёновского горизонта Ковыктинского ГКМ. Установлено три типа разреза парфёновского горизонта. Выполнено ранжирование скважин Ковыктинского ГКМ по типу разреза парфёновского горизонта и результатам испытания его в открытом стволе и/или в колонне. Определены направления дальнейшего изучения особенностей строения коллекторов парфёновского горизонта. **Выводы.** В парфёновском горизонте существуют коллекторы с улучшенными и ухудшенными фильтрационно-емкостными свойствами. Наличие различных по свойствам и составу коллекторов в отложениях парфёновского горизонта выявило необходимость в пересмотре петрофизической модели и методического обеспечения комплексной интерпретации материалов геофизического исследования скважин, представленных при пересчете запасов углеводородов Ковыктинского ГКМ в 2013 году.

Ключевые слова: парфёновский горизонт, коллектор, результаты испытаний, геофизические исследования скважин.

^аКокарев Павел Николаевич, начальник отдела анализа и интерпретации данных геофизических исследований скважин, геолого-технологических исследований Инженерно-технического центра, тел.: 8 (3452) 540469, e-mail: p.kokarev@ggr.gazprom.ru

Pavel N. Kokarev, Head of the Department of Analysis and Interpretation of Well Logging, Geological and Technological Research of the Engineering and Technical Center, tel.: 8 (3452) 540469, e-mail: p.kokarev@ggr.gazprom.ru

^бСердюкова Вера Анатольевна, зам. начальника отдела анализа и интерпретации данных геофизических исследований скважин, геолого-технологических исследований Инженерно-технического центра, тел.: 8 (3452) 540472, e-mail: v.serdyukova@ggr.gazprom.ru

Vera A. Serdyukova, Deputy Head of the Department of Analysis and Interpretation of Well Logging, Geological and Technological Research of the Engineering and Technical Center, tel.: 8 (3452) 540472, e-mail: v.serdyukova@ggr.gazprom.ru

^сДиких Иван Александрович, ведущий геофизик отдела анализа и интерпретации данных геофизических исследований скважин, геолого-технологических исследований Инженерно-технического центра, тел.: 8 (3452) 540472, e-mail: i.dikih@ggr.gazprom.ru

Ivan A. Dikikh, Leading Geophysicist of the Department of Analysis and Interpretation of Well Logging, Geological and Technological Research of the Engineering and Technical Center, tel.: 8 (3452) 540472, e-mail: i.dikih@ggr.gazprom.ru

Информация о статье. Дата поступления 30 мая 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Кокарев П.Н., Диких И.А., Сердюкова В.А. Особенности строения пород-коллекторов парфёновского горизонта Ковыктинской зоны газонакопления по материалам геофизического исследования скважин и результатам испытаний скважин // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 78–92. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-78-92

STRUCTURAL FEATURES OF PARFENOVSKY HORIZON RESERVOIR FORMATIONS OF THE KOVYKTA GAS CONDENSATE FIELD BY WELL LOGGING DATA AND WELL TESTING RESULTS

© P.N. Kokarev^a, I.A. Dikikh^b, V.A. Serdyukova^c

^{a-c}“Gazprom Geologorazvedka” LLC,
70 Gertsen St., Tyumen 625000, Russian Federation

ABSTRACT. Purpose. The research is aimed at studying the geological structure of the Kovykta gas condensate field in the Irkutsk region, identifying and outlining of the zones of heterogeneous structure of the productive deposits of the Parfenovsky horizon of the Chorsky formation of the Vendian period as well as the assessment of the need for a revision of the reservoir petrophysical model presented in 2013 when the hydrocarbon reserves of the Parfenovsky horizon of the Kovykta gas condensate field were calculated. **Methods.** The analysis of calculated parameters distribution (effective thickness, open porosity coefficient) and field characteristics (delivery) of the Parfenovsky horizon reservoirs is performed by the field area and by the section. The differential distributions of effective thicknesses and reservoir porosity are compared before and after the division of the Kovykta gas condensate field into the zones with a different type of the Parfenovsky horizon section. **Results.** The data on the structural features of the Parfenovsky horizon reservoir rocks of the Kovykta gas condensate field are provided. Three types of the Parfenovsky horizon section have been identified. The wells of the Kovykta gas condensate field have been ranked by the type of the Parfenovsky horizon section and its test results in the open borehole and/or in the drill string. The directions of further study of the structural features of the Parfenovsky horizon reservoirs have been determined. **Conclusions.** The Parfenovsky horizon features the presence of reservoirs with improved and degraded porosity and permeability. The presence of the reservoirs different in properties and composition in the Parfenovsky horizon deposits has revealed the need for the revision of the petrophysical model and the methodic base of the integrated interpretation of well geophysical research data presented by the recalculation of hydrocarbon reserves of the Kovykta gas condensate field in 2013.

Keywords: Parfenovsky horizon, reservoir, test results, well logging

Article info. Received 30 May 2018; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Kokarev P.N., Dikikh I.A., Serdyukova V.A. Structural features of Parfenovsky horizon reservoir formations of the Kovykta gas condensate field by well logging data and well testing results. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 78–92. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-78-92 (In Russian).

Введение

В 2013 году был выполнен пересчет запасов углеводородов в залежах парфёновского горизонта Ковыктинского газоконденсатного месторождения (ГКМ) и Хандинского лицензионного участка, в котором для продуктивных пластов P_1 и P_2

была принята петрофизическая модель, не учитывающая наличие различных по составу песчаников в отложениях парфёновского горизонта.

В случае, если по результатам анализа геолого-геофизической информации в пределах выделенного объекта

подсчета запасов выделяются коллекторы различных литотипов, то в соответствии с Методическими рекомендациями [1] петрофизические связи должны строиться раздельно для каждого литотипа.

Анализ геолого-геофизических материалов (результатов испытаний, геофизического исследования скважин (ГИС), керн) в первом приближении выявил неоднородность песчаников парфёновского горизонта, что указывает на необходимость в пересмотре методического обеспечения комплексной интерпретации материалов ГИС. Дифференциация коллекторов парфёновского горизонта по фильтрационным и емкостным свойствам отмечается как по площади, так и по разрезу. Неоднородность строения, свойств и состава парфёновского горизонта не раз была отмечена рядом исследователей [2–7].

Целью настоящей статьи является оценка необходимости пересмотра петрофизической модели пород-коллекторов парфёновского горизонта, которая была представлена при пересчете запасов углеводородов в 2013 году.

Общие сведения о продуктивных отложениях парфёновского горизонта

На Ковыктинском ГКМ продуктивны отложения парфёновского горизонта чорской свиты венда. Парфёновский горизонт представлен переслаиванием песчаников и алевролитов с прослоями аргиллитов. Это огромное (площадью более 7 тыс. км²) геологическое тело, которое фациально замещается в юго-восточном и северо-западном направлениях на более глинистые разности. В разрезе горизонта выделяется два продуктивных пласта P_1 и P_2 , которые разделены пачкой аргиллитов толщиной от первых метров до 10–15 м [8].

Формирование парфёновского горизонта происходило в трансгрессивно-регрессивных условиях осадконакопления, что и обусловило его двухчленное

(пласт P_1 и P_2) строение. Для пластов диагностированы субконтинентальные и прибрежно-морские обстановки седиментации пород [7, 9]. Это и явилось первопричиной существенных различий в строении, составе и свойствах парфёновского горизонта на территории Ангаро-Ленской ступени [2].

Изучение отложений парфёновского горизонта площадными видами геофизических исследований, а также бурение и испытание скважин сопряжено с рядом трудностей, среди которых сильно расчлененный современный рельеф (перепады высот достигают 850 м), наличие интервалов поглощений, зон аномально высоких пластовых давлений и рапопроявлений, зон литологического замещения пластов-коллекторов непроницаемыми породами [10–16].

Остановимся на некоторых из проблем, а именно на тех сложностях, с которыми авторы столкнулись при анализе материалов испытания пластов P_1 и P_2 в открытом стволе и в колонне. Во-первых, в ряде скважин отмечено отсутствие притока углеводородов из пласта P_2 в открытом стволе скважин Ковыктинского ГКМ при достаточно большой суммарной газонасыщенной толщине пород-коллекторов. Во-вторых, не менее актуальным вопросом является существенное отличие промысловых характеристик одноименных пластов в различных скважинах при схожих геолого-геофизических характеристиках по материалам ГИС.

Комплексный анализ результатов испытаний скважин совместно с результатами интерпретации материалов ГИС позволил разделить весь фонд скважин Ковыктинской зоны газонакопления на группы со схожими промысловыми характеристиками и типом разреза парфёновского горизонта.

Делением парфёновского горизонта по типу разреза занимался ряд исследователей [3, 11, 17, 18]. При этом авторы использовали такие характери-

стики, как суммарные эффективные толщины, суммарную емкость (произведение эффективной толщины на пористость), пористость и проницаемость коллекторов.

Анализ эффективных толщин коллекторов парфёновского горизонта

По материалам ГИС весь фонд разведочных, поисково-оценочных и параметрических скважин Ковыктинского ГКМ был разделен по типу разреза парфёновского горизонта на три группы.

Первый тип разреза относится к центральной части месторождения. Для скважин, относящихся к данной группе, характерно наличие основных эффективных толщин коллекторов в пласте P_2 при малых эффективных толщинах коллекторов или полном их отсутствии в пласте P_1 . Пласт P_1 – коллекторы по результатам комплексной интерпретации материалов ГИС отсутствуют или имеют незначительную толщину от 1 до 5,6 м, пласт P_2 – толщина коллекторов по материалам ГИС варьирует от 6,3 до 31,6 м. Исключение составляет скважина Хнд-1, которая пробурена в зоне локального отсутствия коллекторов. Отсутствие коллекторов в этой скважине обусловлено значительной проработкой порового пространства процессами вторичной цементации. К данной группе относится большая часть скважин Ковыктинского ГКМ – 37 скважин (51 % от общего количества скважин).

Второй тип разреза располагается в южной части месторождения. В скважинах, к нему относящихся, характерно наличие эффективных толщин коллекторов как в пласте P_1 , так и в пласте P_2 . В пласте P_1 суммарная эффективная толщина коллекторов по материалам ГИС варьирует от 5,4 до 17,7 м, по пласту P_2 – от 2 до 20,2 м. К данной группе относится 16 скважин.

Обособленно выделяются скважины ЮК-1 и ЮК-2, в которых эффектив-

ные толщины присутствуют только в интервале пласта P_1 . Однако некоторые прослои песчаников пласта P_2 условно могут быть отнесены к эффективным толщинам, а именно 1 м в скважине ЮК-1 и 1,5 м в скважине ЮК-2. На данном этапе анализа и обобщения геолого-геофизических материалов вышеуказанные скважины отнесены ко второму типу разреза парфёновского горизонта. Суммарное количество скважин (учитывая скважины ЮК-1, ЮК-2), характеризующихся вторым типом разреза парфёновского горизонта, составило 18 (25 % от общего количества скважин).

Третий тип разреза распространен в юго-западной и северной окраинах месторождения. Для скважин, относящихся к данной группе, парфёновский горизонт характеризуется наличием малых толщин коллекторов или их полным отсутствием. В пласте P_1 суммарная эффективная толщина коллекторов по материалам ГИС варьирует от 1 до 3,5 м, по пласту P_2 – от 1,2 до 5 м. К данной группе относятся 17 скважин (24 % от общего количества скважин). Примером полного отсутствия коллекторов в парфёновском горизонте в данном типе разреза являются скважины Чик-2, ЮК-4, ЮК-7 и Нот-271.

Зоны распространения различных типов разреза парфёновского горизонта представлены на рис. 1.

Анализ промысловых характеристик парфёновского горизонта

Совместный анализ результатов испытаний и результатов интерпретации материалов ГИС позволил дополнительно детализировать строение парфёновского горизонта. В скважинах с первым типом разреза парфёновского горизонта выделяются два массива. Первый массив скважин представляет собой центральную часть месторождения. В скважинах, относящихся к данной подгруппе, при испытании в открытом стволе и/или в колонне из пласта P_2 были получены

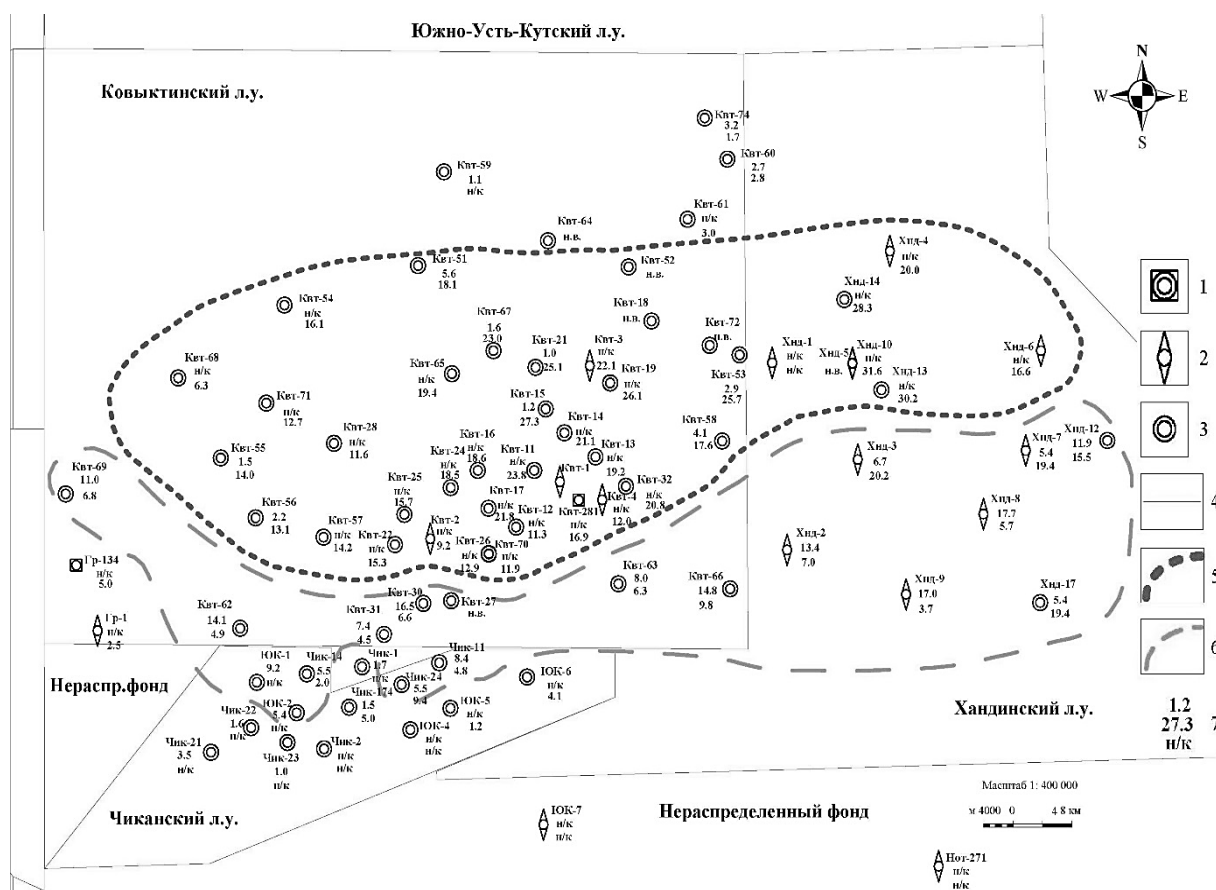


Рис. 1. Карта эффективных толщин пластов P_1 , P_2 с контурами зон распространения различных типов разреза парфёновского горизонта (масштаб 1:400000):

1–3 – скважины: 1 – параметрические, 2 – поисковые, 3 – разведочные; 4–6 – контуры:
4 – границы лицензионного участка, 5 – тип разреза парфёновского горизонта № 1,
6 – тип разреза парфёновского горизонта № 2; 7 – эффективные толщины пласта P_1 ,
эффективные толщины пласта P_2 , н/к – неколлектор

Fig. 1. Map of effective thicknesses of layers P_1 , P_2 with the contours of distribution zones of different types of Parfenovsky horizon sections (scale 1:400000):

1–3 – wells: 1 – parametric, 2 – prospecting, 3 – exploration; 4–6 – contours:
4 – boundaries of the license area, 5 – type of Parfenovsky horizon section no. 1,
6 – type of Parfenovsky horizon section no. 2; 7 – effective thicknesses of the layer P_1 ,
effective thicknesses of the layer P_2 , н/к – not a reservoir

промышленные притоки углеводородов дебитами от 30 до 340 тыс. м³/сут.

Вторая подгруппа скважин первого типа разреза парфёновского горизонта примыкает к центральной части месторождения и является восточным и западным его продолжением. В скважинах, относящихся к данной подгруппе, при испытании пласт P_2 оказался «сухим», либо из него были получены непромышленные притоки углеводородов (от первых тысяч кубических метров газа в сутки до 5,6 тыс. м³/сут.).

В скважинах со вторым типом разреза парфёновского горизонта также выделяются два массива. Первая подгруппа скважин локализуется в центральной и западной частях второго типа разреза парфёновского горизонта. В скважинах данной подгруппы при раздельном и/или совместном испытании пластов P_1 и P_2 получены промышленные притоки углеводородов от 32,4 до 224,7 тыс. м³/сут. (исключением является скважина Чик-14, дебит газа в которой составил 9,3 тыс. м³/сут.).

Вторая подгруппа скважин локализуется в центральной и восточной частях второго типа разреза парфёновского горизонта. При раздельном испытании пластов P_1 и P_2 в скважинах данной подгруппы промышленные притоки углеводородов были получены только из пласта P_1 и составили от 61,4 до 215 тыс. м³/сут.,

из пласта P_2 притоки флюидов не получены, либо получены притоки фильтра бурового раствора.

Зоны распространения парфёновского горизонта, характеризующегося различным типом разреза и промысловыми характеристиками коллекторов, представлены на рис. 2.

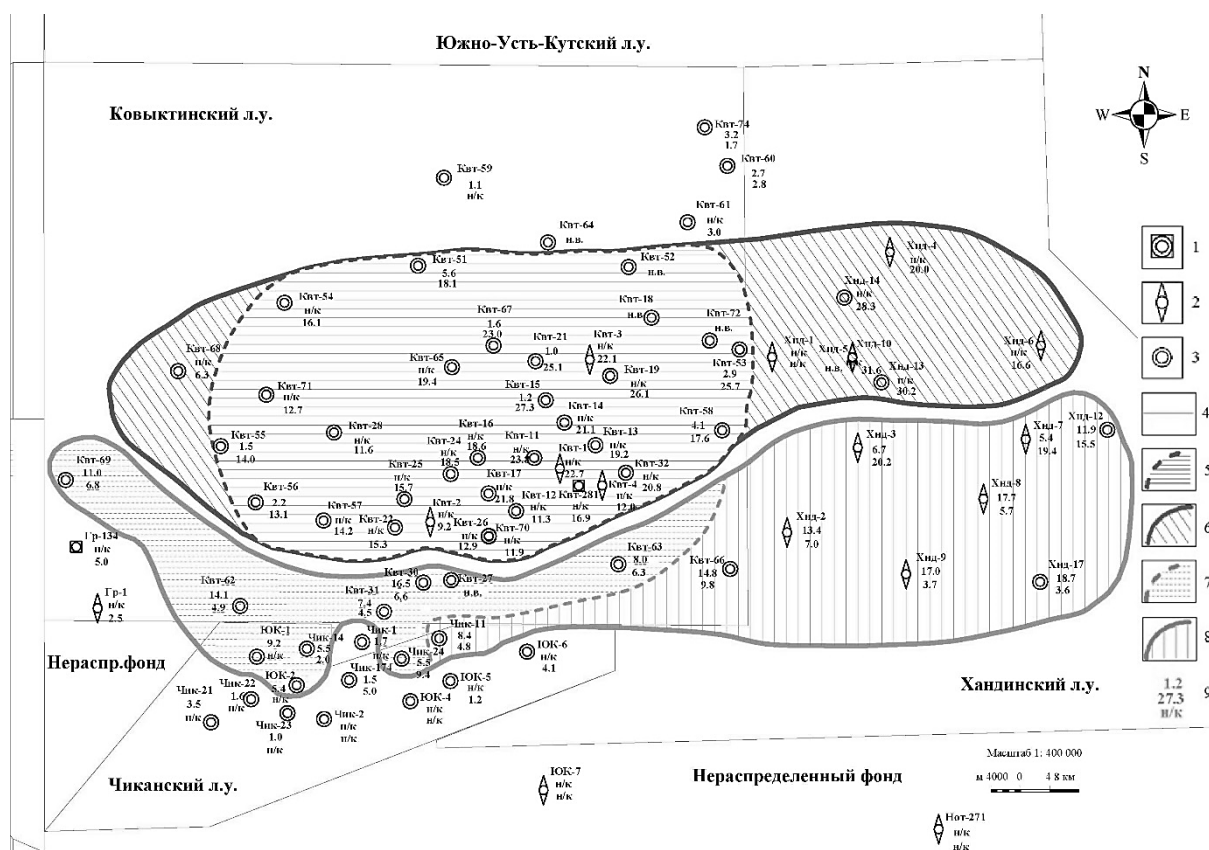


Рис. 2. Карта эффективных толщин пластов P_1 , P_2 с контурами зон распространения парфёновского горизонта, характеризующегося различным типом разреза и промысловыми характеристиками коллекторов (масштаб 1:400000):

1–3 – скважины: 1 – параметрические, 2 – поисковые, 3 – разведочные; 4–8 – контуры: 4 – границы лицензионного участка, 5 – первая подгруппа скважин первого типа разреза парфёновского горизонта, 6 – вторая подгруппа скважин первого типа разреза парфёновского горизонта, 7 – первая подгруппа скважин второго типа разреза парфёновского горизонта, 8 – вторая подгруппа скважин второго типа разреза парфёновского горизонта; 9 – эффективные толщины пласта P_1 , эффективные толщины пласта P_2 , н/к – неколлектор

Fig. 2. Map of effective thicknesses of layers P_1 , P_2 with the contours of distribution zones of the Parfenovsky horizon featuring a different section type and reservoir productive characteristics (scale 1:400000):

1–3 – wells: 1 – parametric, 2 – prospecting, 3 – exploration; 4–8 – contours: 4 – boundaries of the license area, 5 – first subgroup of wells of the Parfenovsky horizon section of the first type, 6 – second subgroup of wells of the Parfenovsky horizon section of the first type, 7 – first subgroup of the wells of the Parfenovsky horizon section of the second type, 8 – second subgroup of wells of the Parfenovsky horizon section of the second type; 9 – effective thicknesses of the layer P_1 , effective thicknesses of the layer P_2 , н/к – not a reservoir

Анализ подсчетных параметров коллекторов парфёновского горизонта

Представленная выше градация отложений парфёновского горизонта по типам разреза выполнена по величине суммарных эффективных толщин коллекторов в пластах Π_1 и Π_2 с учетом их промысловых характеристик.

Для оценки правомерности выполненного деления Ковыктинского ГКМ на зоны проведен статистический анализ подсчетных параметров коллекторов парфёновского горизонта по выявленным зонам и по всему месторождению в целом, а также построены дифференциальные распределения эффективных толщин ($H_{эф.}$) и коэффициента открытой пористости (K_n) коллекторов по материалам ГИС.

Рассмотрим распределение суммарных эффективных толщин ($H_{эф. сум.}$) коллекторов парфёновского горизонта по месторождению в целом (рис. 3).

