



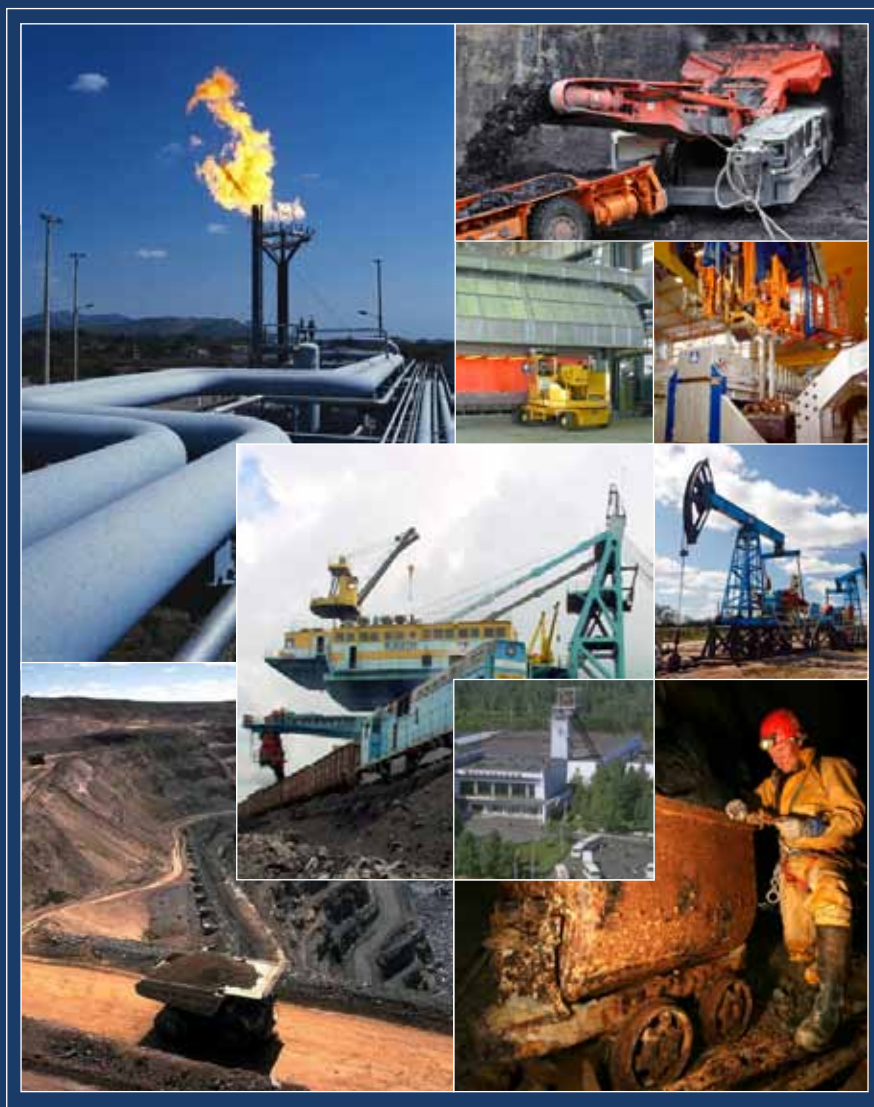
ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

том 212



ИЗДАЮТСЯ С 1907 Г.

НАУКА В НАЦИОНАЛЬНОМ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ «ГОРНЫЙ»



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ 2015

НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»



Россия, 199106 Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., 2
Тел. (812) 327 7360,
факс (812) 327 7359
E-mail: rectorat@spmi.ru
<http://www.spmi.ru>

Из первого устава
Горного училища:

«... Берг-Коллегия надеется, что
выбранные ею учителя не оставят
исполнить с ревностью свою дол-
жность, а учащиеся с их стороны
показать в науках успехи, и упот-
редя их к общей пользе, доказать
усердие к услуге отечества и к
пользе онаго любови; долг, котора-
го требует от них благодарность,
честность, закон и собственная их
самих польза».

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» сегодня — это сеть специализированных аудиторий, оснащенных современными отечественными и зарубежными приборами и оргтехникой. Благоприятная среда университета способствует высокому уровню интеллекта и культуры студентов — будущих инженеров, ученых и педагогов. Это более 16000 студентов, более 211000 м² учебно-научных площадей. Университет имеет высший государственный статус образовательной системы России, являясь особо ценным объектом культурного наследия народов Российской Федерации.