Наличие трех ярко выраженных модальных значений (см. рис. 3) на диффе-

ренциальном распределении свидетельствует о значительной неоднородности суммарных эффективных толщин коллекторов по площади месторождения. Это, возможно, связано с тем, что формирование пород-коллекторов происходило в различных условиях осадконакопления либо в результате вторичных преобразований. Установленный факт значительной изменчивости суммарных эффективных толщин коллекторов также указывает на возможность разделения всего массива скважин месторождения на группы с существенно различающимися величинами $H_{эф. сум.}$

В соответствии с выполненным делением Ковыктинского ГКМ на три типа разреза парфёновского горизонта для каждого типа разреза были построены индивидуальные дифференциальные распределения $H_{эф. сум.}$ (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что третий тип разреза значительно отличается от первого и второго типов, для него характерны низкие суммарные эффективные толщины – от 1 до 6,5 м. Существенных

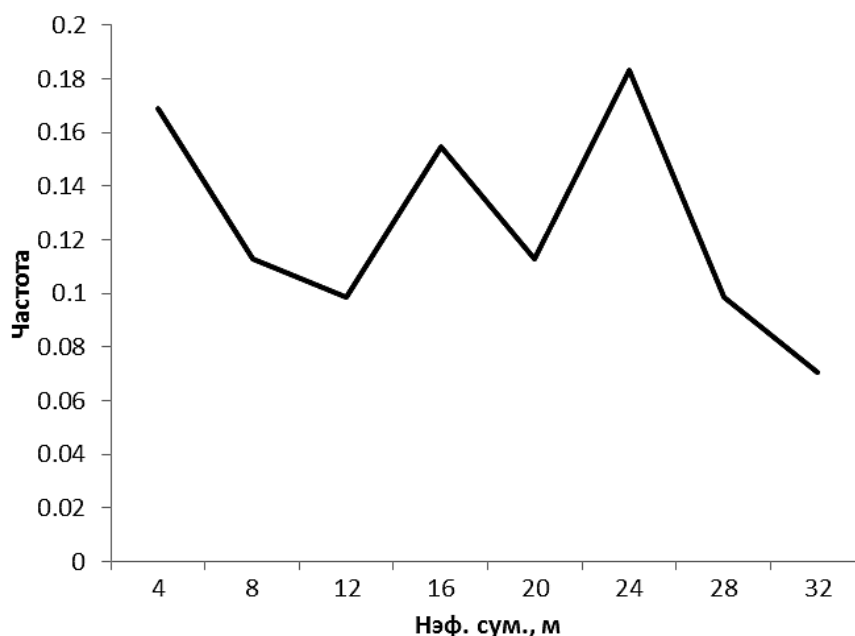


Рис. 3. Дифференциальное распределение суммарных эффективных толщин парфёновского горизонта по скважинам Ковыктинского месторождения

Fig. 3. Differential distribution of the total effective thicknesses of the Parfenovsky horizon by the wells of the Kovykta field

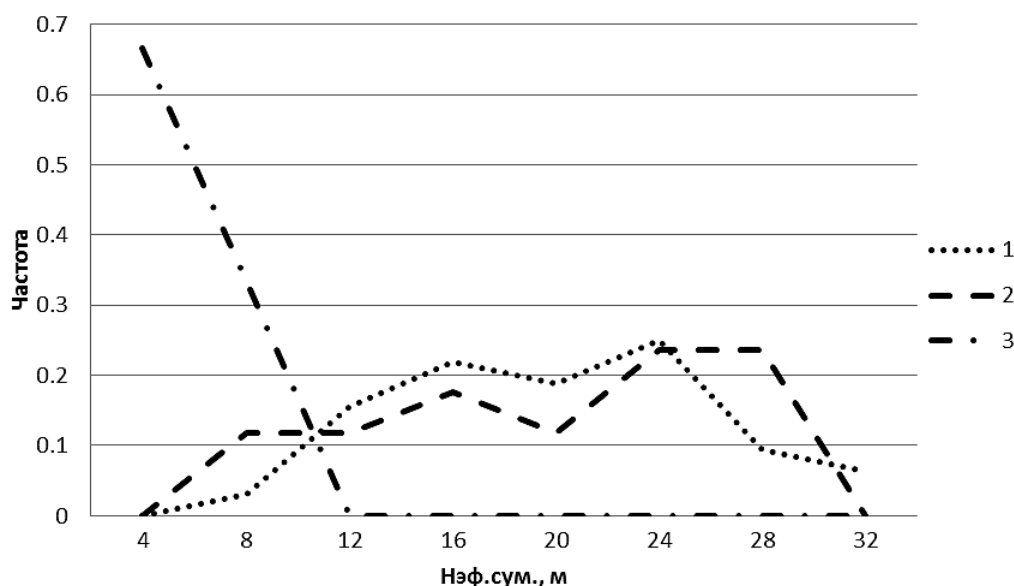


Рис. 4. Дифференциальное распределение суммарных эффективных толщин парфёновского горизонта по типам разреза Ковыктинского месторождения:

- 1 – первый тип разреза, центральная часть месторождения;
2 – второй тип разреза, южная часть месторождения;
3 – третий тип разреза, юго-западная и северная окраины месторождения

Fig. 4. Differential distribution of the total effective thicknesses of the Parfenovsky horizon by the types of the Kovykta field sections:

- 1 – first type of section, central part of the field;
2 – second type of section, southern part of the field;
3 – third type of section, south-western and northern margins of the field

различий между первым и вторым типом разреза парфёновского горизонта в отношении суммарных эффективных толщин не выявлено.

Дифференциальное распределение средневзвешенных значений коэффициентов открытой пористости (рис. 5), построенное по Ковыктинскому ГКМ, является в целом одномодальным (модальное значение составляет 13 %). Распределение же значений K_n по типам разрезов (рис. 6) указывает на отличие емкостных свойств коллекторов в каждом типе разреза. Так, для коллекторов первого типа разреза (центральная часть месторождения) характерно модальное значение K_n , равное 15 % (диапазон изменения пористости от 11,1 до 17,1 %), коллекторы второго типа разреза (южная часть месторождения) обладают модальным значением K_n , равным 13 % (при диапазоне изменения пористости от 9,6 до

14,4 %), коллекторам третьего типа разреза (юго-западная и северная окраины месторождения) характерны еще меньшие значения пористости (модальное значение составляет 11 % при диапазоне изменения от 9,2 до 13,9 %).

В целом можно проследить закономерное уменьшение емкостных свойств коллекторов при переходе от первого ко второму и далее к третьему типу разреза парфёновского горизонта. Из данного тренда выбивается только скважина № 22 Чиканской площади, которая относится к третьему типу разреза (см. рис. 6, второе модальное значение на черной кривой в области повышенных значений K_n). В этой скважине в разрезе парфёновского горизонта выделен единичный коллектор в пласте P_1 толщиной 1,6 м, пористость которого по материалам ГИС составляет 17,6 %.

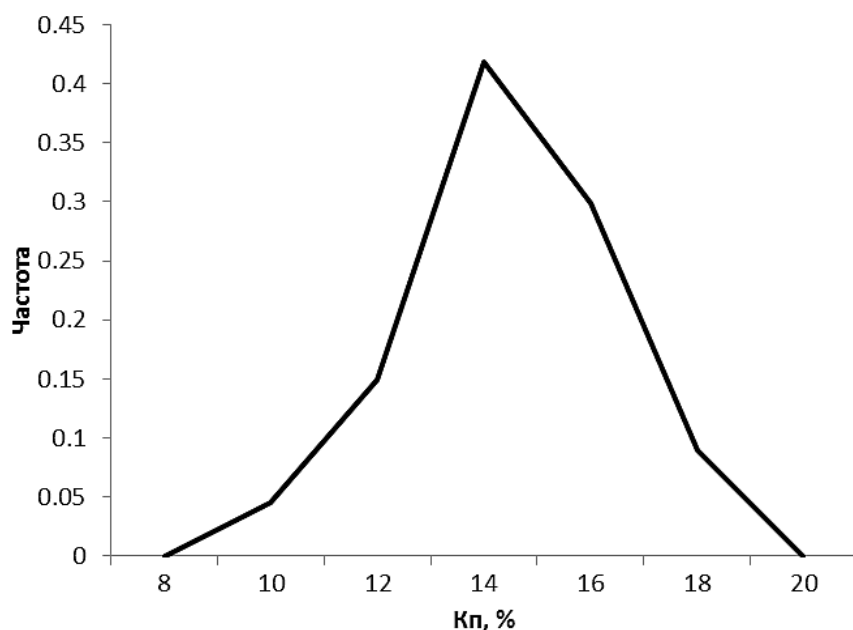


Рис. 5. Дифференциальное распределение средневзвешенных значений коэффициента открытой пористости парфёновского горизонта по скважинам Ковыктинского месторождения

Fig. 5. Differential distribution of the weighted average values of the open porosity coefficient of the Parfenovsky horizon by the Kovykta field wells

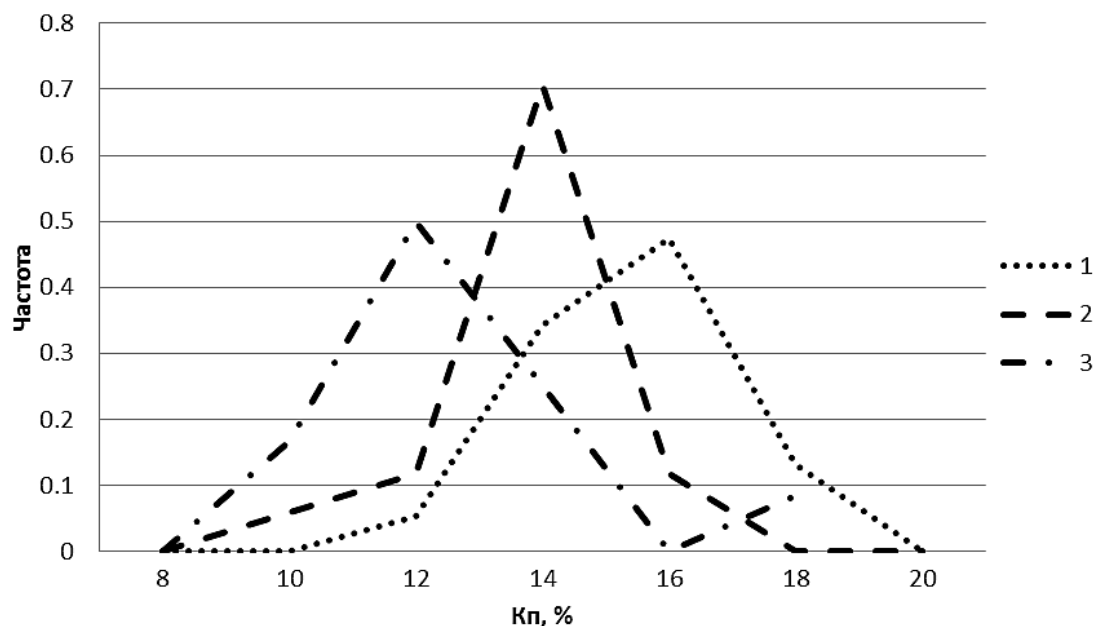


Рис. 6. Дифференциальное распределение средневзвешенных значений коэффициента открытой пористости парфёновского горизонта по группам скважин Ковыктинского месторождения

Условные обозначения см. на рис. 4

Fig. 6. Differential distribution of the weighted average values of the open porosity coefficient of the Parfenovsky horizon by the groups of the Kovykta field wells

Legend: see fig. 4

По результатам проведенного анализа подсчетных параметров и промысловых характеристик коллекторов парфёновского горизонта необходимо отметить следующее:

– анализ дифференциальных распределений суммарных эффективных толщин коллекторов (см. рис. 3, 4) позволил подтвердить правомерность выделения скважин, расположенных в юго-западной и северной окраинах месторождения, в самостоятельную группу (третий тип разреза парфёновского горизонта с наиболее низкими значениями эффективных толщин и низкой пористостью);

– различий между первым и вторым типом разреза парфёновского горизонта по величине суммарных эффективных толщин коллекторов (см. рис. 4) не выявлено;

– анализ дифференциальных распределений коэффициента пористости (см. рис. 6) подтверждает правомерность деления всего массива скважин Ковыктинского ГКМ на три группы по типу разреза парфёновского горизонта, так как по каждому типу разреза обособляется одномодальное распределение значений K_p . Наиболее низкой пористостью (и низкими значениям $H_{эф.}$) обладает третий тип разреза (окраины месторождения), наиболее высокая пористость – в центральной части месторождения.

Направления дальнейшего изучения коллекторов парфёновского горизонта

Направлениями дальнейшего изучения строения коллекторов парфёновского горизонта должны быть:

– углубленный анализ результатов лабораторных исследований керна с целью выявления особенностей литолого-минералогического состава и свойств пород пластов P_1 и P_2 (выявление литотипов коллекторов по данным керна);

– определение критериев разделения коллекторов на литотипы по материалам ГИС;

– разработка новой петрофизической основы комплексной интерпретации материалов ГИС с учетом выявленных литотипов коллекторов и зональности распределения пористости по площади месторождения.

Значимость и актуальность дальнейшего изучения парфёновского горизонта заключается в повышении достоверности оценки запасов углеводородов Ковыктинского ГКМ за счет учета особенностей литологического строения сложнопостроенных коллекторов по материалам ГИС.

Выводы

1. Анализ каротажных данных, а также эффективных толщин коллекторов, выделенных по материалам ГИС в пластах P_1 и P_2 , позволил установить три типа разреза парфёновского горизонта.

2. Комплексный анализ результатов интерпретации материалов ГИС совместно с результатами испытаний парфёновского горизонта позволил сгруппировать скважины по схожести промысловых характеристик пород-коллекторов.

3. В первом приближении выполнено оконтуривание зон распространения коллекторов парфёновского горизонта, существенно отличающихся друг от друга суммарными эффективными толщинами коллекторов, распределением их между пластами P_1 и P_2 , а также промысловыми характеристиками.

4. Выявленные по результатам испытаний и материалам ГИС особенности распространения коллекторов по площади и по разрезу Ковыктинского ГКМ указывают на сложное строение парфёновского горизонта и наличие в нем различающихся по составу и свойствам литотипов коллекторов. Отмеченные особенности геологического строения парфёновского горизонта подтверждены результатами анализа распределений средневзвешенных величин K_p и $H_{эф. сум.}$ по площади месторождения.

5. Причина отсутствия притока углеводородов из пласта P_2 скважин Ковыктинского ГКМ при достаточно большой суммарной газонасыщенной толщине пород-коллекторов в рамках проведенного анализа материалов ГИС и результатов испытаний не установлена. Причины отсутствия притоков углеводородов из пласта P_2 , а также существенные отличия промысловых характеристик одноименных пластов в различных скважинах, вероятнее всего, кроются в особенностях строения и минералогическом составе пород-коллекторов. Условия вскрытия (первичное, вторичное) коллек-

торов требуют применения специальных технологических жидкостей, а проведение испытаний – новых мероприятий, таких как гидроразрыв (многостадийный гидроразрыв) пласта в низкодебитных скважинах. В этом предстоит разобратся при проведении углубленного анализа керновых данных, материалов ГИС, а также результатов испытаний (в открытом стволе и в колонне) и технологии их проведения.

6. Определены направления дальнейшего изучения особенностей строения коллекторов парфёновского горизонта.

Библиографический список

1. Методические рекомендации по подсчёту геологических запасов нефти и газа объёмным методом / под редакцией В.И. Петерсилье, В.И. Порокуна, Г.Г. Яценко. М. – Тверь: Изд-во ВНИГНИ, НПЦ «Тверьгеофизика»; ООО «Издательство ГЕРС», 2003. 260 с.

2. Скузоватов М.Ю. Критерии оценки перспектив газонасыщенности парфёновского горизонта центральных районов Ангаро-Ленской ступени // Геология нефти и газа. 2014. № 1. С. 103–111.

3. Скузоватов М.Ю. Применение комплекса геолого-геофизических данных при прогнозе газонасыщенности вендского терригенного комплекса Ангаро-Ленской зоны газонакопления // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2015. № 6. С. 26–33.

4. Воробьев В.С. Фильтрационная неоднородность пород-коллекторов парфёновского продуктивного горизонта Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2011. № 8. С. 42–47.

5. Ахияров А.В., Орлов В.И., Бондарев А.Н. Зависимость продуктивности терригенных коллекторов от их фациальной принадлежности на примере парфё-

новского горизонта Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геофизика. 2007. № 6. С. 60–67.

6. Ахияров А.В., Земченков А.С. Пространственно-временной континуум палеогеографических обстановок седиментации терригенных отложений верхнего венда юго-западной части Сибирской платформы (на примере парфёновского продуктивного горизонта Ангаро-Ленской ступени и ботубинского – Непско-Ботубинской антеклизы) // Современные проблемы седиментологии в нефтегазовом инжиниринге: труды III Всерос. науч.-практ. седиментол. совещ. Томск, 10–12 апреля 2017 г. Томск: Изд-во ЦППС НД, 2017. С. 149–170.

7. Пушкарева М.М., Хабаров Е.М., Вараксина И.В. Литологическая характеристика парфёновского и ботубинского продуктивных горизонтов венда Ангаро-Ленской ступени и Непско-Ботубинской // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 1. С. 78–83.

8. Смирнов, Горлов И.В., Яицкий Н.Н., Горский О.М., Игнатьев С.Ф., Поспеев А.В., Вахромеев А.Г., Агафонов Ю.А., Буддо И.В. Интеграция геолого-геофизических данных – путь к созданию

достоверной модели Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геология нефти и газа. 2016. № 2. С. 56–66.

9. Афонин И.В. Условия формирования Парфёновского горизонта Ковыктинского месторождения (Восточная Сибирь) // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам IX Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых). В 2 т. Пермь, 2017. Т. 1. С. 55–56.

10. Дробот Д.И., Пак В.А., Девятилова Н.М., Хохлов Г.А., Карпышев А.В., Бердников И.Н. Нефтегазоносность докембрийских отложений Сибирской платформы, перспективы подготовки и освоения их углеводородного потенциала // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 1. С. 110–120.

11. Барышев С.А., Барышев Л.А. Комплексная интерпретация и моделирование волновых полей на Ковыктинском месторождении // Геология нефти и газа. 2008. № 2. С. 51–57.

12. Вахромеев А.Г., Мышевский Н.В., Хохлов Г.А. Аномально высокие пластовые давления как фактор, осложняющий освоение углеводородных месторождений Восточной Сибири // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии: фундаментальный и прикладной аспекты: материалы Всерос. совещ. № 5. Иркутск, 2006. С. 98–119.

13. Барышев Л.А., Хохлов Г.А. Комплексная интерпретация данных сейсморазведки и ГИС на основе физико-геологической модели // Технологии сейсморазведки. 2006. № 3. С. 55–60.

14. Скузоватов М.Ю., Мальцева Е.В. Комплексирование данных сейсморазведки, ГИС и петрофизических исследований

разведки, ГИС и петрофизических исследований для оценки перспектив газоносности парфёновского горизонта центральных районов Ангаро-Ленской ступени // Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых и студентов, посвящ. 80-летию акад. А.Э. Конторовича. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014. С. 122–124.

15. Ильин А.И., Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Поспеев А.В., Горлов И.В. Пути прогноза горно-геологических условий бурения на Ковыктинском газоконденсатном месторождении // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 4 (57). С. 48–61.

16. Ильин А.И., Сверкунов С.А., Вахромеев А.Г., Буддо И.В., Горлов И.В. Прогноз горно-геологических условий бурения разведочной скважины на примере Ковыктинского месторождения // Строе-ние литосферы и геодинамика: сб. тр. XXVII Всерос. молодежн. конф. 2017. С. 107–108.

17. Барышев Л.А. Физико-геологическая модель подсолевого комплекса осадочного чехла и прогноз продуктивности терригенных коллекторов Ковыктинского месторождения // Технологии сейсморазведки. 2003. № 2. С. 38–43.

18. Скузоватов М.Ю. Оценка перспектив газоносности парфёновского горизонта центральных районов Ангаро-Ленской ступени на основе комплексирования данных сейсморазведки, ГИС и петрофизических исследований // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 2. № 1. С. 137–141.

References

1. Petersil'e V.I., Poroskun V.I., Yacenko G.G. *Metodicheskie rekomendacii po podschetu geologicheskikh zapasov nefiti i*

gaza ob"emnym metodom [Instructional guidelines for calculating geological reserves of oil and gas by the volume method].

Moscow – Tver: All-Russian Research Geological Petroleum Institute Publ., Tver'geofizika Publ.; Izdatel'stvo GERS Publ., 2003, 260 p. (In Russian).

2. Skuzovatov M.Y. Criteria of evaluating gas-bearing prospects of Parphenov horizon of central areas of Angaro-Lena step. *Geologiya nefti i gaza* [Geology of Oil and Gas], 2014, no. 1, pp. 103–111. (In Russian).

3. Skuzovatov M.Y. Application of geological-geophysical data when predicting gas potential of the vendian terrigene complex of Angara-Lena gas-bearing zone. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftnykh i gazovykh mestorozhdenij* [Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields], 2015, no. 6, pp. 26–33. (In Russian).

4. Vorobiev V.S. Filtration heterogeneity of rock-collectors of Parfenovsky producing horizon of Kovyktinsky gas-condensate field. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftnykh i gazovykh mestorozhdenij* [Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields], 2011, no. 8, pp. 42–47. (In Russian).

5. Ahiyarov A.V., Orlov V.I., Bondarev A.N. Terrigenous reservoirs productivity vs rock mass facial characteristics: parfyonov beds of the Kovykta gas/condensate field case history. *Geofizika* [The Russian Geophysics Journal], 2007, no. 6, pp. 60–67. (In Russian).

6. Ahiyarov A.V., Zemchenkov A.S. *Prostranstvenno-vremennoy kontinuum paleogeograficheskikh obstanovok sedimentatsii terrigennykh otlozhenij verhnego venda yugo-zapadnoj chasti Sibirskoj platformy (na primere parfyonovskogo produktivnogo gorizonta Angaro-Lenskoj stupeni i botuobinskogo – Nepsko-Botuobinskoj anteklizy)* [Space-time continuum of paleogeographic sedimentation conditions of terrigenous deposits of the Upper Vendian age of the South-Western part of the Siberian platform (on example of the Parfenovsky productive horizon of the Angara-Lena stage and Botuoba – Nepa-Botuoba

anteklise]. *Trudy III Vserossiiskogo nauchno-prakticheskogo sedimentologicheskogo soveshchania "Sovremennye problemy sedimentologii v neftegazovom inzhiniringe"* [Proceedings of III All-Russian scientific and practical sedimentological meeting "Modern problems of sedimentology in oil and gas engineering"]. Tomsk, 10–12 April 2017. Tomsk: Center for training and retraining of oil and gas industry specialists Publ., 2017, pp. 149–170. (In Russian).

7. Pushkareva M.M., Habarov E.M., Varaksina I.V. Lithological characteristics of Botu-Oba and Parfenovsky productive horizons of Vendian age of the Angara-Lena stage and the Nepa-Botuoba anteklise. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2013, vol. 323, no. 1, pp. 78–83. (In Russian).

8. Smirnov A.S., Gorlov I.V., Yaickiy N.N., Gorskiy O.M., Ignatiev S.F., Pospeev A.V., Vakhromeev A.G., Agafonov Iu.A., Buddo I.V. Integration of geological and geophysical data is a way to design an accurate model of the Kovykta gas condensate deposit. *Geologiya nefti i gaza* [Oil and Gas Geology], 2016, no. 2, pp. 56–66. (In Russian).

9. Afonin A.V. *Usloviya formirovaniya Parfenovskogo gorizonta Kovyktinskogo mestorozhdeniya (Vostochnaya Sibir')* [Formation conditions of the Parfenovsky horizon of the Kovykta field (East Siberia)]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Geologiya v razvivayushchemsya mire"* [Collection of scientific articles based on the materials of IX International scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientists "Geology in the developing world"]. In 2 vol. Perm, 2017. Vol. 1, pp. 55–56. (In Russian).

10. Drobot D.I., Pak V.A., Deviatilova N.M., Hohlov G.A., Karpyshev A.V., Berdnikov I.N. Oil and gas content of Precambrian deposits of the Siberian platform, prospects

of their hydrocarbon potential preparation and development. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2004, vol. 45, no. 1, pp. 110–120. (In Russian).

11. Baryshev S.A., Baryshev L.A. Integrated interpretation and wave fields modeling in Kovyktinskoye field. *Geologiya nefti i gaza* [Oil and Gas Geology], 2008, no. 2, pp. 52–58. (In Russian).

12. Vakhromeev A.G., Myshevskiy N.V., Hohlov G.A. *Anomal'no vysokie plastovye davleniya kak faktor, oslozhnyayushchij osvoenie uglevodorodnykh mestorozhdenij Vostochnoj Sibiri* [Abnormally high reservoir pressures as a factor complicating hydrocarbon deposit development in Eastern Siberia]. *Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya "Sovremennaya geodinamika i opasnye prirodnye processy v Central'noj Azii: fundamental'nyj i prikladnoj aspekty"* [Proceedings of the All-Russian meeting "Modern geodynamics and hazardous natural processes in Central Asia: fundamental and applied aspects"]. Irkutsk, 2006, no. 5, pp. 98–119. (In Russian).

13. Baryshev L.A., Hohlov G.A. Integrated interpretation of seismic and GIS data based on a physico-geological model. *Tekhnologii sejsmorazvedki* [Seismic Survey Technologies], 2006, no. 3, pp. 55–60. (In Russian).

14. Skuzovatov M.Y., Maltseva E.V. *Kompleksirovanie dannykh sejsmorazvedki, GIS i petrofizicheskikh issledovaniy dlya ocenki perspektiv gazonosnosti parfenovskogo gorizonta central'nykh rajonov Angaro-Lenskoj stupeni* [Integration of seismic, GIS and petrophysical research data to assess the prospects of gas content of the Parfenovsky horizon of the Central regions of the Angara-Lena stage]. *Materialy Vserossiyskoj nauchnoj konferencii molodykh uchennykh i studentov, posvyashchennoj 80-letiyu akademika A.E. Kontorovicha "Aktual'nye problemy geologii nefti i gaza Sibiri"* [Materials of the all-Russian scientific conference of young scientists and students de-

voted to the 80th anniversary of the Academician A.E. Kontorovich "Actual problems of Oil and Gas Geology of Siberia"]. Novosibirsk: Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences Publ., 2014, pp. 122–124. (In Russian).

15. Ilyin A.I., Vakhromeev A.G., Sverkunov S.A., Pospeev F.V., Gorlov I.V. The ways to predict mining and geological conditions of drilling on the Kovykta gas-condensate field. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2016, no. 4 (57), pp. 48–61. (In Russian).

16. Ilyin A.I., Sverkunov S.A., Vakhromeev A.G., Buddo I.V., Gorlov I.V. *Prognoz gorno-geologicheskikh uslovij bureniya razvedochnoj skvazhiny na primere Kovyktinskogo mestorozhdeniya* [Forecast of mining and geological conditions of exploration well drilling on example of the Kovykta field]. *Sbornik trudov XXVII Vserossiyskoj molodezhnoj konferencii "Stroenie litosfery i geodinamika"* [Collection of works of XXVII All-Russian youth conference "Lithosphere Structure and Geodynamics"], 2017, pp. 107–108. (In Russian).

17. Baryshev L.A. Physico-geological model of a sedimentary cover subsalt complex and a forecast of Kovykta field terrigenous reservoir productivity. *Tekhnologii sejsmorazvedki* [Seismic Survey Technologies], 2003, no. 2, pp. 38–43. (In Russian).

18. Skuzovatov M.Y. Petroleum potential estimating of Parphenovo horizon of Angara-Lena step central parts on the basis of seismic, well-log, and petrophysical data complex analysis. *Interehkspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 2014, vol. 2, no. 1, pp. 137–141. (In Russian).

Критерии авторства

Кокарев П.Н., Диких И.А., Сердюкова В.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Kokarev P.N., Dikikh I.A., Serdyukova V.A. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 550.831

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-93-105>

ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ И ИНВЕРСИИ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИСПЕРСИОННОГО И РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗОВ

© В.С. Канайкин^а, Е.Х. Турутанов^б, Б. Буянтогтох^с

^аИркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

^бИнститут земной коры СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

^сИнститут астрономии и геофизики МАН,
13343, Монголия, г. Улан-Батор, ул. Ж. Лхагасурэнгийн, 42.

РЕЗЮМЕ. Цель. Изучение возможностей регрессионного и дисперсионного анализов при количественной интерпретации гравитационных аномалий. **Методы.** Рассматриваются возможности использования метода главных компонент и сингулярного разложения матриц при трансформации и инверсии гравитационных полей на примере Уланбаатарской и Налайхской межгорных впадин (Монголия). **Результаты.** С использованием регрессионного и дисперсионного анализов получены количественные характеристики мощности рыхлых отложений исследуемых структур. Максимальная мощность отложений Уланбаатарской впадины составляет 100–200 м, Налайхской – 600 м. Полученные оценки подтверждаются результатами инверсии гравитационного поля исследуемых впадин с помощью других методов. **Выводы.** Результаты трансформации и инверсии гравитационного поля осадочных отложений малой мощности (100–200 м) при замене бесконечных по протяженности прямоугольных призм на параллелепипеды, ограниченные по простиранию, меняются незначительно и остаются в первоначальных пределах (при сохранении величины недостатка плотности осадков). У впадины, заполненной мощной толщей осадков, происходит значительное увеличение этой характеристики (с 600 м до 900 м) при сохранении недостатка плотности осадков. Подобные вариации осадочной толщи исследуемых объектов можно объяснить величиной угла видимости отдельно взятых геометрических тел, аппроксимирующих линзы осадков. Применение метода главных компонент аппарата дисперсионного анализа при выделении региональной и локальной (остаточной) составляющих гравитационного поля и инверсии аномального поля силы тяжести с использованием сингулярного разложения матриц регрессионного метода исследований вполне возможно и достаточно эффективно.

Ключевые слова: гравитационная аномалия, инверсия, метод главных компонент, сингулярное разложение матриц.

Информация о статье. Дата поступления 5 марта 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Канайкин В.С., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б. Особенности трансформации и инверсии гравитационного поля с применением дисперсионного и регрессионного анализов // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 93–105. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-93-105

^аКанайкин Виктор Степанович, доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Института недропользования, e-mail: kanvs@yandex.ru

Viktor S. Kanaikin, Associate Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems of the Institute of Subsoil Use, e-mail: kanvs@yandex.ru

^бТурутанов Евгений Хрисанфович, доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией комплексной геофизики, тел.: (3952) 428792, e-mail: tur@crust.irk.ru

Evgeny Kh. Turutanov, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Head of the Laboratory of Complex Geophysics, tel.: (3952) 428792, e-mail: tur@crust.irk.ru

^сБуянтогтох Базарин, аспирант, научный сотрудник, тел.: 8 (97611) 458024, e-mail: bazaryn_b@yahoo.com
Buyantogtokh Bazarin, Postgraduate, Scientific Researcher, tel.: 8 (97611) 458024, e-mail: bazaryn_b@yahoo.com

FEATURES OF GRAVITY FIELD TRANSFORMATION AND INVERSION USING VARIANCE AND REGRESSION ANALYSES

© V.S. Kanaikin^a, E.Kh. Turutanov^b, B. Buyantogtokh^c

^aIrkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

^bInstitute of the Earth's crust SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

^cInstitute for Astronomy and Geophysics MAS,
42 J. Lhagaasurengiin, Ulaanbaator 13343, Mongolia

ABSTRACT. The **Purpose** of the paper is to study the possibilities of regression and variance analyses under quantitative interpretation of gravitational anomalies. **Methods.** On example of the Ulanbaatar and Nalaikh intermountain depressions (Mongolia) the application possibilities of the principal component method and the pseudo-inverse algorithm under the transformation and inversion of gravitational fields are considered. **Results.** The quantitative characteristics of the thickness of loose deposits of the structures under investigation are obtained through regression and variance analyses. The maximum thickness of the deposits of the Ulanbaatar depression is 100-200 m whereas the Nalaikh depression is 600 m. The obtained estimates are confirmed by the results of investigated depression gravitational field inversion by other methods. **Conclusions.** The transformation and inversion results of the gravitational field of sedimentary deposits of low thickness (100-200 m) when replacing infinite length rectangular prisms by the parallelepipeds limited along the strike vary insignificantly and remain within the initial limits (while maintaining the magnitude of the lack of density). The depression filled with the sediments of great thickness features a significant increase in this characteristic (from 600 m to 900 m) while maintaining the lack of sediment density. Such variations in the sedimentary thickness of the studied objects can be explained by the magnitude of the visibility angle of individual geometric bodies approximating precipitation lenses. It is found that the application of the method of principal components of the variance analysis in the identification of the regional and local (residual) components of the gravitational field and the inversion of the anomalous gravity field using a pseudo-inverse algorithm of the regression research method are quite possible and effective.

Keywords: *gravitational anomaly, inversion, method of principal components, pseudo-inverse algorithm*

Article info. Received 5 March 2018; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Kanaikin V.S., Turutanov E.Kh., Buyantogtokh B. Features of gravity field transformation and inversion using variance and regression analyses. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 93–105. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-93-105 (In Russian).

Введение

Количественная интерпретация гравитационных данных предполагает использование различных способов обработки исходных материалов. В частности, при интерпретации потенциальных геофизических полей достаточно часто применяются методы регрессионного и дисперсионного анализов. Эффективность применения этих методов для количественной интерпретации гравитационных данных зависит от сложности геологической ситуации изучаемого района,

а следовательно, и от характера геофизического поля [1–4]. В рамках данной публикации рассматриваются возможности использования аппарата дисперсионного и регрессионного анализов для трансформации и инверсии гравитационных полей Уланбаатарской и Налайхской впадин (Монголия) с целью оценки мощности заполняющих их осадочных отложений.

Изучение строения Налайхской впадины вызывает закономерный интерес не только с научной, но и с практиче-

ской точки зрения, поскольку с ней связано промышленное месторождение бурых углей. Она находится в 35 км к юго-востоку от Тольской (Уланбаатарской) депрессии на пересечении Хонхоринской системы грабен и Дэндэйского глубинного разлома, которые контролируют эту структуру.

Средняя плотность рыхлых отложений Уланбаатарской впадины принята по данным результатов многочисленных денситометрических измерений и составляет 2100 кг/м^3 [5]. Вмещающие впадину породы Хэнтэйской серии представлены в основном нижнекарбовыми песчаниками и алевролитами. Величина плотности коренных пород принимается равной 2700 кг/м^3 . Недостаток плотности осадочного чехла относительно пород фундамента, оцененный по денситметрическим замерам и по корреляции сейсмических и

гравитационных данных, для Налайхской впадины составляет $-0,35 \text{ г/см}^3$ [5–7].

Материалы и методы исследования

Схемы исходных гравитационных полей Уланбаатарской и Налайхской впадин [5, 7] приведены на рис. 1, а; 2, а. Анализируя характер гравитационного поля Уланбаатарской впадины, можно отметить, что форма поля достаточно сложная.

На площади этой впадины фиксируется две аномалии силы тяжести: одна расположена в западной части, вторая – на северо-востоке. Наиболее интенсивная аномалия силы тяжести расположена в северо-восточной части впадины. Максимальная амплитуда перепада гравитационного поля на данном участке составляет 14 мГал.

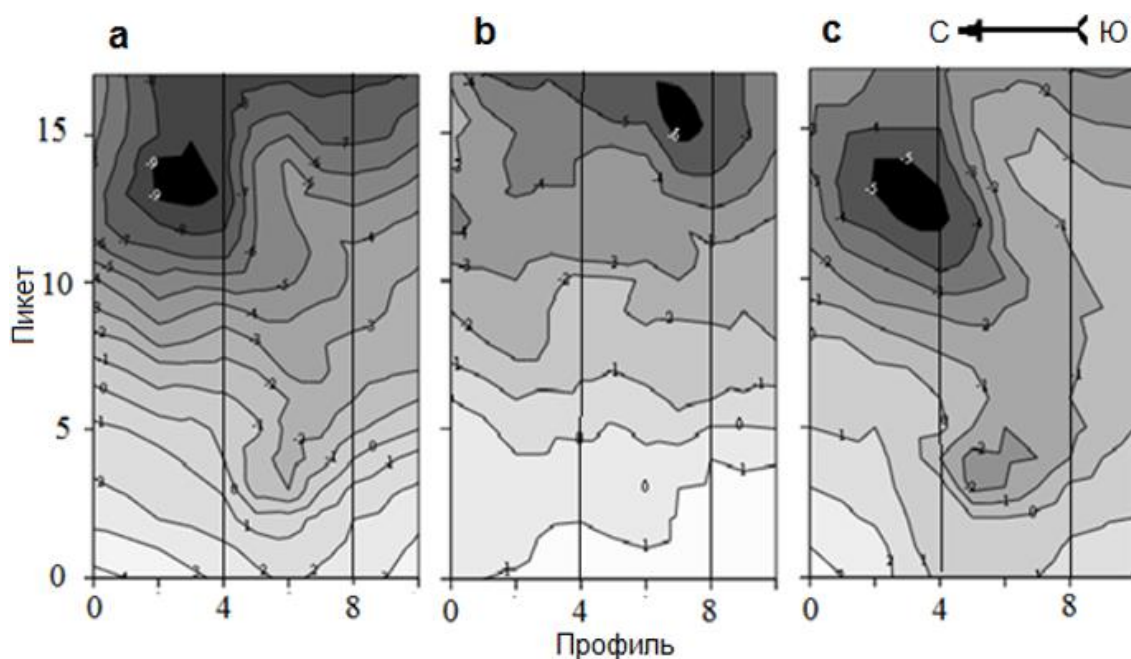


Рис. 1. Схемы составляющих гравитационного поля в редукции Буге Уланбаатарской впадины

(в относительном уровне, сечение через 1 мГал):

а – исходное поле; б – первая главная компонента или региональный фон;
с – остаточные локальные аномалии

Fig. 1. Diagrams of gravitational field components in the Bouguer reduction of the Ulanbaatar depression

(at a relative level, cross section in 1 mGal):

а – initial field; б – first major component or regional background;
с – residual local anomalies

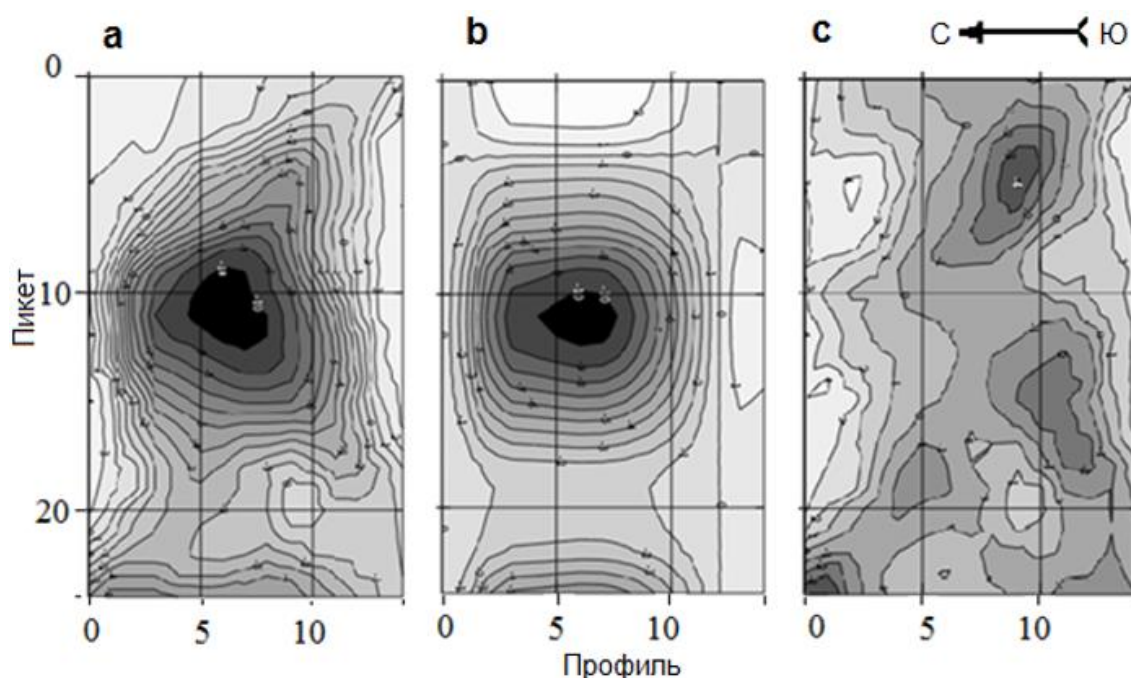


Рис. 2. Схемы составляющих гравитационного поля в редукции Буге Налайхской впадины

(в относительном уровне, сечение через 1 мГал):

a – исходное поле; b – первая главная компонента соответствующая локальной аномалии; c – региональный фон

Fig. 2. Diagrams of gravitational field components in the Bouguer reduction of the Nalaikh depression

(at a relative level, section in 1 mGal):

a – initial field; b – first major component corresponding to a local anomaly; c – regional background

Выделение остаточных аномалий в чистом виде (трансформация поля силы тяжести) с целью их дальнейшей количественной интерпретации – достаточно сложная процедура, в результате которой необходимо рассчитать региональный фон гравитационного поля и ввести соответствующие поправки в исходное поле.

Анализ гравитационного поля Налайхской впадины позволяет констатировать, что на ее площади существует одна интенсивная крупная аномалия силы тяжести изометричной формы, расположенная в центральной части впадины. Эта аномалия обусловлена, судя по геологическим данным, отложениями мелового и четвертичного возраста. Максимальная амплитуда перепада гравитационного поля на данном участке

составляет 12 мГал. Для уверенного формирования локальной аномалии необходимо рассчитать региональную составляющую гравитационного поля. Расчет регионального фона как для Уланбаатарской, так и для Налайхской впадины был выполнен с помощью дисперсионного анализа. Для этого использовался метод главных компонент [1, 3, 4, 8].

С целью реализации данного этапа интерпретации исходные гравитационные поля каждого объекта были оцифрованы и представлены в виде двухмерных массивов. На основе этих данных для каждого объекта были рассчитаны ковариационные матрицы. Анализ ковариационных матриц позволяет определить главные независимые факторы и далее рассчитать интенсивность и характер

регионального фона как для Уланбаатарской, так и для Налайхской впадины (рис. 1, б; 2, с). Методика подобной обработки описывается в источниках [3, 8]. Забегая вперед, отметим, что для Уланбаатарской впадины первая главная компонента обусловлена региональным фоном (см. рис. 1, б), а для Налайхской котловины главная компонента связана собственно с локальной аномалией (см. рис. 2, с). Таким образом, локальная аномалия для Налайхской впадины рассчитывается непосредственно по итогам обработки методом главных компонент, и для ее выделения не нужно знать значения регионального фона, который, по-видимому, связан со второй компонентой.

Не останавливаясь на описании теории метода главных компонент, отметим, что первая главная компонента считается связанной, как правило, с региональным фоном [2–4], а точнее, с неким геологическим фактором, объясняющим наибольшую энергию и, соответственно, наибольший вклад в анализируемое гравитационное поле. Но иногда может быть и наоборот, то есть если амплитуда, ширина и протяженность локальной аномалии – ее энергия – значительно больше, чем аналогичная характеристика региональной составляющей, то первая главная компонента будет связана не с региональным фоном, а с локальной составляющей поля силы тяжести. Исходя из анализа аномалий Буге Уланбаатарской и Налайхской впадин (см. рис. 1, 2), именно эти два случая описывают соотношение вышеперечисленных характеристик гравитационных полей исследуемых депрессий.

Для того чтобы убедиться, что первая главная компонента соответствует либо региональной, либо локальной составляющей гравитационного поля, необходимо для каждой из этих впадин рассчитать осредненный характер регионального поля и локальной аномалии, то есть определить их осредненный энерге-

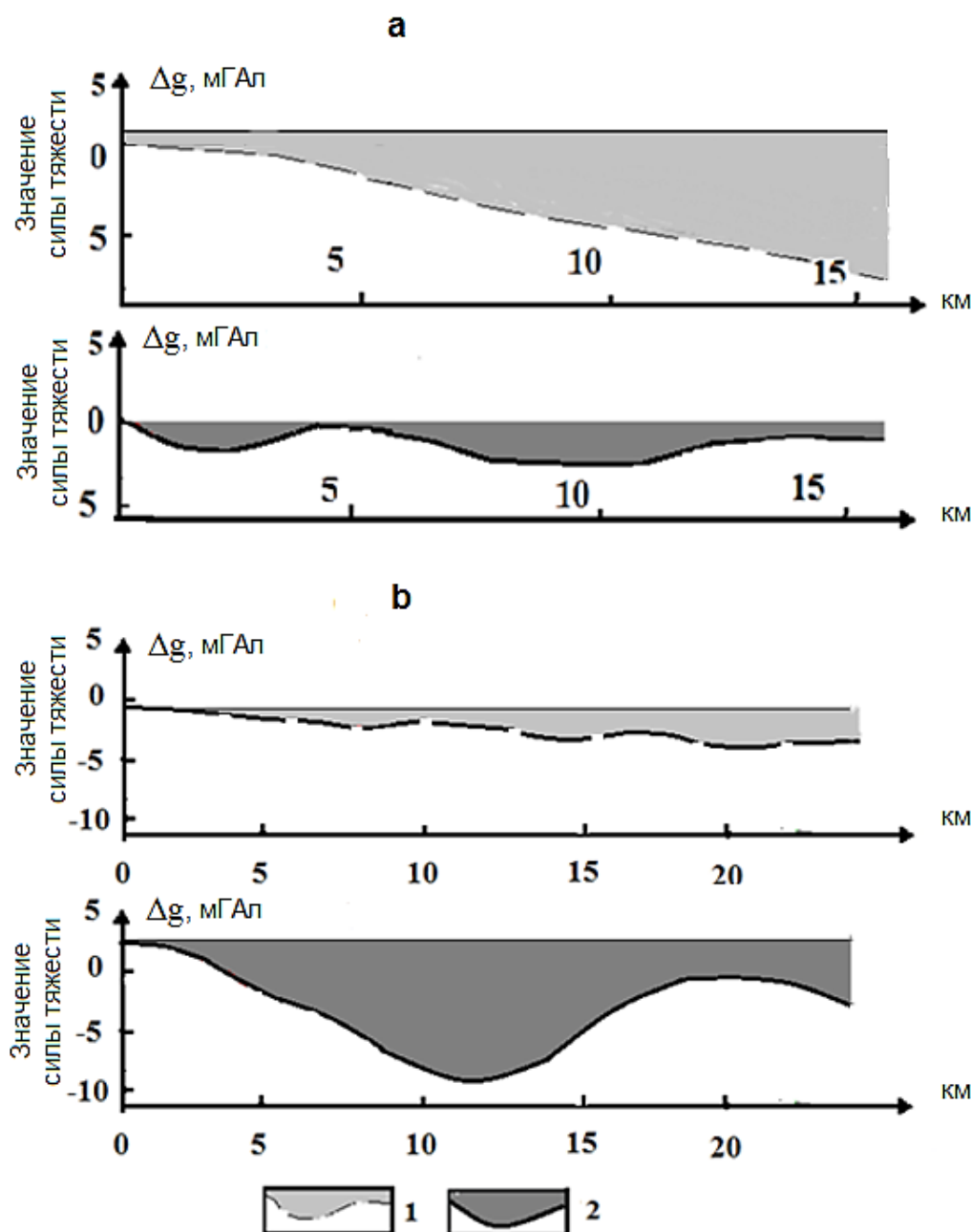
тический сигнал через дисперсию этого сигнала. Расчет осредненного энергетического сигнала можно осуществить по известным формулам, используя при этом, соответственно, фоновые и локальные составляющие анализируемых гравитационных полей:

$$G_i^{\text{фон}} = \sum_i^N \sum_j^M \frac{\Delta g_{i,j}^{\text{фон}}}{M}; G_i^{\text{лок}} = \sum_i^N \sum_j^M \frac{\Delta g_{i,j}^{\text{лок}}}{M},$$

где i – номер пикета; j – номер профиля; N, M – количество пикетов и профилей соответственно; $\Delta g_{i,j}^{\text{фон}}, \Delta g_{i,j}^{\text{лок}}$ – значения фонового или локального гравитационного поля на i пикете, j профиля.