Университет ведет подготовку по 46 направлениям бакалавриата и магистратуры, по 71 инженерной специальности для России и 51 стран Азии, Европы, Африки и Америки. Университет — это лучшее академическое образование в области геологии, горного дела, шахтного строительства, металлургии, геодезии, экономики, экологии по всему спектру полезных ископаемых, включая нефть и газ. Университет имеет высшую квалификацию профессорско-преподавательского состава — более 88 % — доктора и кандидаты наук, более 33 профессоров являются заслуженными деятелями науки.

Университет обладает уникальной научно-исследовательской базой и выполняет исследования по следующим приоритетным направлениям:

- Технологическое развитие минерально-сырьевой базы
- Разработка эффективных и ресурсосберегающих технологий добычи и переработки минерального сырья
- Разработка технологий обеспечения экологической безопасности на объектах минерально-сырьевого комплекса
- Обеспечение экономического и правового механизмов управления недропользованием.





Издаются с 1907 года

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Том 212

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • 2015

научный журнал

Учредитель Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

Редакционный совет

ЛИТВИНЕНКО В.С., д-р техн. наук, профессор (председатель)
БАРЯХ А.А., д-р техн. наук, профессор
ВАЙСБЕРГ Л.А., чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор
КЛЕЙНЕР Г.Б., чл.-кор. РАН, д-р экон. наук, профессор
МАРИН Ю.Б., чл.-кор. РАН, д-р геол.-минерал. наук, профессор
НАБОЙЧЕНКО С.С., чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор
ПАШКЕВИЧ М.А., д-р техн. наук, профессор
СОМОВ В.Е., д-р экон. наук, канд. техн. наук, профессор

Иностранные члены редакционного совета

АНЦУТКИН ОЛЕГ, профессор, Швеция
ГУРГЕНЧИ ХАЛ, профессор, Австралия
КАЛМ ВОЛЛИ, профессор, Эстония
КРАСЛАВСКИ АНДЖЕЙ, профессор, Финляндия
КРОКЕ ЭДВИН, профессор, Германия
МУТИКАЙНЕН ИИПО, профессор, Финляндия
ВЛАСАК ПАВЕЛ, профессор, Чехия
ВЕЙСС ГАБРИЭЛЬ, профессор, Словакия

Редакционная коллегия

ЛИТВИНЕНКО В.С., д-р техн. наук (главный редактор)
ТРУШКО В.Л., д-р техн. наук (зам. главного редактора)
АФАНАСЬЕВ В.Г., д-р ист. наук
БРИЧКИН В.Н., д-р техн. наук
ГЕНДЛЕР С.Г., д-р техн. наук
ИВАНОВ М.А., д-р геол.-минерал. наук
ЛИГОЦКИЙ Д.Н., канд. техн. наук
ПОНОМАРЕНКО Т.В., д-р экон. наук
ПРОТОСЕНЯ А.Г., д-р техн. наук
РОГАЧЕВ М.К., д-р техн. наук
СЫРКОВ А.Г., д-р техн. наук
СЫЧЕВ Ю.А., канд. техн. наук
ЧЕРЕПОВИЦЫН А.Е., д-р экон. наук
ШПЕНСТ В.А., д-р техн. наук

Разделы

- Геология •Горное дело •Нефтегазовое дело •Металлургия и обогащение •Электромеханика и машиностроение
- Геонаноматериалы •Геоэкология и безопасность жизнедеятельности •Геоэкономика и менеджмент
- Горное образование: традиции и перспективы в XXI веке •Слово молодому ученому

Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Научной электронной библиотеки [http:// elibrary.ru](http://elibrary.ru)

Редакция

Лебедев В.Л. (начальник РИЦ)
Дрибинская Е.С.
Левина Л.А.
Неверова И.В.
Ребещенкова И.Г.
Сочивко Н.И.