Если энергетическую оценку гравитационного поля (его региональной или локальной составляющих) осуществлять только по одному отдельно взятому профилю, то полученная величина будет некорректна, поскольку такой профиль может пересекать как экстремальную часть аномалии, так и ее периферическую часть. При этом искусственно будет подчеркнута интенсивность либо локальной (остаточной), либо фоновой составляющей гравитационного поля. На рис. 3 приводятся региональные поля и локальные аномалии, представленные осредненными энергетическими характеристиками, соответствующими всей площади исследований.

На этом рисунке видно, что площадь, ограниченная графиком регионального фона и условной горизонтальной линией (см. рис. 3, а), несколько больше, чем площадь, ограниченная графиком локальной аномалии силы тяжести и некой горизонтальной линией. Это подтверждает тот факт, что вклад в суммарную дисперсию исходного гравитационного поля Уланбаатарской впадины от регионального фона больше, чем вклад от локальной аномалии силы тяжести.



**Рис. 3. Графический анализ характера гравитационного поля
Уланбаатарской впадины (а) и Налайхской впадины (б):**

- 1 – средняя по площади «энергия» сигнала регионального фона;
2 – средняя по площади «энергия» локальной аномалий силы тяжести

**Fig. 3. Graphical analysis of gravitational field nature
of the Ulanbaatar depression (a) and the Nalaikh depression (b):**

- 1 – regional background signal “energy” average in area;
2 – local gravity anomaly “energy” average in area

Анализируя данные, представленные на рис. 3, б, можно отметить, что площадь, ограниченная графиком регионального фона и некой ограничивающей

прямой, значительно меньше, чем подобная ей площадь, ограниченная графиком локальной аномалий силы тяжести. Это является свидетельством неравноценно-

сти вкладов сигналов от регионального фона и локальной аномалии силы тяжести в суммарную дисперсию исходного гравитационного поля Налайхской впадины.

Выполненные расчеты позволяют утверждать, что для Уланбаатарской впадины первая главная компонента связана с региональным фоном, а для Налайхской котловины главная компонента обусловлена собственно локальной аномалией поля силы тяжести.

Следующим этапом интерпретации является инверсия остаточных гравитационных аномалий, то есть определение мощности осадочных отложений Уланбаатарской и Налайхской впадин.

Решение обратной задачи осуществлено с использованием регрессионных методов [8–10]. Количественные вычисления выполнены в полном объеме по системе интерпретационных профилей для каждой из двух площадей исследования. Более подробно нами рассмотрены расчеты по одному интерпретационному профилю для каждой площади. Для этого выбраны наиболее характерные профили, проходящие через центральные аномальные зоны исследуемых участков. Например, профиль 5 (для Уланбаатарской) и профиль 7 (для Налайхской) впадин. Длина этих профилей приблизительно равна 20000 и 24000 м соответственно.

С целью количественного анализа для каждого интерпретационного профиля сформированы линейные математические модели в виде системы уравнений $\Delta G_{\text{лок}} \approx B \cdot \bar{a}$, где B – матрица плана размерностью $n \times k$; $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ – вектор-столбец определяемых коэффициентов (в нашем случае это значение избыточных плотностей тел правильной геометрической формы, выполняющих роль аномалиеобразующих объектов); n – количество пикетов; k – число аномалиеобразующих объектов, которыми аппроксимирован изучаемый геологический разрез.

Для вычисления коэффициентов $\bar{a} = [a_1, \dots, a_k]$ использован алгоритм, основанный на применении сингулярного разложения матрицы [8–10]. Сингулярное разложение позволяет выбирать решения с учетом реальной точности вычислений и исходных данных путем отбрасывания элементов разложения, соответствующих сингулярным числам, меньшим заданной точности наблюдений гравитационного поля данной съемки.

Решение обратной задачи гравirazведки заключается в определении морфологии плотностных неоднородностей, слагающих геологический разрез. Для этого необходимо аппроксимировать изучаемый геологический разрез набором правильных геометрических тел. Геологическая структура в районе пятого профиля Уланбаатарской впадины была представлена в виде набора из 32 горизонтальных прямоугольных призм ($k = 32$), что соответствует четырем слоям по восемь призм в каждом слое (рис. 4, а) [9, 11]. Размеры каждой призмы приняты следующие: ширина (горизонтальная мощность параллельно интерпретационному профилю) – 2500 м, длина (горизонтальная мощность перпендикулярно интерпретационному профилю) бесконечна, вертикальная мощность – 50 м. Геологический разрез по седьмому профилю Налайхской впадины был представлен в виде набора из 48 горизонтальных прямоугольных призм ($k = 48$), что соответствует шести слоям по восемь призм в каждом слое (рис. 4, б). Размеры каждой призмы приняты следующие: ширина – 3000 м, длина бесконечна, вертикальная мощность – 100 м.

Увеличение количества слоев, то есть увеличение вертикальной мощности аномалиеобразующего объекта, приводит к уменьшению избыточной плотности призм. Поэтому, изменяя число и геометрические размеры призм, можно аппроксимировать различные по объему геологические объекты.

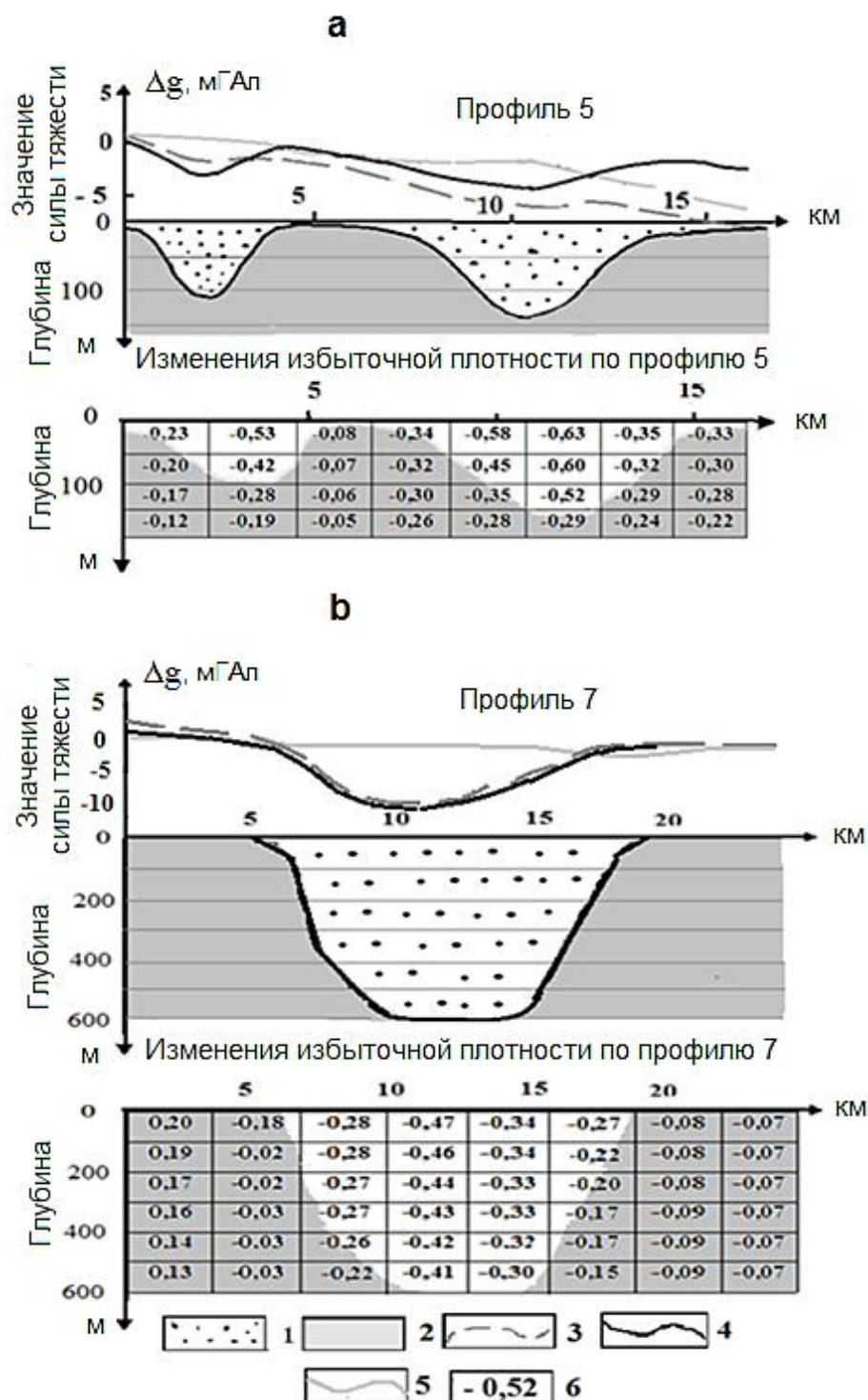


Рис. 4. Интерпретационные разрезы по Уланбаатарской (а) и Налайхской (б) впадинам:
1 – осадочные отложения; 2 – вмещающие породы; 3 – графики силы тяжести исходного поля ΔG в редукции Буге, мГал; 4 – графики локальных аномалий силы тяжести, мГал; 5 – графики регионального фона $\Delta G_{\text{рег}}$, мГал; 6 – избыточные плотности прямоугольных призм, г/см³

Fig. 4. Interpretation sections along the Ulanbaatar (a) and Nalaikh (b) depressions:
1 – sedimentary deposits; 2 – host rocks; 3 – gravity graphs of the initial field ΔG in the Bouguer reduction, mGal; 4 – graphs of local anomalies of gravity, mGal; 5 – graphs of the regional background $\Delta G_{\text{рег}}$, mGal; 6 – excess densities of rectangular prisms, g/cm³

Далее для n точек профиля и k базисных функций в первом и втором случае были рассчитаны соответствующие матрицы плана (B) размерностью $n \times k$. Каждый элемент b_{ij} этой матрицы выражает эффект j -й прямоугольной призмы ($j = 1, \dots, k$) в i -й точке профиля ($i = 1, \dots, n$), причем плотность такой призмы принята равной 1.

Значения избыточной (недостаточной в данном случае) плотности призм, аппроксимирующих осадочные отложения Уланбаатарской впадины, вычисленные с помощью математического аппарата регрессионного анализа [3, 7], приведены на примере интерпретационного профиля 5 и варьируют в пределах $(-0,4 \dots -0,6)$ г/см³ (см. рис. 4, а). Эта плотность близка к оцененной ранее [1] по данным денситометрии величине и соответствует мощности кайнозойских осадков в 150–200 м.

Недостаток плотности осадочных отложений Налайхской котловины, вычисленный аналогичным способом вдоль седьмого интерпретационного профиля, находится в интервале $-0,30 \dots -0,35$ г/см³ (см. рис. 4, б) и близок к оценке, полученной по денсиметрическим замерам и по корреляции сейсмических и гравитационных данных [1, 4, 6]. Эта величина соответствует толщине (мощности) осадочной линзы, равной 600 м.

Как было сказано выше, для аппроксимации линз осадочных отложений впадин использован набор правильных геометрических тел, а именно прямоугольных призм. Поскольку горизонтальная призма не имеет ограничения по одной из своих осей (например, по оси Y , направленной перпендикулярно профилю наблюдения), а параллелепипед имеет ограниченный размер по этой оси, то объем призмы существенно отличается от объема параллелепипеда. Эта особенность их геометрии может сказаться на результатах расчетов избыточных плотностей аномалиеобразующих

тел. Отсюда возникает необходимость проверить, каким образом изменится результат решения обратной задачи гравиразведки, если геологический разрез аппроксимировать не призмами, а параллелепипедами.

С этой целью были осуществлены дополнительные определения избыточных (недостаточных) плотностей обеих впадин, при вычислении которых вместо горизонтальных призм использовался набор параллелепипедов с такими же, за исключением оси Y , горизонтальными размерами. Он был ограничен от +500 до -500 м, то есть размер параллелепипеда для Уланбаатарской впадины равен $2500 \times 1000 \times 50$ м, а для Налайхской – $3000 \times 1000 \times 150$ м.

Вычисления показали, что для Уланбаатарской впадины результаты инверсии гравитационного поля изменяются незначительно. Вертикальная мощность осадочных отложений остается в прежних пределах (при сохранении величины недостатка плотности) и составляет 150–200 м. Для Налайхской впадины происходит значительное увеличение вертикальной мощности осадков с 600 м до 900 м при сохранении избыточной плотности в диапазоне $-0,30 \dots -0,35$ г/см³ (рис. 5). Увеличение вертикальной мощности осадочных отложений Налайхской впадины и незначительное изменение толщины осадков для Уланбаатарской впадины можно объяснить величиной угла видимости отдельно взятого параллелепипеда. При небольших глубинах залегания подошвы геологического тела (150–200 м) угол видимости призмы или параллелепипеда близок к 180° , то есть значительная часть аномалиеобразующей массы расположена где-то в стороне и слабо влияет на величину гравитационного поля в пункте его измерения. При увеличении глубины подошвы тела до 600 м и более один из горизонтальных размеров параллелепипеда, а именно его длина по оси $Y = 1000$ м, становится

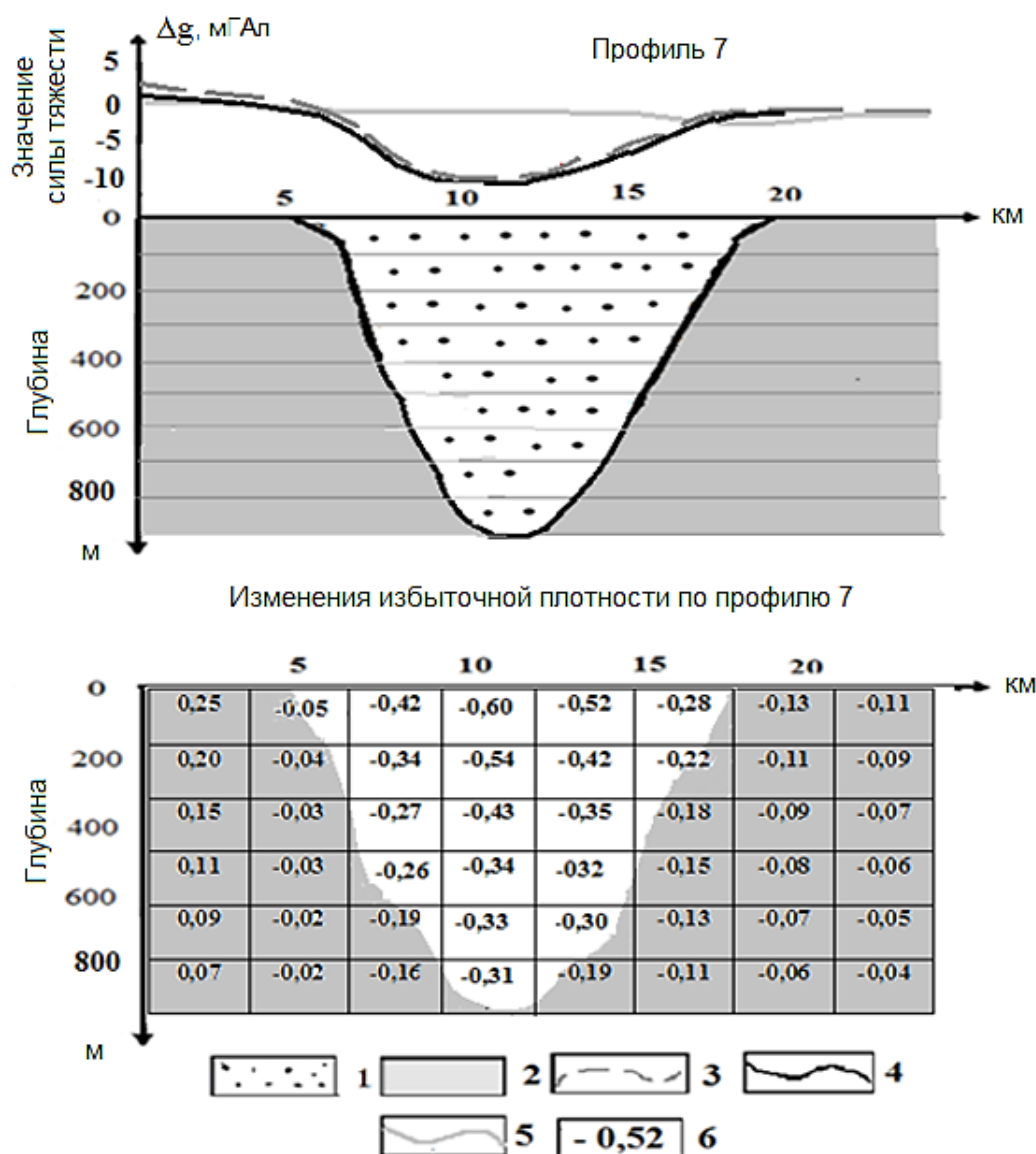


Рис. 5. Интерпретационный разрез по профилю 7 Налайхской впадины:
1 – осадочные отложения; 2 – вмещающие породы; 3 – графики силы тяжести
исходного поля ΔG в редукции Буге, мГал; 4 – графики локальных аномалий силы
тяжести, мГал; 5 – графики регионального фона $\Delta G_{\text{рег}}$, мГал; 6 – избыточные
плотности прямоугольных призм, г/см³

Fig. 5. Interpretation section along the profile 7 of the Nalaikh depression:
1 – sedimentary deposits; 2 – host rocks; 3 – gravity graphs of the initial field ΔG
in the Bouguer reduction, mGal; 4 – graphs of local anomalies of gravity, mGal;
5 – graphs of the regional background $\Delta G_{\text{рег}}$, mGal; 6 – excess densities
of rectangular prisms, g/cm³

соизмеримой с этой величиной, а угол видимости стремится к значению 90–60°. Избыточные массы в этом случае находятся не где-то сбоку от точки расчета или наблюдения, а практически под ней и поэтому оказывают максимальное

влияние на результат измерений или вычислений гравитационного поля.

Другими словами, можно сказать, что в рассматриваемом примере объем призм значительно больше, чем объем параллелепипедов. Поэтому избыточная

плотность параллелепипедов, необходимая для обеспечения наблюдаемого поля силы тяжести без изменения последнего, должна увеличиться. То есть для того, чтобы величина избыточной плотности линзы осадков сохранялась неизменной, количество параллелепипедов, аппроксимирующих ее, необходимо увеличить. Введение этих дополнительных тел приводит к увеличению мощности исследуемого объекта и, следовательно, к снижению расчетных значений его плотности до величины, определенной при вычислениях с помощью призм.

Результаты интерпретации гравиметрических данных

Результаты интерпретации гравитационных аномалий отражены на схемах составляющих гравитационного поля Уланбаатарской (см. рис. 1) и Налайхской (см. рис. 2) впадин, на схеме графического анализа характера составляющих гравитационного поля (см. рис. 3), на интерпретационных разрезах (см. рис. 4, 5).

Анализ характера составляющих аномального поля силы тяжести Уланбаатарской и Налайхской впадин позволяет сделать вывод, что гравитационное поле Уланбаатарской впадины более сложное, чем таковое для Налайхской котловины. Его региональная составляющая вносит более весомый вклад в суммарное гравитационное поле, чем локальные аномалии. Наоборот, для Налайхской котловины наибольший вклад в результирующее поле осуществляет собственно локальная аномалия, что показывают результаты обработки исходных полей методом главных компонент (см. рис. 3). В целом характер регионального гравитационного фона и локальных аномалий как для Уланбаатарской (см. рис. 1), так и для Налайхской впадины (см. рис. 2) по своей интенсивности и морфологии не противоречит геологическому строению изучаемых объектов, что подтверждает возможность

использования факторного анализа для выделения регионального гравитационного фона с целью решения задач структурной геологии.

Применение метода главных компонент для выделения региональной составляющей при интерпретации гравитационных полей приводит к надежной оценке этой составляющей в случае существенного преобладания ее энергии (дисперсии) над энергией (дисперсией) локальных аномалий [2, 3]. Но, как было отмечено ранее, возможна и обратная ситуация, когда наблюдается преобладание энергии (дисперсии) локальной аномалий над энергией (дисперсией) региональной составляющей.

Решение обратной задачи гравirazведки для Уланбаатарской и Налайхской впадин осуществлялось методами регрессионного анализа, а именно сингулярного разложения матриц. Этот метод требует аппроксимации изучаемого геологического разреза набором правильных геометрических тел, в нашем случае набором горизонтальных прямоугольных призм или параллелепипедов. Использование аппарата сингулярного разложения матриц позволяет осуществлять выбор «регуляризованных» решений с учетом заданной точности полевых наблюдений [9, 10].

В результате решения линейной обратной задачи гравirazведки (см. рис. 4, 5) были получены количественные характеристики мощности рыхлых отложений Уланбаатарской и Налайхской впадин и данные о морфологических особенностях погруженных частей кристаллического фундамента.

Вычисления показали, что замена прямоугольных призм на параллелепипеды в качестве аномалиеобразующих объектов приводит к тому, что результаты инверсии гравитационного поля для Уланбаатарской впадины изменяются незначительно. Для Налайхской впадины происходит значительное увеличение

вертикальной мощности осадков с 600 до 900 м и более. Геометрические и физические характеристики осадочных отложений хорошо совпадают с аналогичными характеристиками, полученными с использованием других методик интерпретации [5–7], выполненных в двумерном варианте для Уланбаатарской впадины и в трехмерном – для Налайхской.

Выводы

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что применение дисперсионного и регрессионного анализов, а именно метода главных компонент и сингулярного разложения матриц при трансформации и инверсии гравитационного поля для условий межгорных впадин, вполне приемлемо и дает хорошие результаты.

Библиографический список

1. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. М.: Изд-во РГГРУ, 2009. 230 с.
2. Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных / пер. с англ. М.: Мир, 1977. 600 с.
3. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: Недра, 1986. 337 с.
4. Яновская Т.Б., Прохорова Л.Н. Обратные задачи геофизики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 214 с.
5. Арвисбаатар Н., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б., Цэндсүрэн Д. Глубинное строение Уланбаатарской впадины по гравиметрическим данным (Монголия) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 5. С. 53–61.
6. Вахромеев Г.С. К вопросу формирования физико-геологических моделей месторождений полезных ископаемых Монгольской Народной Республики // Вопросы геологии и металлогении Восточной Монголии. Улан-Батор: Изд-во МонГУ, 1979. С. 236–244.
7. Дугараа П., Арвисбаатар Н. Петроплотностная характеристика пород Жанчивланского рудного узла и его окрестностей // Вопросы геологии и полезных ископаемых Центральной и Восточной Монголии. Улан-Батор: Изд-во МонГУ, 1982. С. 11–13.
8. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математического вычисления. М.: Мир, 1980. 280 с.
9. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 192 с.
10. Канайкин В.С., Суботин А.А., Булнаев А.И. Сравнительный анализ двух методов количественной интерпретации аномалий потенциальных геофизических полей // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 2. С. 95–100.
11. Успенский Д.Г. Гравиразведка. Л.: Недра, 1968. 230 с.

References

1. Blokh Yu.I. *Interpretatsiya gravitatsionnykh i magnitnykh anomalii* [Interpretation of gravity and magnetic anomalies]. Moscow: Russian State Geological Prospecting University Publ., 2009, 230 p. (In Russian).
2. Devis Dzh. Statistics and data analysis in geology. 1977, 600 p. (Russ. ed.: Devis Dzh. *Statistika i analiz geologicheskikh dannykh*. Moscow: Mir Publ., 600 p.).
3. Nikitin A.A. *Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoi informatsii*

[Theoretical principles of geophysical information processing]. Moscow: Nedra Publ., 1986, 337 p. (In Russian).

4. Yanovskaya T.B., Prokhorova L.N. *Obratnye zadachi geofiziki* [Inverse problems of geophysics]. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University Publ., 2004, 214 p. (In Russian).

5. Arvisbaatar N., Turutanov E.Kh., Buyantogtokh B., Tsendsuren D. Deep structure of Ulanbaatarsky depression by gravimetric data (Mongolia). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 5, pp. 53–61. (In Russian).

6. Vakhromeev G.S. *K voprosu formirovaniya fiziko-geologicheskikh modelei mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh Mongol'skoi Narodnoi Respubliki* [On formation of physico-geological models of mineral deposits of the Mongolian People's Republic]. *Voprosy geologii i metallogenii Vostochnoi Mongolii* [Problems of Geology and Metallogeny of Eastern Mongolia]. Ulan-Bator: National University of Mongolia Publ., 1979, pp. 236–244. (In Russian).

7. Dugaraa P., Arvisbaatar N. *Petroplotnostnaya kharakteristika porod Zhanchivlanskogo rudnogo uzla i ego okrestnostei* [Petro-density characteristics of rocks of the Zhanchivlansky ore cluster and its environs]. *Voprosy geologii i*

poleznykh iskopaemykh Tsentral'noi i Vostochnoi Mongolii [Problems of Geology and Minerals in Central and Eastern Mongolia]. Ulan-Bator: National University of Mongolia Publ., 1982, pp. 11–13. (In Russian).

8. Forsait Dzh., Mal'kol'm M., Mouler K. Machine methods of mathematical calculations, 1980, 280 p. (Russ. ed.: *Mashinnye metody matematicheskii vychislenii*). Moscow: Mir Publ., 1980, 280 p.

9. Vakhromeev G.S., Davydenko A.Yu. *Modelirovanie v razvedochnoi geofizike* [Modelling in exploration geophysics]. Moscow: Nedra Publ., 1987, 192 p. (In Russian).

10. Kanaikin V.S., Subotin A.A., Bulnaev A.I. Comparative analysis of two quantitative methods for potential geophysical field anomaly interpretation. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.]. 2017, vol. 40, no. № 2, pp. 95–100. (In Russian).

11. Uspenskii D.G. *Gravirazvedka* [Gravity Prospecting]. Leningrad: Nedra Publ., 1968, 230 p. (In Russian).

Критерии авторства

Канайкин В.С., Турутанов Е.Х., Буянтогтох Б. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Kanaikin V.S., Turutanov E.Kh., Buyantogtokh B. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Оригинальная статья / Original article

УДК 553.04+549.09

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-106-118>

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ – НЕОБХОДИМЫЙ ЭЛЕМЕНТ ГЕОМЕТРИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

© В.И. Снетков^a

^aИркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. Цель. Обосновать необходимость учета фрактальности среды при оконтуривании рудных зон, тел, проведении геометризации месторождений полезных ископаемых. Найти условия совместимости детерминистской теории слоисто-струйчатого геохимического поля профессора П.К. Соболевского в условиях фрактальной среды. **Методы.** Обзор литературных источников и исследований в области синергетики, фрактальной геометрии. Математическая обработка и анализ фрактальных геологических систем. **Результаты.** В самоорганизующейся динамической системе доминируют нелинейные связи, а положение каждого фрактала в условиях «детерминированного хаоса» случайно и непредсказуемо. Существующее детерминистское представление о месторождении как о геохимическом поле (П.К. Соболевский), удовлетворяющем условию конечности, однозначности, непрерывности, плавности и имеющем слоисто-струйчатую структуру, входит в противоречие с дискретностью распределения полезных компонентов, неоднозначностью данных (для конкретной точки пространства). Противоречие можно устранить, если рассматривать геохимическое поле не в точке, а в некотором объеме, относя содержание полезного компонента или другие показатели к центру этого объема. Метод изолиний вошел практически во все области научного знания, он нагляден, достаточно информативен, и от него нельзя отказаться. **Выводы.** Методическая основа геометризации, включающая системный подход в научных исследованиях, должна быть дополнена и фрактальным анализом, ныне являющимся неотъемлемой частью синергетики. Это позволит более рационально подходить к обоснованию и выбору технологических решений для отработки геологического объекта. При адаптации теории геохимического поля не к точке, а к определенному объему пространства недр возникает случайная компонента, поэтому оперировать необходимо со случайными пространственными полями, где главенствующими становятся вероятностные методы, теория случайных функций, геостатистика.

Ключевые слова: геометризация, фрактал, аттрактор, фрактальная размерность, россыпь, плотик, параметры разведочной сети.

Информация о статье. Дата поступления 7 августа 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Снетков В.И. Фрактальный анализ – необходимый элемент геометризации месторождений полезных ископаемых // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 106–118. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-106-118

FRactal Analysis as a Key Element of Mineral Deposit Geometrization

© V.I. Snetkov^a

^aIrkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

^aСнетков Вячеслав Иванович, доктор технических наук, зав. кафедрой прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем, тел.: 8 (3952) 405362, e-mail: snetkov@istu.edu

Vyacheslav I. Snetkov, Doctor of technical sciences, Head of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems, tel.: 8 (3952) 405362, e-mail: snetkov@istu.edu

ABSTRACT. The **Purpose** of the paper is to prove the need for accounting the environment fractality under countouring of ore zones, bodies and geometrization of mineral deposits as well as to find the conditions of compatibility of the deterministic theory of the stratified geochemical field of the professor P. K. Sobolevsky in the conditions of fractal environment. **Methods.** The study uses the review of literature and researches in the field of synergetics and fractal geometry as well as mathematical processing and analysis of fractal geological systems. **Results.** The self-organizing dynamic system features the domination of nonlinear relationships, while the location of each fractal in the conditions of "the determined chaos" is random and unpredictable. The existing deterministic idea of a deposit as a geochemical field (P. K. Sobolevsky) meeting the condition of finitude, unambiguity, continuity, smoothness and having a stratified structure is in a conflict with the distribution discreteness of useful components, ambiguity of data (for a specific point of space). The contradiction can be eliminated if a geochemical field is considered in some volume rather than in a point and the content of a useful component or other indicators are referred to the center of this volume. The method of isolines is introduced in practically all areas of scientific knowledge. It is evident, informative enough and it is impossible to refuse it. **Conclusions.** The fractal analysis should be added to the methodical basis of geometrization with a system approach in scientific researches as its element since it is an integral part of synergetics today. It will allow a more rational justification and selection of technological decisions for geological object development. When the theory of geochemical field is adapted to a certain volume of subsoil rather than to a point we obtain a random component. Therefore, it is necessary to operate random spatial fields where probabilistic methods, the theory of stochastic functions and geostatistics predominate.

Keywords: geometrization, fractal, attractor, fractal dimension, placer, placer bedding, exploration network parameters

Article info. Received 7 August 2018; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Snetkov V.I. Fractal analysis as a key element of mineral deposit geometrization. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 106–118. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-106-118 (In Russian).

Введение

Методическая основа geometrization предполагает наличие совокупности теоретических и практических положений, позволяющих решать вопросы сбора, изучения, обработки, систематизации, обобщения информации, математического или графического представления основных закономерностей строения месторождения полезного ископаемого в его разведанной части.

В этом процессе важную роль играет степень приближения знаний науки о природных и геологических процессах, фундаментальные законы которых или хотя бы их формализация являются залогом успешного построения адекватных моделей (геологических, геометрических, математических, имитационных, прогнозических и др.) [1, 2]. Однако в генезисе сложных геологических систем пока остается много вопросов, на которые либо нет ответа, либо классические подходы к которым не обеспечивают требуемой точности решения поставленных задач

[3, 4]. Особенно это касается вопросов оконтуривания, подсчета запасов на месторождениях редких и цветных металлов, драгоценных камней.

Методы исследования

Дадим краткий обзор опубликованной литературы, связанной с фрактальным анализом. В 60-х годах прошлого века в результате научных поисков мировой науки И.Р. Пригожиным была разработана теория самоорганизации в неравновесных системах, впоследствии названная Г. Хакеном как «Синергетика» [5], а также фрактальная геометрия, разработанная Б.Б. Мандельбротом [6]. Эти теории давно ждали, и они оказались к месту не только в термодинамике, математике, химии, физике, астрономии [7–10], но и в геологических науках, где получили интенсивное развитие [11–19] и др. В работе Л.А. Пучкова и В.Д. Аюрова [20] убедительно показана целесообразность и допустимость синергетического подхода не только в геологии, но также и в горных науках, в том числе и в геомет-

рии недр, одной из целей которой является изучение закономерностей строения месторождений полезных ископаемых и распределения в них как полезных, так и вредных компонентов. Для этого геометризация должна базироваться на синергетике [5], теории диссипативных структур [21], фрактальном анализе и частично на единой теории всех взаимодействий в веществе [7], концепции системного движения материи [17].

Основоположителем фракталов считается математик Б.Б. Мандельброт, опубликовавший с 1967 года ряд фундаментальных работ и впоследствии открывший множество, носящее теперь его имя. Понятие фрактала выделяет объекты, обладающие структурами различных масштабов, как больших, так и малых, и отражающие иерархический принцип их организации и самоорганизации. В этом понятии содержится важные моменты – система должна быть нелинейной, кроме того, необходима некоторая идеализация действительности: фрактальные объекты самоподобны и дискретны. Б.Б. Мандельброт открыл принцип, с помощью которого можно получить множество самоподобных фигур на различных уровнях иерархически организованных структур.

Для реализации указанного принципа кроме обратной связи требуется нелинейная зависимость между результатом и начальным значением; иначе говоря, динамический закон вида [6]

$$x_{n+1} = f(x_n)$$

должен быть отличным от простой пропорциональности. Одним из тестов, определяющих нелинейность системы, являются числа Фейгенбаума [5, 6].

Нелинейная последовательность α_n в случае, когда происходит удвоение периода, должна удовлетворять простому закону:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \lim \left(\frac{\alpha_n - \alpha_{n-1}}{\alpha_{n+1} - \alpha_{n-1}} \right) = \delta,$$

где δ – число Фейгенбаума, $\delta = 4,6692016609...$

Принцип самоподобия наблюдается не только в физических или нелинейных термодинамических процессах, но и в приближенном виде в природе: в линиях берегов морей, рек и ручейков, в очертаниях облаков и деревьев, в турбулентном потоке жидкости, в иерархической организации живых систем. Процессы самоорганизации неравновесных систем характерны для многих физических, математических, химических задач и не только. Они касаются хаоса (случайности) и порядка (закономерности), их конкуренции или сосуществования в природных системах [1–3, 10, 22]. Все они имеют одно общее начало – конкуренцию нескольких центров (аттракторов) за доминирование на плоскости. Любая начальная точка x_0 в процессе самоорганизации либо приходит к тому или другому центру, либо находится на границе, не приняв определенное решение. С изменением управляющего параметра самоорганизующейся системы (гидродинамические условия, условия выветривания, автоволны Земли, геотектоника и др.) изменяются и области, принадлежащие аттракторам, а вместе с ними и их границы [13–17]. В этом случае, как теоретически и графически показано в работе Х.-О. Патгейна и П.Х. Рихтера [6], простых границ между территориями (фракталами) в результате такого соперничества не бывает. Чаще всего имеет место их фирменное переплетение и непрерывающаяся борьба даже за самые малые участки. Именно в этих пограничных областях образуются так называемые множества Жюлиа и происходит переход от одной формы существования вещества к другой: от порядка к хаосу, но хаосу, внутри которого действуют законы синергетического устройства Природы.

Рудные, россыпные и другие месторождения полезных ископаемых не являются в своем роде исключениями из

перечня объектов, к которым возможно применение перечисленных теорий, поскольку они сами – суть Земли, Природы и Вселенной [11–17]. Так, например, на космических снимках [1, 3] в зональном спектре русловых речных отложений зернистого материала отчетливо выделяется сегрегация так называемой «струи» на отдельные элементы, которые можно отождествить с «линзами», состоящими из еще более мелких объектов. Подобная картина отмечается и в распределении содержаний полезных компонентов на многих месторождениях (коренных и россыпных) независимо от их генезиса [15, 18, 19].

Если перенести эту парадигму на процессы накопления вещества, например, в алмазонасной россыпи, то здесь просматривается очень много параллелей. Система «россыпь» может быть отнесена к категории диссипативных, поскольку с течением времени происходит потеря энергии и вещества и объем элемента фазового пространства сокращается, причем фазовый поток сжимает элементарный объем в одних направлениях (борта россыпи) и растягивает его в других (по простиранию) [22]. Это, в свою очередь, предполагает множество возможных направлений эволюции диссипативного процесса и нелинейность среды [21]. Последнее свойство является существенным ограничителем сферы действия детерминистских (классических) позиций, евклидовой геометрии и предполагает иные оценки и подходы к прогнозированию природных процессов.

Результаты

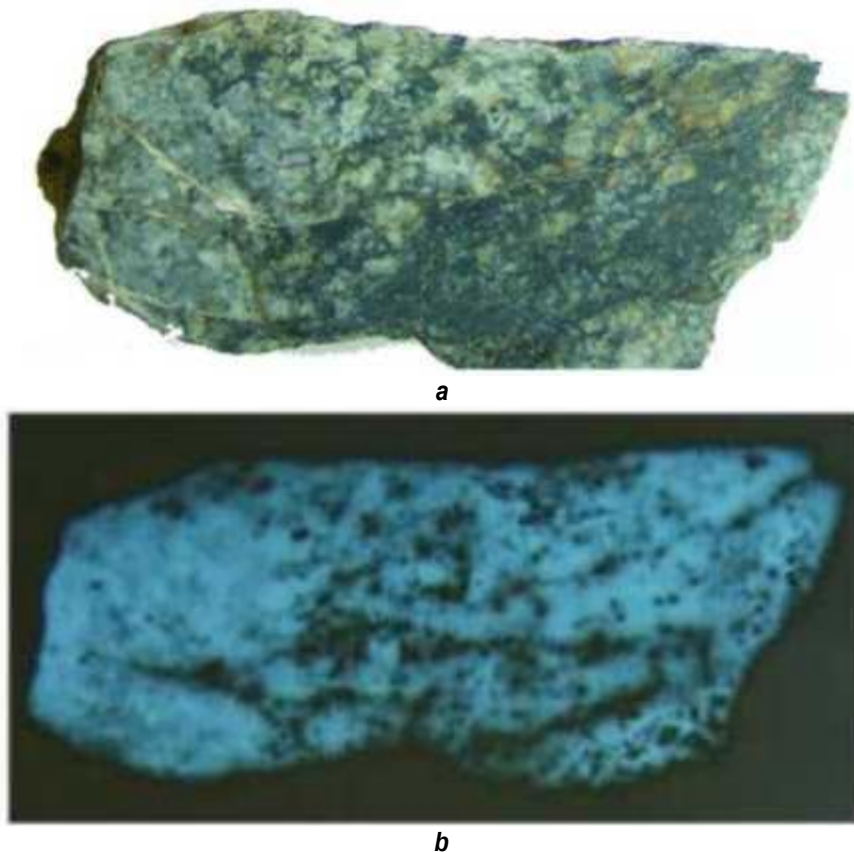
Приведем два примера.

1. На рис 1, а. представлен образец и характер распределения урана (рис. 1, б, радиография, темное – радиоактивные минералы), а на рис. 2 – проявления и аномалии урана, полученные по разным масштабам съемки [19]. Нетрудно заметить схожесть картины распределения урана в образце с рудопроявлениями, но

уже в другом иерархическом уровне, в другом масштабе проявления. Такое строение, самоподобие с позиций синергетики можно квалифицировать как фрактальное.

2. Структура плотика влияет на размещение полезного компонента в теле россыпи так, что «форма и размеры обогащенных участков полностью определяются распределением, формой и размерами углублений в поверхности плотика» [23]. Это классическое определение весьма близко к принципам синергетического устройства микро- и макромира. На рис. 3 показана пространственная структура плотика одной из алмазонасных россыпей Западной Якутии, представленная чередованием углублений (помечены звездочками) и выступов с эффектом вложенности (показано пунктиром) и размерами в плане от 10 до 1000 м. Характерная общая деталь – данные структуры повторяются в разных масштабах (эффект «скейлинга» [5, 6, 9, 16]).

Поперечные размеры пропорциональны основной вмещающей структуре – плотику, что позволяет говорить о его влиянии на геометрию вложенных структур (углублений, «западений», «карманов» [24] и т. п.). Из этого можно предположить, что структура плотика обладает признаками самоорганизующейся, нелинейной системы [5]. Степень нелинейности системы оценивается фрактальной размерностью D геометрического объекта [9]. Размерность, определенная клеточным методом [10] по разведочным линиям, изменяется в диапазоне от 0,4 до 0,77, в среднем составляет 0,56 (показатель Херста $H = 0,44$). Этот результат представляет практический интерес для разведочных работ, поскольку при $H \approx 0,5$ имеет место фрактальное броуновское движение (хаос, случайный процесс), и, соответственно, этот фактор следует учитывать при обосновании плотности сети для определенной стадии разведочных работ.



**Рис. 1. Катаклазированный биотитизированный гранит с гнездово-вкрапленными и прожилковыми выделениями уранинита и настурана в биотит-хлоритовых агрегатах
Проявление Авдеевское. Бульбухтинский ураново-рудный узел
Длина образца – 10 см (по В.В. Корнакову [17])**

a – приполировка образца; b – радиографическое изображение

**Fig. 1. Cataclastic biotitized granite with the nested veinlet-impregnated depositions of uraninite and nasturan in biotite – chlorite units
Avdeevskoye manifestation. Bulbukhtinsky uranium-ore cluster
Sample length is 10 cm (according to V.V. Kornakov [17])
a – sample surfacing; b – radio graphic image**

По представленному на рисунке участку россыпи проведено определение фрактальной размерности плотика и тенденция ее изменения по падению россыпи (рис. 4) по данным линий детальной разведки (ДР).

Полученная фрактальная размерность плотика позволяет сделать вывод, что характер его изменения вкрест простирания россыпи по 12 линиям (начало и конец участка россыпи) ближе к состоянию антиперсистентности, то есть к непредсказуемости тенденции изменения отметок между соседними точками (шурфами), что означает: разведочная

сеть шурфов по разведочным линиям слишком разрежена и не выявляет локальные закономерности изменения отметок плотика вкрест простирания россыпи (аналогичное заключение получено с использованием разностных методов и теории случайных функций). На этом основании можно предполагать существование в плотике других, масштабно более мелких подобных структур [16], которые являются латентными (скрытыми) и могут быть выявлены только при значительном сгущении разведочной сети или при постановке специальных методов исследований.

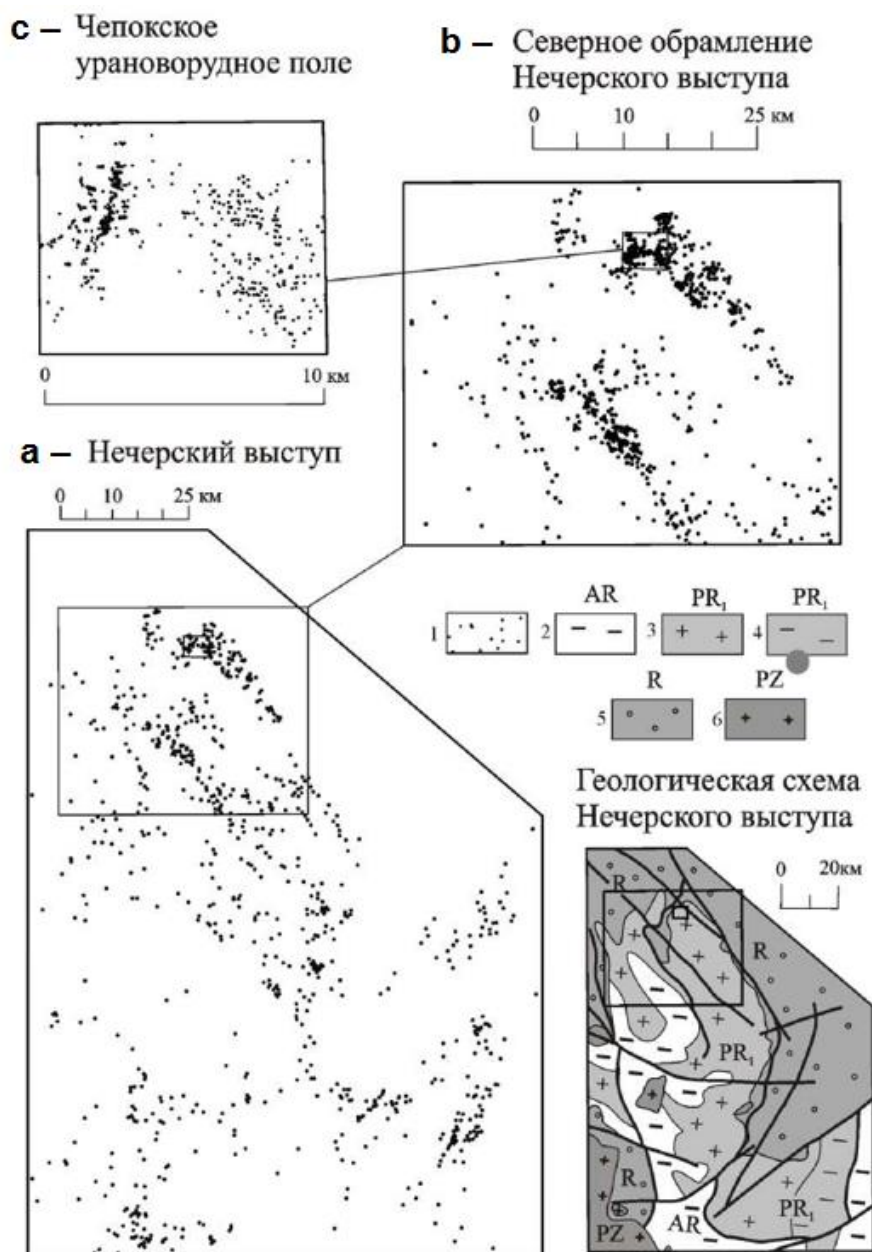


Рис 2. Фактографический материал по урану:

1 – проявления и аномалии урана по данным: а – аэрогаммасъемки масштаба 1:200000, б – геологическое доизучение площадей и прогнозно-поисковых работ масштаба 1:50000, с – поисковых работ масштаба 1:10000–1:5000; 2–4 архей-раннепротерозойское кристаллическое основание: 2 – архейские гранитоиды и гранито-гнейсы, 3 – раннепротерозойские гранитоиды, 4 – раннепротерозойские углеродисто-терригенные комплексы; 5 – субплатформенные углеродисто-карбонатно-терригенные образования рифея; 6 – гранитоиды палеозойской тектоно-магматической активизации (по В.В. Корнакову [19])

Fig. 2. Factual material on uranium:

1 – uranium manifestations and anomalies according to the data: а – airborne gamma survey of scale 1:200000, б – additional site exploration and prospecting and exploration works of scale 1:50000, с – exploration works of scale 1:10000–1:5000; 2–4 Archean – early Proterozoic crystalline basement: 2 – Archean granitoids and granite-gneiss, 3 – early Proterozoic granitoids, 4 – early Proterozoic carbonaceous terrigenous complexes; 5 – subplatform carbonaceous and carbonate and terrigenous Riphean formations; 6 – granitoids of Paleozoic tectonic-magmatic activation (according to V.V. Kornakov [19])

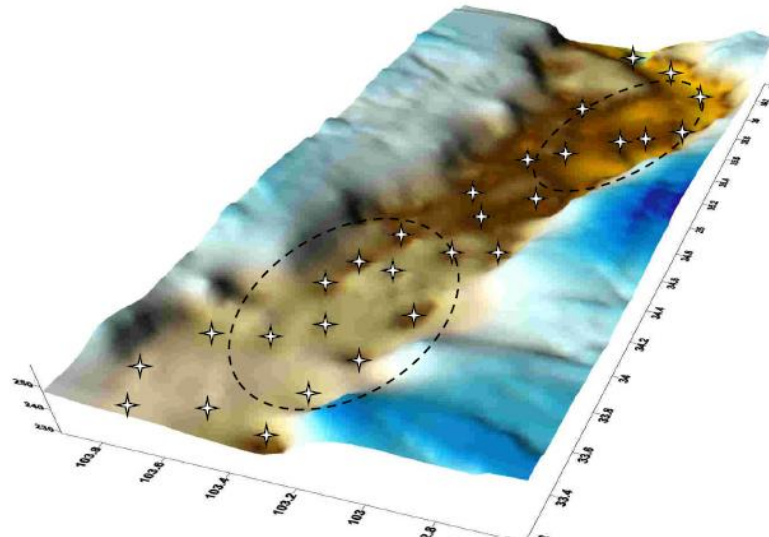


Рис. 3. Объемное изображение плана плотика по участку 1 Широкий
Fig. 3. 3D image of the placer bedding plan for the site Shirokiy 1

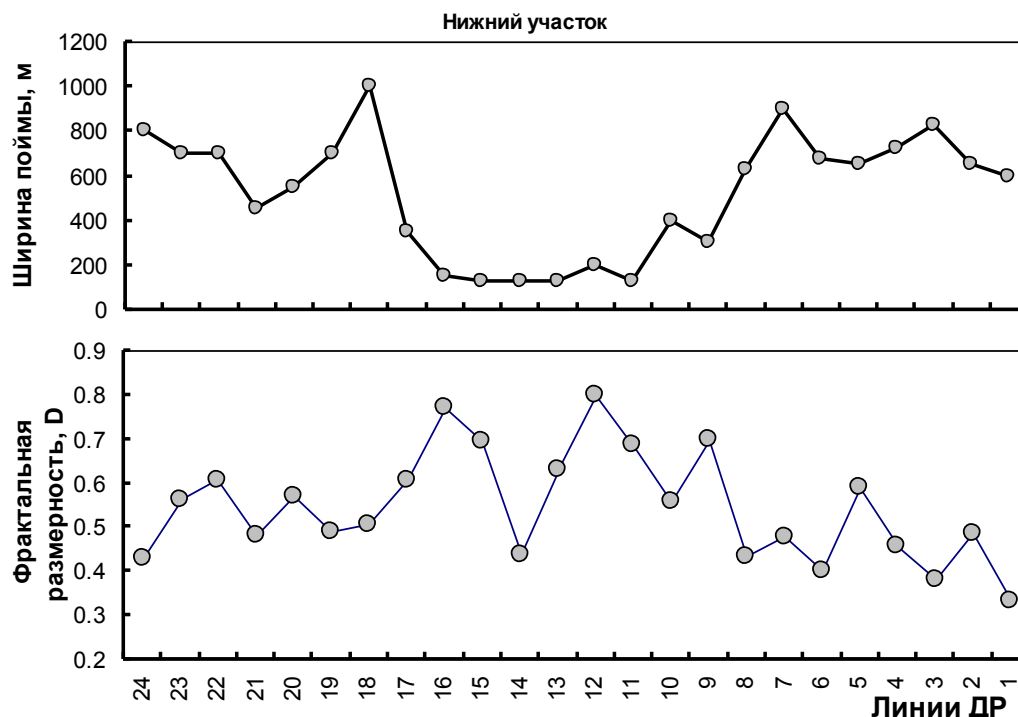


Рис. 4. Зависимость фрактальной размерности плотика от ширины пойменной части россыпи
Fig. 4. Dependence of fractal dimension of placer bedding on the width of alluvial deposit inundated part

Другая особенность: на графике просматривается связь фрактальной размерности плотика с шириной пойменной части россыпи (коэффициент корреляции равен -0,615). С увеличением ширины поймы фрактальная размерность уменьшается, а это означает рост антиперсистентности динамики изменения отметок

плотика (происходит бессистемная частая смена понижения и повышения отметок), то есть усиливается степень изрезанности поверхности коренного ложа россыпи по данным детальной разведки. Увеличение плотности разведочной сети шурфов вкост простирания может уменьшить антиперсистентность, тем

самым улучшить детализацию поведения коренного ложа и увеличить вероятность встречи различного рода западений плотика, являющихся центрами аккумуляции алмазонасных отложений.

Обсуждение

Одним из главных аттракторов (фокусов) [5, 6, 9, 10] является источник питания россыпи, обычно это кимберлитовая трубка с фрактальным размещением кристаллов алмазов, второй аттрактор находится в бесконечности. Граница влияния первого аттрактора (трубки) – внешний контур делювиальной россыпи, окаймляющей ее. Аллювиальная россыпь, непосредственно примыкающая к делювиальной, является зоной влияния второго аттрактора, также находящегося в бесконечности. Здесь возникает множество фракталов, связанных с одним, двумя и более устойчивыми и неустойчивыми аттракторами [3, 6, 9]. В этом случае фрактальный характер приобретают практически все компоненты россыпи: форма, очертания береговой линии, песчано-гравийно-галечные отложения, их гранулометрический состав, рельеф плотика, пространственное положение зерен полезного и сопутствующих компонентов [3].

С позиций фрактальной геометрии углубления в плотике выполняют роль устойчивых и неустойчивых аттракторов (фокусов), которые в силу своих особых свойств [5] являются центрами притяжения кристаллов алмазов, удельный вес которых существенно отличается от удельного веса вмещающих пород. В соответствии с определением, данным Г. Шустером (1988), аттракторы можно квалифицировать как «странные аттракторы» или аттракторы Лоренца. Основные их признаки – «локализация в ограниченной области фазового пространства, чувствительность к начальным условиям, структурная устойчивость и типичность» [22]. Они естественным образом возникают в динамической самоорганизующейся нелинейной системе, «когда

фазовый поток сжимает элементарный объем в одних направлениях и растягивает его в других» [6, с.110], то есть в момент формирования россыпи. В соответствии с теорией «странного аттрактора» траектория точки, попавшая в его зону влияния, чувствительна к начальным условиям, хаотична, притягивается к ограниченной области в фазовом пространстве, объем этой области стремится к нулю. Отсюда следует, что частицы полезного компонента (алмаза), попадая в зону влияния обычного аттрактора (аттрактор Лоренца), должны стремиться к его центру или в случае бифуркации аттрактора попадать на орбиты предельных циклов, образуя локальные скопления, стремящиеся к минимизации своих размеров [22]. Форма таких скоплений должна быть изометричной или пропорциональной геометрии вмещающей структуры. В соответствии с принятой терминологией эти скопления можно определить как фрактальные кластеры или «гнезда» [3].

В результате появляются отдельные участки россыпи, локальные обособления кристаллов алмазов (гнезда) и других компонент, захваченные аттракторами в пределах своих зон влияния и имеющие также фрактальный характер (строгое математическое доказательство именно захвата содержится в работе Г. Шустера [22]). Форма границ каждого фрактала определяется начальными условиями, геометрией вмещающей структуры, результатами борьбы двух аттракторов за зоны влияния, особенностями турбулентной (во времени и пространстве) среды водно-аллювиального потока.

Следовательно, методика разведочных работ должна быть построена таким образом, чтобы была возможность выявлять форму, границы фракталов и вложенных фрактальных структур, а число выявленных «гнезд» позволяло бы оценить среднее содержание и среднюю

гранулометрию по разведочной линии, близкие к их математическому ожиданию. В противном случае всегда будет существовать эффект недоразведанности, выражающийся в нестабильности оценок средних содержаний в разведанных блоках или в коэффициенте намыва, превышающем 1. При этом самые изощренные математические методы, в том числе и моделирование, не позволят создавать высокоточные адекватные геологические модели. Очевидно, что без постановки экспериментальных работ эту задачу решить непросто. Из математических вероятностных методов, возможно, подойдет метод, называемый «Задача Бюффона», но это требует особого изучения.

Из сказанного следует, что методическая основа геологоразведочных работ должна быть дополнена и фрактальным анализом, ныне являющимся неотъемлемой частью синергетики. Если этого не делать и дальше, то ни сложные методы, ни геометризация месторождения не позволят существенно улучшить прогнозные оценки и подсчет запасов. Методическая же основа геометризации, включающая системный подход в научных исследованиях, также должна быть дополнена элементами фрактального анализа.

Заключение

Чем могут быть полезны эти дополнения в практическом плане?

Во-первых, они дают понимание того, что в самоорганизующихся динамических системах, к которым относятся месторождения полезных ископаемых, доминируют нелинейные связи, распределение полезных и других компонентов носит фрактальный характер, а положение каждого фрактала в условиях «детерминированного хаоса» случайно и непредсказуемо, поэтому любая модель и методика разведки месторождений должны строиться с учетом отмеченных обстоятельств.

Во-вторых, позволяют более рацио-

нально подходить к обоснованию и выбору технологических решений для разработки геологического объекта.

В-третьих, являются поводом для дальнейшего развития и уточнения теорий образования месторождений полезных ископаемых, распределения полезных компонентов в рудных телах, сочетающих известные фундаментальные представления с синергетическим подходом.

В-четвертых, необходимо понимание того, что существующее детерминистское представление о месторождении как о простом геохимическом поле (П.К. Соболевский) [25], удовлетворяющем условию конечности, однозначности, непрерывности, плавности и имеющему слоисто-струйчатую структуру, входит в противоречие с дискретностью распределения полезных компонентов, неоднозначностью данных (для конкретной точки пространства). Этим противоречием объясняются многие несоответствия и расхождения при оценке месторождений и запасов.

Какой видится выход из данной ситуации? Метод изолиний вошел практически во все области научного знания, он нагляден, достаточно информативен, и вряд ли от него можно отказаться. Ряд авторов считает, что данное противоречие можно устранить, если рассматривать геохимическое поле не в точке, а в некотором объеме, относя содержание полезного компонента или другие показатели к центру этого объема. В этом случае получается псевдонепрерывность и однозначность, дающая возможность применять метод изолиний. Однако в таком случае кроме детерминированной составляющей возникает случайная компонента и оперировать необходимо со случайными пространственными полями, где главенствующими становятся вероятностные методы, теория случайных функций, геостатистика. К сожалению, специалисты-производственники пока к такому шагу не готовы.

Библиографический список

1. Снетков В.И. Разработка методов квалитетрии недр при моделировании и количественной оценке качества источника георесурсов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 8. № 406/08-05 – 04.03.05. 79 с.
2. Снетков В.И. Концепция прогнозирования запасов в сложноструктурных месторождениях // Маркшейдерия и недропользование. 2006. № 4 (24). С. 19–24.
3. Снетков В.И., Тальгамер Б.Л., Дементьев С.А. Гнездообразное распределение алмазов в россыпи – основная причина неподтверждения запасов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 8. № 409/08-05 – 05.04.05. 79 с.
4. Филонюк В.А., Дубовская И.А. О некоторых причинах низкой эффективности геолого-методического обеспечения современных поисково-разведочных и эксплуатационных технологий в золотодобывающей отрасли // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3 (56). С. 29–43.
5. Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / пер. с англ. Ю.А. Данилова; под ред. Ю.Л. Климонтовича. М.: Мир, 1985. 423 с.
6. Патгейн Х.-О., Рихтер П.Х. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем / пер. с англ. П.В. Малышева, А.Г. Сивака; под ред. А.Н. Шарковского. М.: Мир, 1993. 176 с.
7. Герловин И.Л. Основы единой теории всех взаимодействий в веществе. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 432 с.
8. Могилевский Э.И. Фракталы на Солнце: монография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 152 с.
9. Федер Е. Фракталы / пер. с англ. Ю.А. Данилова, А. Шукурова. М.: Мир, 1991. 254 с.
10. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории: учеб. пособие / пер. с англ. Т.Э. Кренкеля, А.Л. Соловейчика; под ред. Т.Э. Кренкеля. М.: Постмаркет, 2000. 350 с.
11. Горяинов П.М. О структурно-энергетической эволюции континентальной коры и некоторых металлогенических следствиях // Доклады Академии наук СССР. 1986. Т. 287. № 6. С. 1446–1451.
12. Иванюк Г.Ю., Горяинов П.М., Егоров Д.Г. Введение в нелинейную геологию. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1996. 200 с.
13. Дмитриевский А.Н., Володин И.А., Шипов Г.И. Энергоструктура Земли и геодинамика. М.: Наука, 1993. 54 с.
14. Боганик Н.С. К познанию закономерностей развития земной коры и геотермальных полей стратисферы. М.: Наука, 1972. 84 с.
15. Бунин Г.Г. О ранговых уровнях самоорганизации эндогенных кольцевых образований в структуре литосферы в связи с геотектонической периодичностью Земли // Геологические основы прогнозирования и поисков полезных ископаемых Дагестана. Махачкала: Изд-во Дагест. фил. АН СССР, 1985. С. 66–83.
16. Филонюк В.А. Фундаментальные закономерности многоуровневого структурообразования в геологической среде // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2001. № 10. С. 68–75.
17. Бунин Г.Г. Рудно-магматическая зональность и автоволновый процесс // Гидрогеология и гидрогеохимия подземных вод Дагестана. Махачкала: Изд-во Дагест. фил. АН СССР, 1984.

С. 147–153.

18. Филонюк В.А. Об автономном и упорядоченном распределении золота в кварцево-жильных зонах // Геология рудных месторождений. 1983. № 1. С. 111–114.

19. Корнаков В.В. Исследование закономерностей структурной организации золотого и уранового оруденения // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2010. № 2 (37). С. 193–203.

20. Пучков Л.А, Аюров В.Д. Синергетика горно-геологических процессов. 2-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГГУ, 2004. 264 с.

21. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах.

Введение в теорию диссипативных структур / пер. с нем. А.С. Доброславского; под ред. Ю.Л. Климонтовича. М.: Мир, 1979. 279 с.

22. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение / пер. с англ. Ф.М. Израйлева и др.; под ред. А.В. Гапонова-Грехова, М.И. Рабиновича. М.: Мир, 1988. 240 с.

23. Билибин Ю.А. Основы геологии россыпей. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 463 с.

24. Бондаренко Н.Г. Образование, строение и разведка россыпей. М.: Недра, 1975. 56 с.

25. Калинин В.М., Руденко В.В. Геометрия недр: учебник для студ. выс. учеб. завед. Ч. 1. Теоретические основы геометрии недр. Новочеркасск: Изд-во ЮРГПУ (НПИ), 2014. 354 с.

References

1. Snetkov V.I. Development of methods of mineral resources qualimetry under modeling and quantitative evaluation of quality of the source of georesources. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2005, no. 8, 406/08-05 – 04.03.05, 79 p. (In Russian).

2. Snetkov V.I. The concept of reserve forecasting in complex structure fields. *Marksheideriya i nedropol'zovanie* [Surveying and Subsoil Use], 2006, no. 4 (24), pp. 19–24. (In Russian).

3. Snetkov V.I., Tal'gamer B.L., Dement'ev S.A. Nested distribution of diamonds in placers as the main reason for non-confirmation of reserves. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2005, no. 8, 409/08-05 – 05.04.05, 79 p. (In Russian).

4. Filonyuk V.A., Dubovskaya I.A. On some reasons of low efficiency of geological and methodological support of modern prospecting, exploration and

operation technologies in gold industry. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2016, no. 3 (56), pp. 29–43. (In Russian).

5. Haken H. Advanced synergetics: instability hierarchies of self-organizing systems and devices, Springer, 1983, 371 p. (Russ. ed.: Xaken G. *Sinergetika: ierarkhii neustoichivostei v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroistvakh*. Moscow: Mir Publ., 1985, 423 p.).

6. Peitgen H.-O., Richter P.H. The beauty of fractals. Images of complex dynamical systems. Berlin, 1986, 199 p. (Russ. ed.: Patgein Kh.-O., Rikhter P.Kh. *Krasota fraktalov. Obrazy kompleksnykh dinamicheskikh system*. Moscow: Mir Publ., 1993, 176 p.).

7. Gerlovin I.L. *Osnovy edinoi teorii vsekh vzaimodeistvii v veshchestve* [Fundamentals of the unified theory of all interactions in matter]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1990, 432 p. (In Russian).

8. Mogilevskii E.I. *Fraktaly na Solntse* [Fractals on the Sun]. Moscow: FIZMATLIT, 2001, 152 p. (In Russian).

9. Feder J. *Fractals*. NY, 1988, 221 p. (Russ. ed.: Feder E. *Fraktaly*. Moscow: Mir Publ., 1991, 254 p.).

10. Krownover R.M. Introduction to fractals and chaos. Burlington, 1995, 306 p. (Russ. ed.: Kronover R.M. *Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh*. Moscow: Post-market Publ., 2000, 350 p.).

11. Goryainov P.M. On the structural and energy evolution of the continental crust and some metallogenic consequences. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Doklady the USSR Academy of Sciences], 1986, vol. 287, no. № 6, pp. 1446–1451. (In Russian).

12. Ivanyuk G.Yu., Goryainov P.M., Egorov D.G. *Vvedenie v nelineinuyu geologiyu* [Introduction to nonlinear Geology]. Apatity: Kola scientific center of the Russian Academy of Sciences Publ., 1996, 200 p. (In Russian).

13. Dmitrievskii A.N., Volodin I.A., Shipov G.I. *Energostruktura Zemli i geodinamika* [Energy structure of the Earth and geodynamics]. Moscow: Nauka Publ., 1993, 54 p. (In Russian).

14. Boganik N.S. *K poznaniyu zakonov razvitiya zemnoi kory i geotermal'nykh polei stratisfery* [To the knowledge of development laws of the earth's crust and stratispheric geothermal fields]. Moscow: Nauka Publ., 1972, 84 p. (In Russian).

15. Bunin G.G. *O rangovykh urovnyakh samoorganizatsii endogennykh kol'tsevykh obrazovaniy v strukture litosfery v svyazi s geotektonicheskoi periodichnost'yu Zemli* [On ranked levels of endogenous circular formation self-organization in the lithosphere structure due to

tectonic periodicity of the Earth]. *Geologicheskie osnovy prognozirovaniya i poiskov poleznykh iskopaemykh Dagestana* [Geological bases of forecasting and prospecting of mineral resources in Dagestan]. Makhachkala: Dagestan branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1985, pp. 66–83. (In Russian).

16. Filonyuk V.A. Fundamental regularities of multi-layer structure formation in geological environment. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2001. № 10. S. 68–75. (In Russian).

17. Bunin G.G. *Rudno-magmaticheskaya zonal'nost' i avtovolnovyi protsess* [Ore-magmatic zoning and autowave process]. *Gidro-geologiya i gidrogeokhimiya podzemnykh vod Dagestana* [Hydrogeology and Chemistry of Dagestan Groundwaters]. Makhachkala: Dagestan branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1984, pp. 147–153. (In Russian).

18. Filonyuk V.A. On autonomous and ordered distribution of gold in quartz-vein zones. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 1983, no. 1, pp. 111–114. (In Russian).

19. Kornakov V.V. Research of laws of the structural organization of gold and uranium ore. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2010, no. 2 (37), pp. 193–203. (In Russian).

20. Puchkov L.A., Ayurov V.D. *Sinergetika gornogeologicheskikh protsessov* [Synergetics of geological processes]. Moscow: Moscow State Mining University Publ., 2004, 264 p. (In Russian).

21. Ebeling Von Dr.W. *Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen: Eine*

Einführung in die Theorie dissipativer Strukturen. Leipzig, 1976, 257 p. (Russ. ed.: Ebeling V. *Obrazovanie struktur pri ne-obratimyykh protsessakh. Vvedenie v teoriyu dissipativnykh struktur*. Moscow: Mir Publ., 1979, 279 p.).

22. Schuster H.G. Deterministic Chaos. An Introduction. Weinheim, 1984, 220 p. (Russ. ed.: Shuster G. *Determinirovannyyi khaos. Vvedenie*. Moscow: Mir Publ., 1988, 240 p.).

23. Bilibin Yu.A. *Osnovy geologii rossypei* [The basics of placer geology].

Moscow: USSR Academy of Sciences Publ., 1956, 463 p. (In Russian).

24. Bondarenko N.G. *Obrazovanie, stroenie i razvedka rossypei* [Formation, structure and exploration of placers]. Moscow: Nedra Publ., 1975, 56 p. (In Russian).

25. Kalinchenko V.M., Rudenko V.V. *Geometriya nedr* [Subsoil geometry]. Part 1. *Teoreticheskie osnovy geometrii nedr* [Theoretical bases of subsoil geometry]. Novocherkassk: Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) Publ., 2014, 354 p. (In Russian).

Критерии авторства

Снетков В.И. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Snetkov V.I. has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

ПАМЯТИ ГЕННАДИЯ ФЕОДОСЬЕВИЧА УФИМЦЕВА (1940–2013)

© О.Т. Русинек^а, Т.М. Сковитина^б, Р.П. Дорофеева^с, А.П. Кочнев^д

^аБайкальский музей Иркутского научного центра СО РАН,
664520, Российская Федерация, Иркутская область, пос. Листвянка, ул. Академическая, 1.

^{б,с}Институт земной коры СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

^дИркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. Статья посвящена памяти выдающегося сибирского геоморфолога Геннадия Феодосьевича Уфимцева – доктора геолого-минералогических наук, профессора – признанного специалиста в области новейшей тектоники, геоморфологии и физической географии. Его отличали широта научных интересов, энциклопедичность знаний, увлеченность и страстность в работе. Эти качества обеспечили ему успех в науке – он автор и соавтор более 700 научных работ. Им выполнены многочисленные монографические исследования по новейшей тектонике Дальнего Востока, Байкальской рифтовой зоны, горных поясов континентов, морфотектонике Евразии и структуре рельефа Земли. Г.Ф. Уфимцев – один из инициаторов нового научного направления – эстетической геоморфологии, рассматривающей сложные многогранные связи между человеком и рельефом земной поверхности, в том числе воздействие рельефа на элементы культуры этносов, на национальный характер и устойчивое развитие общества. Особое направление деятельности ученого – каталогизация и описание геоморфологических памятников – объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО. Г.Ф. Уфимцев возглавлял Ассоциацию геоморфологов России, был членом Русского географического общества и национальным делегатом в Международной геоморфологической ассоциации. За выдающиеся результаты в изучении горного рельефа и популяризаторскую деятельность Г.Ф. Уфимцев был удостоен золотой медали им. Н.М. Пржевальского – одной из самых почетных наград Русского географического общества, которая была утверждена еще в 1891 г.

Ключевые слова: Байкал, Прибайкалье, Забайкалье, геоморфология, эстетическая геоморфология, неотектоника, Байкальский музей.

Информация о статье. Дата поступления 28 июня 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Русинек О.Т., Сковитина Т.М., Дорофеева Р.П., Кочнев А.П. Памяти Геннадия Феодосьевича Уфимцева (1940–2013) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 119–130.

^аРусинек Ольга Тимофеевна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, тел.: 8 (3952) 453188, e-mail: rusinek@isc.irk.ru

Olga T. Rusinek, Doctor of Biology, Chief Researcher, tel.: 8 (3952) 453188, e-mail: o.rusinek@yandex.ru

^бСковитина Татьяна Михайловна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории кайнозоя, тел.: 8 (3952) 426900.
Tatiana M. Skovitina, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Senior Researcher of the Cenozoic Laboratory, tel.: 8 (3952) 426900.

^сДорофеева Раиса Петровна, кандидат геолого-минералогических наук, ученый секретарь, тел.: 8 (3952) 426900, e-mail: drf@crust.irk.ru

Raisa P. Dorofeeva, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Academic Secretary, tel.: 8 (3952) 426900, e-mail: drf@crust.irk.ru

^дКочнев Анатолий Петрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем, тел.: 8 (3952) 405114, e-mail: kochnev@istu.irk.ru

Anatoly P. Kochnev, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems, tel.: 8 (3952) 405114, e-mail: kochnev@istu.irk.ru

TO THE MEMORY OF GENNADY FEODOSIEVICH UFIMTSEV (1940–2013)

© O.T. Rusinek^a, T.M. Skovitina^b, R.P. Dorofeeva^c, A.P. Kochnev^d

^aBaikal museum of the Irkutsk Scientific center SB RAS,

1 Akademicheskaya St., Listvyanka settlement, Irkutsk region, 664520, Russian Federation

^{b,c}Institute of the Earth's Crust SB RAS,

128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

^dIrkutsk National Research Technical University,

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The article is dedicated to the memory of the outstanding Siberian geomorphologist, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor Gennady Feodosievich Ufimtsev who was a recognized expert in the field of modern tectonics, geomorphology and physical geography. He was distinguished by the width of scientific interests, encyclopedic knowledge, enthusiasm and passion in work, which ensured his success in science. He is the author and co-author of more than 700 scientific papers. He produced numerous monographic studies on the neotectonics of the Far East, the Baikal Rift Zone, mountain belts of the continents, morphotectonics of Eurasia, and the structure of the Earth relief. G.F. Ufimtsev is one of the pioneers of a new scientific direction – aesthetic geomorphology, which deals with the complex multi-aspect relationships between a man and the earth's surface relief including the effect of relief on the elements of ethnic culture, national character and sustainable development of society. A special place in the activity of the scientist belonged to the cataloging and description of geomorphological monuments declared the UNESCO World Heritage sites. G.F. Ufimtsev was the head of the Russian Association of Geomorphologists, a member of the Russian Geographical Society and a national delegate to the International Geomorphological Association. For outstanding results in the study of mountainous terrain and popularization activities G. F. Ufimtsev was awarded the gold medal named after N.M. Przhevalsky, which has been one of the most honorable awards of the Russian Geographical Society since its introduction in 1891.

Keywords: *Baikal lake, Baikal region, Transbaikalia, geomorphology, aesthetic geomorphology, neotectonics, Baikal Museum*

Article info. Received 28 June 2018; accepted for publication 28 August 2018; available online 28 September 2018.

For citation. Rusinek O.T., Skovitina T.M., Dorofeeva R.P., Kochnev A.P. To the memory of Gennady Feodosievich Ufimtsev (1940–2013). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 3, pp. 119–130. (In Russian).

21 декабря 2017 г. в Байкальском музее Иркутского научного центра СО РАН состоялся межинститутский научный семинар, посвященный памяти выдающегося сибирского геоморфолога Геннадия Феодосьевича Уфимцева. Организация семинара связана с подготовкой к изданию книги, посвященной Г.Ф. Уфимцеву «Тетрадь воспоминаний о профессоре Г.Ф. Уфимцеве» [1] и ставшей вторым выпуском запланированной Байкальским музеем обобщающей серии «Исследователи Байкала» [2]. Программа семинара включала 7 докладов и выставку личных вещей ученого, его дневников, монографий, статей, коллек-

ций значков и открыток, уникальных деревянных фигурок.

Геннадий Феодосьевич Уфимцев (рис. 1) – доктор геолого-минералогических наук, профессор – признанный специалист в области новейшей тектоники, геоморфологии и физической географии. Его отличали широта научных интересов, энциклопедичность знаний, увлеченность и страстность в работе. Эти качества обеспечили ему успех в науке. Он автор и соавтор более 700 научных работ, в том числе 11 личных монографий и 25 коллективных книг, а также двух терминологических справочников.



Рис. 1. Геннадий Феодосьевич Уфимцев
Fig. 1. Gennadiy Feodosievich Ufimtsev

Г.Ф. Уфимцев родился 29 февраля 1940 г. в г. Могоча Читинской области. Его отец, Феодосий Николаевич, окончивший Турьинское горное училище и Урало-Казахстанскую промышленную академию в Свердловске, более 40 лет проработал на предприятиях горной промышленности, в том числе в золотодобывающих трестах «Верхамурзолото» и «Джугджурзолото». По примеру отца все три его сына также стали геологами и горняками.

Будучи еще поселком возле железнодорожной станции Сибирской магистрали, Могоча, по выражению Г.Ф. Уфимцева, «...давал ребятам широкие возможности познать окружающий мир» [3]. Такая свобода приучала действовать самостоятельно. Геннадий Феодосьевич писал: «Школьное образование я получил обстоятельное и в семи школах. Не помню плохих учителей. Учили нас хорошо и жестко, особенно прошедшие войну мужики – знали, что раз и навсегда вбитое в ученика знание есть залог его будущего благополучия и счастья. С выбором высшего образования проблем не возникало – геологоразведочный факультет горного института в Екатеринбурге. Здесь учили тоже жестко и хорошо. Во-первых, замечательно преподавались систематические науки (палеонтология, минералогия, кристаллография и др.),

которые развивают способности восприятия, хранения и использования в уме больших объемов знаний, приучают к классификационным построениям. Прошло более четверти века по окончании горного института, и я занялся проблемой симметрии структуры рельефа земной поверхности. Вложенные в меня знания о классической симметрии всплыли из глубин памяти, и я не только стал их широко использовать, но и быстро освоил другие виды симметрии и основы учения о симметрии вообще» [3].

В 1962 г. Г.Ф. Уфимцев окончил геологоразведочный факультет Горного института по специальности «геологическая съемка и поиски полезных ископаемых», после чего работал в Иркутском и Читинском геологуправлениях Министерства геологии СССР геологом и начальником партий.

Уже в первых маршрутах Геннадий Феодосьевич показал себя творчески мыслящим специалистом, его детальная документация сопровождалась умелыми зарисовками, отражающими морфологические особенности рельефа изучаемой территории (рис. 2).

В 1964 г. Г.Ф. Уфимцев опубликовал в соавторстве с И.Н. Фоминым свою первую работу «Неотектоника юго-западной части хребта Яблонового и сопредельных территорий». А уже в следующем 1965 г. им было опубликовано 14 работ. За первые 10 лет работы было опубликовано 75 работ, включая карты (рис. 3).

В 1971–1981 гг. Г.Ф. Уфимцев был исполняющим обязанности ученого секретаря, младшим научным сотрудником, старшим научным сотрудником и заведующим кабинетом Института тектоники и геофизики Дальневосточного научного центра АН СССР. Г.Ф. Уфимцев писал: «Десятилетие работы на Дальнем Востоке тоже оказалось запоминающимся. Нам было позволено выбирать направления деятельности – от теоретических

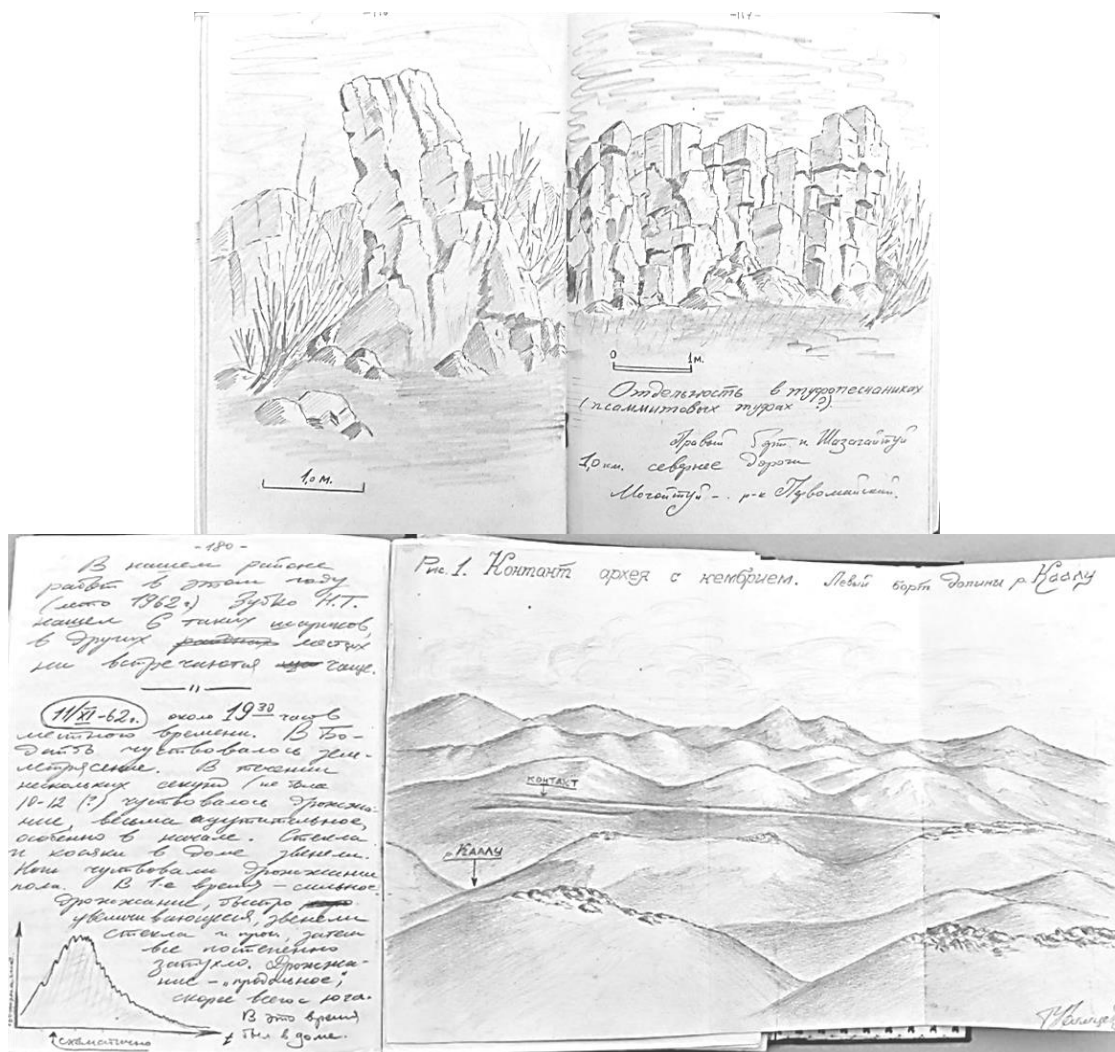


Рис. 2. Страницы из полевого дневника Г.Ф. Уфимцева (1962 г.)
Fig. 2. Pages of G.F. Ufimtsev's field diary (1962)

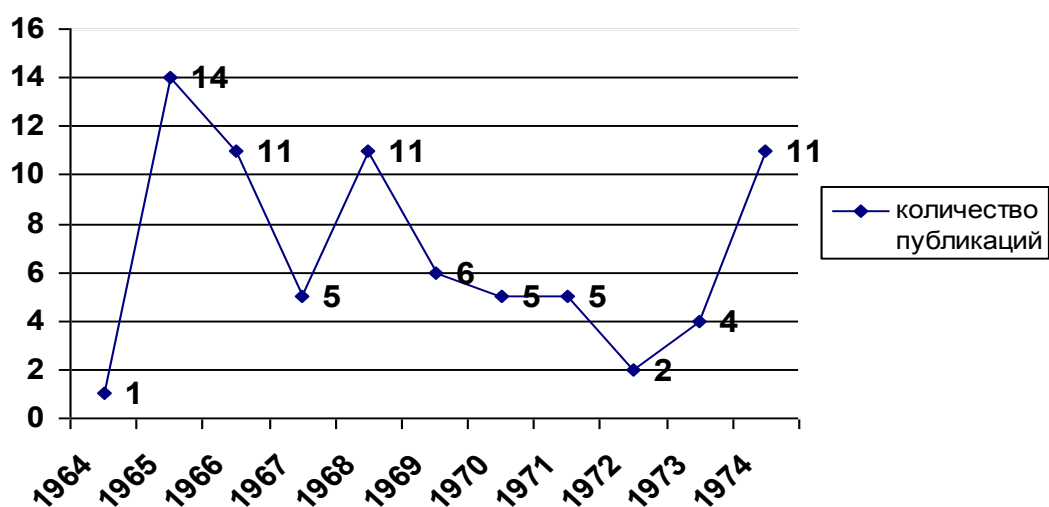


Рис. 3. Публикационная активность Г.Ф. Уфимцева за первые 10 лет работы
Fig. 3. Publication activity of G.F. Ufimtsev for the first 10 years of work

размышлений и до региональных исследований. Наиболее жадные, в числе их и автор, желали сразу всего: работа с геоморфологической терминологией, создание Карты новейшей тектоники Дальнего Востока, остров Беринга и Приохотье, Сихотэ-Алинь и Нижнее Приамурье. С тех пор я ясно осознаю правоту мысли В.И. Вернадского, что в науке успех обеспечивается многонаправленностью исследований, своего рода научной жадностью» [3].

Геннадий Феодосьевич учился в заочной аспирантуре при Институте земной коры СО АН СССР, став первым аспирантом Н.А. Логачева, будущего академика Академии наук СССР и директора института.

В 1970 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Рельеф и новейшая тектоника Центрального Забайкалья». После защиты диссертации в 1971 г. он уже был в составе новообразованного под руководством академика Ю.А. Косыгина Института тектоники и геофизики ДВНЦ АН СССР.

С 1981 по 2013 г. научная деятельность Геннадия Феодосьевича была тесно связана с Институтом земной коры СО РАН. С 1981 г. по 1986 г. он был старшим научным сотрудником лаборатории неотектоники и геоморфологии. С 1986 по 1992 г. – главным научным сотрудником; с 1992 г. – заведующим кабинетом неотектоники и геоморфологии, а с 2006 г. – заведующим лабораторией неотектоники и геоморфологии. С 2010 г. – главным научным сотрудником-консультантом лаборатории кайнозоя [4].

Именно в Институте земной коры Г.Ф. Уфимцев познакомился с Н.А. Флоренсовым, под руководством которого принимал активное участие в совместных исследованиях рельефа Сибири и Дальнего Востока. Результатом стала многотомная (15 томов) монография «История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока». Г.Ф. Уфимцев был

соавтором двух восточно-сибирских региональных томов – «Плоскогорья и низменности Восточной Сибири» (1971 г.), «Нагорья Прибайкалья и Забайкалья» (1974 г.). В 1978 г. многотомник был удостоен Государственной премии СССР в области науки.

Г.Ф. Уфимцев всю свою жизнь восхищался Н.А. Флоренсовым, высоко ценил и почитал его как учителя, тепло вспоминал Николая Александровича на многих страницах своей монографии «Очерки теоретической геоморфологии» [5], где описал несколько качеств истинного Учителя в науке, в том числе и обязательное соблюдение в жизни «Правил Старого Верблюда». Г.Ф. Уфимцев активно поддерживал и развивал школу Н.А. Флоренсова, посвятил его памяти и организовал в 1993 г. Иркутский геоморфологический семинар, на который приглашались крупнейшие геоморфологи России, что давало возможность молодежи учиться у корифеев науки.

В 1984 г. Г.Ф. Уфимцевым была защищена докторская диссертация на тему «Тектонический анализ рельефа на примере Востока СССР».

В монографии «Байкальская тетрадь» [6] в первой главе под названием «Становление научного знания о рельефе Сибири» Г.Ф. Уфимцев большое внимание уделил первым сибирским геологам – Петру Алексеевичу Кропоткину (1842–1921) и Владимиру Афанасьевичу Обручеву (1863–1956), на их работах он многому учился. Он писал: «Владимир Афанасьевич Обручев – мой кумир» [6]. Ему был особенно близок стиль работы В.А. Обручева: научные наблюдения и обобщения, создание новых наук (неотектоника), описание путешествий и представление научного знания в художественной форме (романы «Плутония», «Земля Санникова», «В дебрях Центральной Азии»). «Получение нового знания: увидеть свое и подарить его всем... В.А. Обручев дал нам и научные, и

художественные образы жизни Природы, жизни в Природе и человека как части Природы» [6].

Не менее восторженно Г.Ф. Уфимцев писал о П.А. Кропоткине «...географ и геолог, революционер и мыслитель, вообще человек, проживший жизнь, достойную подражания... Экспедиции Русского географического общества принесли науке значимые, но порой только изначальные сведения о природе Азии, что потребовало их обобщения. И первым это сделал П.А. Кропоткин» [6]. Весь анализ работы П.А. Кропоткина написан восторженным специалистом-геологом и географом. По мнению Г.Ф. Уфимцева, в начале своей научной деятельности П.А. Кропоткин «...сделал шаг, оформивший наши современные научные представления о рельефе Сибири и научные же подходы к его изучению: путешествия и наблюдения; анализ сделанного и тобой, и другими; научный синтез. И не зря имя П.А. Кропоткина в Сибири носят горный хребет в Восточном Саяне, молодой вулканический конус рядом, в долине р. Жомболока, гольцы на Патомском нагорье и в Забайкалье» [6].

Все монографии и многочисленные статьи (рис. 4, 5) Г.Ф. Уфимцева подробно иллюстрированы рисунками в ав-

торском исполнении, где отражен богатый фактологический материал, полученный им в ходе экспедиционных работ и путешествий. Штриховые черно-белые рисунки Г.Ф. Уфимцева являются неотъемлемой частью его трудов, придают им оригинальный авторский почерк. Эти иллюстрации (см. рис. 5) являются настолько запоминающимися, что, увидев их один раз, потом уже с другими никогда не спутаешь.

Г.Ф. Уфимцев являлся высококлассным специалистом в области геоморфологии, неотектоники и геологии кайнозоя. Круг его научных интересов был широчайшим: от глобальных неотектонических построений до новейшей тектоники, геоморфологии отдельных регионов Внутренней Азии, проблем теоретической геоморфологии. Им выполнены многочисленные монографические исследования по новейшей тектонике Дальнего Востока, Байкальской рифтовой зоны, горных поясов континентов и структуре рельефа Земли, морфотектонике Евразии.

Геннадий Феодосьевич – один из инициаторов нового научного направления – эстетической геоморфологии, рассматривающей сложные многогранные связи между человеком и рельефом



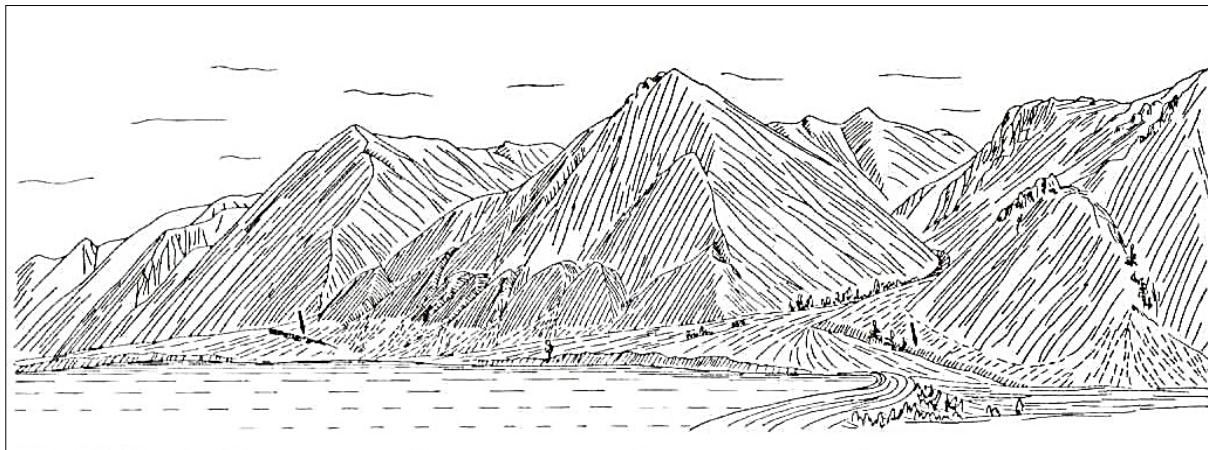
a



b

Рис. 4. Монографии Г.Ф. Уфимцева (a) и коллективные монографические работы (b), соавтором которых он был

Fig. 4. G.F. Ufimtsev's monographs (a) and multi-author monographs (b) with Ufimtsev being a co-author



**Рис. 5. Уступ Обручевского сброса на склоне Приморского хребта
(молодые разломы, секущие устьевые конусы выноса, показаны стрелками)**
**Fig. 5. Obruchevsky fault bench on the slope of the Primorsky ridge
(young faults, intersecting estuarine alluvial cones shown by arrows)**

земной поверхности, в том числе воздействие рельефа на элементы культуры этносов, на национальный характер и устойчивое развитие общества.

Особое направление деятельности ученого – каталогизация и описание геоморфологических памятников – объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО.

Г.Ф. Уфимцев участвовал в подготовке научных кадров. Под его руководством защищено 9 кандидатских диссертаций. В 1998 г. ему было присвоено научное звание профессора. Он активно сотрудничал с Иркутским государственным университетом, читал лекции на геологическом факультете и на биолого-географическом факультете Педагогического института. Бывшие студенты до сих пор вспоминают его захватывающие лекции по геоморфологии нашей планеты. Им были разработаны курсы по теоретической геологии, геоморфологии, жизни человека и общества в природе и ее влиянию на культуру и здоровье человека. Его профессионализм высоко ценили в других странах и поэтому приглашали читать лекции, например, в вузах Китая.

Г.Ф. Уфимцев возглавлял Ассоциацию геоморфологов России и был национальным делегатом в Международной геоморфологической ассоциации, чле-

ном Русского географического общества, руководил Иркутским геоморфологическим семинаром, рассматривавшем проблемы практической и теоретической геоморфологии.

На основании анализа планетарного рельефа, фигуры и рельефа геоида Г.Ф. Уфимцевым была выдвинута гипотеза о развитии Земли в позднем мезозое – кайнозое. Авторский подход к научной работе, стремление обязательно самому ознакомиться с природой геолого-геоморфологических объектов стимулировали теоретический поиск. Для этого Геннадий Феодосьевич проводил наблюдения в Китае, Непале, Таиланде, Египте, Иордании, Перу, Боливии, Гоа, Шри-Ланке. Он исследовал все крупные горные системы мира, включая Анды, Гималаи, Тянь-Шань, горы юга Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Работа Геннадия Феодосьевича Уфимцева многократно отмечалась наградами и грамотами различных уровней: 1994 г. – Золотая медаль им. Н.М. Пржевальского Русского географического общества и Почетный диплом Забайкальского филиала Географического общества СССР, 1997 г. – Почетная грамота СО РАН, 1999 г. – Благодарность Президиума РАН, 2004 г. – Почетная

грамота РАН и Почетный диплом Президиума РАН за работы по популяризации науки за серию статей «Молодая тектоника, рельеф и человек», 2006 г. – диплом участника программы «300 лучших учебников для высшей школы в честь 300-летия Санкт-Петербурга» за учебное пособие «Семь слов о теории геологии», 2007 г. – Почетный знак СО РАН «Серебряная Сигма», 2009 г. – Почетная грамота РАН, 2012 г. – Почетная грамота губернатора Иркутской области и юбилейная медаль «В память 350-летия Иркутска». Геннадий Феодосьевич имел почетное звание «Заслуженный ветеран СО РАН» (1997).

Золотая медаль им. Н.М. Пржевальского – это одна из самых почетных наград Русского географического общества, которой удостоился Г.Ф. Уфимцев за выдающиеся результаты в изучении горного рельефа и популяризаторскую деятельность (рис. 6). Награда была

утверждена в 1891 г. в виде серебряной медали за заслуги в исследованиях Азии. В 1946 г. медаль стала золотой. В нашем регионе ее получили в 1992 г. Л.Н. Ивановский (друг и коллега Г.Ф. Уфимцева) и в 1992 г. А.Б. Иметхенов (г. Улан-Удэ).

Г.Ф. Уфимцев собирал научную и научно-популярную информацию из различных источников. Сохранились целые тома с вырезками из газет и журналов. Все это он использовал в своей научной работе.

Геннадий Феодосьевич был страстным филокартистом и фалеристом – коллекционером открыток и значков (рис. 7). Эта часть его деятельности требует отдельной ревизии, анализа и представления научной и широкой общественности.

Уфимцев писал: «Мой стиль – поиск во множестве направлений и особое пристрастие – горы. Не люблю электронику и не верю, что есть электроны. Не люблю технику, но люблю инструмент. Одно из



Рис. 6. Золотая медаль им. П.М. Пржевальского и диплом
Fig. 6. Gold medal named after P.M. Przhevalsky and a diploma



Рис. 7. Редкие значки из коллекции Г.Ф. Уфимцева (фото Е.Г. Уфимцевой)
Fig. 7. Rare badges from the collection of G.F. Ufimtsev (photo by E.G. Ufimtseva)

любимых занятий – резьба по дереву (рис. 8). Рисую, а в стихотворчестве способен только на пародийные четверостишия, которые даже в уме декламировать стыдно... Коллекционер и собиратель, и твердо знаю, что занятия эти обеспечивают и духовную, и материальную поддержку научному творчеству.

Люблю часами разглядывать (хотя это неточно) географические карты – это завораживающее душу занятие. Убежден, что знание есть важнейший ресурс Природы, потому что и сам человек есть часть ее. Добротность и полнота научного знания обеспечивается последовательностью: наблюдение и анализ имеющегося знания – научное обобщение – научно-популярное представление знания – художественное его изложение. Лучший пример – творчество Владимира Афанасьевича Обручева. До последней стадии я еще не добрался» [3] (здесь

Г.Ф. Уфимцев, по-видимому, имел в виду художественное творчество В.А. Обручева).

Г.Ф. Уфимцев всей своей многогранной натурой создавал особую дружескую атмосферу, для него были характерны такие качества, как порядочность, честность, открытость и простота. Он всегда был «душой» компании. Очень хорошо понимал людей, был отзывчив и часто помогал людям в их жизненных ситуациях.

Геннадий Феодосьевич Уфимцев был уникальным человеком, честным перед собой и людьми. Он писал о себе: «Мой взгляд на Мир и на себя ехиден и с учетом, что я есть часть Мира. Я убежден, что лучше перьевой ручки и чернил для научной деятельности ничего нет. Видеть Мир и переводить виденное в Знание! Создание волшебного Мира Знания! Мы имеем громадное

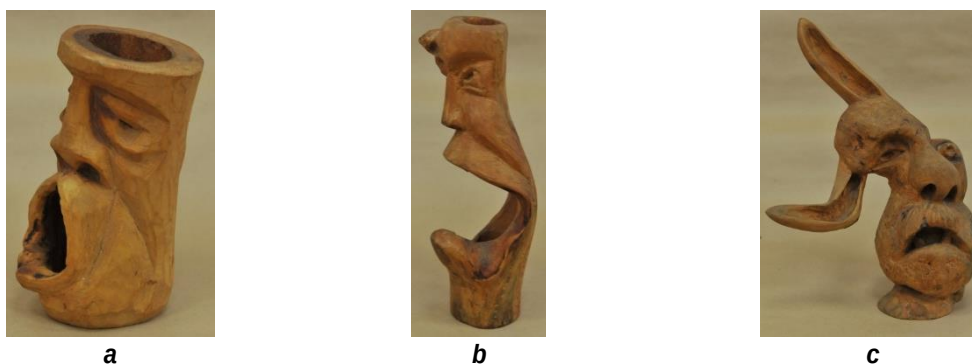


Рис. 8. Изделия из дерева Г.Ф. Уфимцева:
a, b – деревянные фигурки под карандаши; c – Шариков
Fig. 8. G.F. Ufimtsev's woodworks:
a, b – wooden figures for pencils; c – Sharikov

преимущество – наше Отечество: большое, разнообразное и прохладное – надо вертеться... Оглядываясь в прошедшее, я думаю, что в детстве на берегах Амазара и других рек, в заречных кустарниках мы получали в залог своего

счастливого существования то, что столь необходимо для жизни в стране, открытой в Арктику – общинные мышление и образ жизни. Пока они с нами и в нас – мы непобедимы» [3].

Библиографический список

1. Тетрадь воспоминаний о профессоре Г.Ф. Уфимцеве / отв. ред. Т.М. Сквитина, В.П. Чичагов. Иркутск: Изд-во Института земной коры СО РАН, 2017. 168 с.
2. Русинек О.Т. Геннадий Феодосьевич Уфимцев – геолог, ты ветра и солнца брат. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы, 2017. 80 с.
3. Уфимцев Г.Ф. Жизнь без юбилеев и дней рождения // Геоморфология. 2010. № 1. С. 104–107.

4. Складов Е.В., Дорофеева Р.П. Институт земной коры: люди, события, даты. 1949–2009. Иркутск: Изд-во Института земной коры СО РАН, 2009. 672 с.
5. Уфимцев Г.Ф. Очерки теоретической геоморфологии. Новосибирск: Наука, 1994. 123 с.
6. Уфимцев Г.Ф. Байкальская тетрадь. Очерки теоретической и региональной геоморфологии. М.: Научный мир, 2009. 240 с.

References

1. Skovitina T.M., Chichagov V.P. *Tetrad' vospominanii o professore G.F. Ufimtseve* [Notebook of memories of professor G.F. Ufimtsev]. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS Publ., 2017, 168 p. (In Russian).
2. Rusinek O.T. *Gennadii Feodos'evich Ufimtsev – geolog, ty vetra i solntsa brat* [Gennady Feodosievich Ufimtsev – geologist, the brother of wind and the sun that's who you are]. Irkutsk: V.B. Sochava Institute of Geography Publ., 2017, 80 p. (In Russian).
3. Ufimtsev G.F. Life without anniversaries and birthdays. *Geomorfologiya* [Geomorphology], 2010, no. 1, pp. 104–107. (In Russian).

4. Sklyarov E.V., Dorofeeva R.P. *Instytut zemnoi kory: lyudi, sobytiya, daty. 1949–2009* [Institute of the Earth's Crust: people, events, dates. 1949–2009]. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS Publ., 2009, 672 p. (In Russian).
5. Ufimtsev G.F. *Ocherki teoreticheskoi geomorfologii* [Sketches on theoretical geomorphology]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1994, 123 p. (In Russian).
6. Ufimtsev G.F. *Baikal'skaya tetrad'. Ocherki teoreticheskoi i regional'noi geomorfologii* [Baikal notebook. Sketches on theoretical and regional geomorphology]. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2009, 240 p. (In Russian).

Некоторые наиболее значимые публикации Г.Ф. Уфимцева

Труды Института геологии и геофизики. Вып. 152. Карта тектоники докембрия континентов в масштабе 1:15000000

(объяснительная записка) / отв. ред. Ю.А. Косыгин. Новосибирск: Наука, 1972. 91 с.

Антощенко-Оленев И.В., Базаров Д.Б., Галкин В.И., Голдырев Г.С., Ендринский А.С., Золотарев А.Г., Логачев Н.А., Сизиков А.И., Уфимцев Г.Ф. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Нагорья Прибайкалья и Забайкалья / отв. ред. Н.А. Флоренсов. М.: Наука, 1974. 359 с.

Адаменко О.М., Ганешин Г.С., Гольдфарб Ю.Ф., Уфимцев Г.Ф. [и др.]. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Проблемы эндогенного рельефообразования / отв. ред. Н.А. Флоренсов. М.: Наука, 1976. 452 с.

Адаменко О.М., Долгушин И.Ю., Ермолов В.В., Уфимцев Г.Ф. [и др.]. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Плоскогорья и низменности Восточной Сибири / отв. ред. Н.А. Флоренсов. М.: Наука, 1971. 320 с.

Тектоника континентов и океанов: терминолог. справочник / сост. А.А. Врублевский, Н.Г. Горелова, Р.И. Гришкян [и др.]; под ред. Ю.А. Косыгина [и др.]. Хабаровск: Книжное издательство, 1976. 757 с.

Тимофеев Д.А., Уфимцев Г.Ф., Онухов Ф.С. Терминология общей геоморфологии. М.: Наука, 1977. 200 с.

Тектоническая карта Дальнего Востока и сопредельных территорий масштаба 1:2000000. М.: Изд-во Главного управления геодезии и картографии, 1978.

Структура континентов и океанов: терминологический справочник / сост. В.Ю. Забродин, Г.Л. Кириллова, В.А. Кулындышев, Г.Ф. Уфимцев [и др.]; под ред. Ю.А. Косыгина [и др.]. М.: Недра, 1979. 511 с.

Уфимцев Г.Ф. Принципы и содержание тектонического анализа рельефа (опыт составления карт новейшей тектоники Дальневосточного региона) // Тихоокеанская геология. 1982. Т. 1. № 5. С. 57–63.

Красный Л.И., Беляев И.В., Моисеенко У.И., Уфимцев Г.Ф. [и др.]. Схема

крупнейших неотектонических форм востока СССР. Масштаб 1:10000000 // Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 8. Восток СССР / ред. Л.И. Красный, В.К. Путинцев. Л.: Недра, 1984. 560 с.

Уфимцев Г.Ф., Флоренсов Н.А. [и др.]. Типы и динамика материкового горообразования // Геология и геофизика. 1984. Т. 25. № 1. С. 29–38.

Уфимцев Г.Ф. Неотектонические формы региона Байкало-Амурской магистрали // Геология и геофизика. 1984. Т. 25. № 5. С. 3–11.

Юг Восточной Сибири. Сводный путеводитель экскурсий 037, 038, 039, 040 // 27-й Междунар. геологич. конгресс / гл. ред. Н.А. Логачев. М.: Наука, 1984. 168 с.

Уфимцев Г.Ф. О неотектонике Приольхонья (Байкальская рифтовая зона) // Геология и геофизика. 1985. Т. 26. № 6. С. 37–45.

Уфимцев Г.Ф. Неотектоника Байкальского рифта и прогноз элементов его глубинного строения // Советская геология. 1986. № 11. С. 90–98.

Флоренсов Н.А., Ивановский Л.Н., Уфимцев Г.Ф., Ананьев Г.С. [и др.]. Процессы формирования рельефа Сибири / отв. ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука, 1987. 185 с.

Уфимцев Г.Ф. Горные пояса континентов и симметрия рельефа Земли / отв. ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука, 1991. 169 с.

Уфимцев Г.Ф. Геоморфологические экскурсии в Прибайкалье. Тункинская долина. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1991. 44 с.

Уфимцев Г.Ф. Геоморфологические экскурсии в Прибайкалье. Остров Ольхон и Малое Море. Иркутск: ИГУ, 1991. 55 с.

Уфимцев Г.Ф. Морфотектоника Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1992. 216 с.

Уфимцев Г.Ф. Генезис рельефа // Геоморфология. 1992. № 3. С. 19–21.

Уфимцев Г.Ф. Геоморфологические экскурсии в Прибайкалье. Западный берег Байкала. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1992. 64 с.

Уфимцев Г.Ф. Сибирские геологические значки. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 1992. 44 с.

Александров В.К., Беличенко В.Г., Бухаров А.А., Уфимцев Г.Ф. [и др.]. Геологические памятники Байкала / сост. Г.В. Рязанов. Новосибирск: Наука, 1993. 161 с.

Уфимцев Г.Ф. Очерки теоретической геоморфологии / отв. ред. Н. А. Логачев. Новосибирск: Наука, 1994. 123 с.

Уфимцев Г.Ф. Сейсмичность и структура Байкальского рифта // Отечественная геология. 1994. № 1. С. 44–49.

Уфимцев Г.Ф. Геоморфологическая практика в Прибайкалье: учеб. пособие / ред. М.А. Айзман. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1995. 148 с.

Уфимцев Г.Ф. Тектонический рельеф Евразии // Отечественная геология. 1999. № 2. С. 28–37.

Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М. [и др.]. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины

(строение и геологическая история). Новосибирск: Гео, 2001. 252 с.

Уфимцев Г.Ф. Байкал вчера и сегодня в почтовых открытках // Живописная Россия. 2001. № 3 (10). С. 45–48.

Уфимцев Г.Ф. Семь слов о теории геологии. М.: Научный мир, 2006. 160 с.

Уфимцев Г.Ф. Горы Земли (климатические типы и феномены новейшего орогенеза). М.: Научный мир, 2008. 352 с.

Уфимцев Г.Ф., Корженков А.М., Мамыров Э.М. Очерки рельефа и морфотектоники Тянь-Шаня. Новосибирск: Гео, 2009. 129 с.

Русинек О.Т., Уфимцев Г.Ф., Фиалков В.А. Байкальский ход (научная экскурсия по Байкалу). Новосибирск: Гео, 2009. 187 с.

Уфимцев Г.Ф. Андская тетрадь (рельеф и морфотектоника Перуанских Анд). М.: Научный мир, 2010. 154 с.

Уфимцев Г.Ф. Наш дом (Человек в планете Земля). М.: Научный мир, 2011. 100 с.

Rusinek O.T., Ufimtsev G.F., Fialkov V.A. Baikal (scientific tour of Lake Baikal) / ed. by A.I. Kiselev; engl. transl. by Yu.M. Kaplunenko. Novosibirsk: Geo, 2011. 236 p.

Критерии авторства

Русинек О.Т., Сквитина Т.М., Дорофеева Р.П., Кочнев А.П. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Rusinek O.T., Skovitina T.M., Dorofeeva R.P., Kochnev A.P. have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Уважаемые коллеги!

1. В журнале публикуются статьи по следующей тематике:
 - геологическое строение рудных, нерудных, в том числе горючих, месторождений полезных ископаемых (вмещающие комплексы пород, связь оруденения с магматизмом, метаморфизмом, осадконакоплением);
 - тектоника месторождений, рудных узлов, районов;
 - минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых;
 - генетические проблемы формирования месторождений полезных ископаемых;
 - минерагения (металлогения): рудные зоны, районы, пояса, металлогенические карты;
 - методы и методики поисков и разведки месторождений полезных ископаемых;
 - экономическая оценка месторождений полезных ископаемых, правовые основы недропользования;
 - физико-геологические модели месторождений полезных ископаемых;
 - геофизические, геохимические и другие методы поисков месторождений полезных ископаемых;
 - геоинформационные технологии в науках о Земле;
 - технология и техника горно-буровых работ;
 - технология и техника разработки месторождений полезных ископаемых;
 - технология обогащения и переработки минерального сырья;
 - геммология;
 - гидрогеология и инженерная геология;
 - безопасность жизнедеятельности;
 - геоэкология.
2. Статьи принимаются от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.
3. Объем статьи должен быть не более 15 с. машинописного текста, включая библиографический список, таблицы и иллюстрации.
4. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows на CD-диске или по электронной почте geo_info@istu.edu. В обязательном порядке в ауд. Ж-04 предоставляется два экземпляра в распечатанном виде на листах формата А4. Электронный и печатный варианты должны быть полностью идентичны. Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 14 (строки через 1,0 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху, снизу, слева и справа – 2,5 см, абзацный отступ – 1 см, ориентация страницы – книжная.
5. В структуру статьи должны входить: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на русском и по возможности английском языках, введение (краткое), цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства (вся информация предоставляется одним файлом).
6. Аннотация по объему должна быть 200–250 слов и композиционно содержать следующие разделы с их наименованиями: цель, методы, результаты, выводы.
7. Статья должна сопровождаться актом экспертизы, сведениями обо всех авторах (название вуза, организации, учреждения, должность и структурное подразделение, наличие ученой степени, ученого звания, контактные рабочий (для публикации) и сотовый

(по возможности для связи) телефоны, почтовый и электронный адреса) на русском и английском языках. Образец оформления первого разворота статьи приводится ниже.

8. Текст статьи формируется в одну строку. Рисунки и таблицы помещаются в тексте непосредственно после абзаца с первой ссылкой на них.

9. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул, например MathType или Microsoft Equation Editor. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

10. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали. Дополнительно должны приводиться переводы названий таблиц на английский язык.

11. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 5 рисунков). Они должны быть выполнены чисто и аккуратно в соответствии с требованиями к геологической графике, в оттенках черно-серого цвета. Масштаб их должен быть пригодным для тиражирования, а размер – не более 160×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок должен иметь подпись (под рисунком), в которой дается объяснение всех его элементов. В электронном варианте статьи рисунки дополнительно предоставляются в виде отдельных файлов с расширением *JPEG. Для построения графиков и диаграмм следует использовать программу Microsoft Office Excel. Дополнительно должны приводиться переводы названий рисунков на английский язык.

12. Ссылки на литературные источники приводятся в тексте в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере обращения к источникам литературы. Минимальное количество источников в библиографическом списке – не менее 12. При этом самоцитирование автора не должно превышать 30 % от общего количества источников, не допускаются ссылки на диссертации и авторефераты. Желательно ссылаться на оригинальные источники (первоисточники), на статьи и монографии по данной тематике, на публикации из высокорейтинговых источников. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science – не менее 3 источников); кроме того, рекомендуем ознакомиться с трудами ученых ИРНТУ по тематике работы, это можно сделать на сайте журнала или в системе РИНЦ, осуществив поиск по ключевым словам. Также в списке литературы должно быть не менее 30 % ссылок на иностранные источники.

13. Список литературы составляется в двух вариантах*.

Первый вариант (библиографический список) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008.

Второй вариант (References) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Он оформляется в том же порядке, что и в библиографическом списке. На сайте translit.net можно бесплатно воспользоваться программой транслитерации русского текста на латиницу. В вариантах транслитерации необходимо предварительно выбрать вариант BSI.

*В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов, не сокращая их на трех, четырех. Правильное описание используемых источников является залогом того, что цитируемая публикация будет учтена при оценке научной деятельности ее авторов (и, соответственно, организации, региона, страны). По цитированию журнала определяется его научный уровень, авторитетность, эффективность деятельности его редакционного совета и т.д.

Для русскоязычных статей из журналов, сборников, материалов конференций следует использовать следующий вариант структуры библиографической ссылки: авторы (транслитерация), перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках, название источника (транслитерация и перевод на английский язык в квадратных скобках), выходные данные с обозначениями на английском языке. Перевод названия статьи на английский язык обязательно должен соответствовать опубликованному переводу в цитируемом журнале, если таковой имеется. Описание статей, материалов конференций и книг на русском языке заканчиваются описанием языка источника (для русского – In Russian). Если есть, обязательно указывается DOI.

Описание нормативных документов необходимо приводить в транслитерации и в переводе на английский язык в квадратных скобках.

В иных источниках также в дополнение к транслитерации приводится перевод названия источника на английский язык, место издания обязательно должно быть переведено, название издательства остается транслитерированным и обозначается добавлением слова Publ. В получившемся описании заменяются обязательные элементы – «том» на «vol.», «№» на «no.», «с.» на «p.» (для общего количества страниц) и «pp.» для диапазона страниц.

Ссылки на источники на иностранном языке приводятся без изменения.

Примеры оформления источников в References можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

14. Статья должна быть подписана всеми авторами (количество авторов должно быть не более пяти). Подписи авторов заверяются в канцелярии учреждения или вуза. Статьи аспирантов и магистрантов должны быть подписаны научным руководителем.

15. Желательно, чтобы к статье были приложены выписка из протокола заседания кафедры (лаборатории) о рекомендации публикации статьи и рецензия одного из членов редколлегии журнала.

16. Авторы статей, публикуемых в сборнике, обязуются содействовать его популяризации в своих организациях и содействовать подписке.

17. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

18. Редакция оставляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

19. Представленные статьи проходят проверку на антиплагиат.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

Внимание! Публикация статей является бесплатной, включая один авторский экземпляр. Стоимость каждого дополнительного экземпляра журнала – 300 рублей.

Статьи, опубликованные в журнале «Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых», реферируются и рецензируются.

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, редколлегия, аудитория Е-310:

главный редактор Снетков Вячеслав Иванович, тел.: (3952) 405273, e-mail: snetkov@istu.edu

Статьи необходимо направлять ответственному секретарю Храмовских Виталию Александровичу, тел.: (3952) 405069, e-mail: geo_info@istu.edu, аудитория Ж-04.

Образец оформления статьи

УДК 549.09

МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТИПЫ РУД ТОМИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДИ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© Е.М. Курчевская^а, М.В. Яхно^б, А.Е. Сенченко^с

^{а,с}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а.

^бИркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. Цель. Исследование технологических типов руд Томинского месторождения меди. Изучение минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов. Выявление минералогических и структурно-текстурных особенностей руд. Выявления взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серицитовой формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов.

Результаты. Выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации.

Выводы. Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

Ключевые слова: Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд.

Формат цитирования. Курчевская Е.М., Яхно М.В., Сенченко А.Е. Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 3. С. 42–47.

^аКурчевская Елена Михайловна, старший научный сотрудник, e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru
Elena M. Kurchevskaya, Senior Researcher, e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru

^бЯхно Марина Владиславовна, старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых, e-mail: ymar@istu.edu
Marina V. Yakhno, Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals, e-mail: ymar@istu.edu

^сСенченко Аркадий Евгеньевич, генеральный директор, e-mail: senchenko@tomsgroup.ru
Arkady E. Senchenko, CEO, e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

MINERALOGICAL AND TECHNOLOGICAL TYPES OF TOMINSKOYE DEPOSIT COPPER ORES (SOUTHERN URAL)

© E.M. Kurchevskaya^a, M.V. Yakhno^b, A.Y. Senchenko^c

^{a,c}NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute "Technologies of Minerals Separation"),
83a Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

^bIrkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT. Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoe copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Main conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

Keywords: Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

For citation. Kurchevskaya E.M., Yakhno M.V., Senchenko A.Y. Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2017, vol. 40, no. 3, pp. 42–47. (In Russian).

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы (заключение)), **библиографический список** (references), **критерии авторства** (authorship criteria) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научный журнал

№ 3 (64) 2018

Редактор Ф.А. Посысоева
Компьютерная верстка В.А. Храмовских
Перевод на английский язык В.В. Батицкой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 27.09.2018 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 17,75.
Тираж 500 экз. Зак. 232. Поз. плана 4н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83