Адрес редакции: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

Тел. (812) 328-8416; факс (812) 327-7359
E-mail: rectorat@spmi.ru

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-22881 от 26.12.2005

© Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015



Published since 1907

PROCEEDINGS OF THE MINING INSTITUTE

Volume 212

ST PETERSBURG • 2015

Scientific Journal

Founded by the National Mineral Resources University (Mining University)

Editorial board

LITVINENKO V.S., Dr. of Engineering Sciences, Professor (chairman)
BARYAKH A.A., Dr. of Engineering Sciences, Professor
VAISBERG L.A., Associate Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr of Engineering Sciences, Professor
KLEINER G.B., Associate Member of the Russian Academy of Sciences,
Dr. of Economics, Professor
MARIN Y.B., Associate Member of the Russian Academy of Sciences,
Director of Geological and Mineral Sciences, Professor
NABOICHENKO S.S., Associate Member of the Russian Academy of Sciences
Dr. of Engineering Sciences, Professor
PASHKEVICH M.A., Dr. of Engineering Sciences, Professor
SOMOV V.E., Dr. of Economics, PhD of Engineering Sciences, Professor

Foreign members of the editorial board

ANTSUTKIN OLEG, Professor, Sweden
GURGENCI HAL, Professor, Australia
KALM VOLLI, Professor, Estonia
KRASLAWSKI ANDRZEJ, Professor, Finland
KROKE EDWIN, Professor, Germany
MUTIKAINEN ILPO, Professor, Finland
VLASAK PAVEL, Professor, Czech Republic
WEISS GABRIEL, Professor, Slovakia

Editorial panel

LITVINENKO V.S., Dr. of Engineering Sciences (Editor)
TRUSHKO V.L., Dr. of Engineering Sciences (Deputy Editor)
AFANASYEV V.G., Dr of Historical Sciences
BRICHKIN V.N., Dr. of Engineering Sciences
GENDLER S.G., Dr. of Engineering Sciences
IVANOV M.A., Dr. of Geological and Mineral Sciences
LIGOTSKY D.N., PhD in Engineering Sciences
PONOMARENKO T.V., Dr of Economics
PROTOSENYA A.G., Dr. of Engineering Sciences
ROGACHEV M.K., Dr. of Engineering Sciences
SIRKOV A.G., Dr. of Engineering Sciences
SYCHEV Y.A., PhD in Engineering Sciences
CHEREPOVITSIN A.E., Dr of Economics
SHPENST V.A., Dr. of Engineering Sciences

Sections

- Geology •Mining •Oil and gas •Metallurgy and mineral processing •Electromechanics and mechanical engineering
- Geo-nanomaterials •Engineering geology and health and safety •Geoeconomics and management
- Mining education: traditions and perspectives in the XXI century •Young Scientists Speak

The journal is included in the Russian Science Citation Index

The Scientific Electronic Library <http://elibrary.ru>

Editorial

Lebedev V.L. (head of the Editing and Publishing Center)
Dribinskaya E.S.
Levina L.A.
Neverova I.V.
Rebeshchenkova I.G.
Sochivko N.I.

Editorial: 2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia

Tel. (812) 328-84-16; fax (812) 321-40-77

Email: lebedev@spmi.ru

Certificate of registration PI № ФС77-22881 from 26.12.2005

© National Mineral Resources University (Mining University), 2015

СОДЕРЖАНИЕ

От редколлегии тома	5
Геологическое обеспечение развития минерально-сырьевого комплекса России	
<i>Арчegov В.Б., Нефедов Ю.В.</i> Стратегия нефтегазопроисковых работ в оценке топливно-энергетического потенциала шельфа арктических морей России.....	6
<i>Алексеев В.И.</i> Дальневосточный пояс литий-фтористых гранитов, онгонитов и оловорудных цвиттеров.....	14
<i>Иванов М.А.</i> Минералогические признаки и закономерности пространственного распределения разновозрастной трещиноватости в гранитах и пегматитах месторождения «Возрождение» («Кавантсаари»), Выборгский массив	21
<i>Сендек С.В., Чернышев К.Е.</i> Теоретические обоснования анализа распределений концентраций золота в рудах гидротермальных месторождений	30
<i>Дурягина А.М., Воронцова Н.И., Николаева Е.С.</i> Геология и минералого-геохимические особенности коры выветривания Нижнетагильского и Светлоборского массивов Среднего Урала.....	40
<i>Пилюгин А.Г., Таловина И.В., Дурягина А.М., Никифорова В.С.</i> Геохимические особенности платиноносных дунитов Светлоборского и Нижнетагильского массивов Платиноносного пояса Урала	50
<i>Тарасенко А.Б., Матвеев В.П., Сляднева Д.А., Кириллова Д.В.</i> Литолого-геохимическая характеристика рифового массива острова Берха (архипелаг Новая Земля)	62
<i>Цинкобурова М.Г., Безгодова Д.В.</i> Об особенностях комплекса <i>Orthambonites</i> Pander – <i>Orthis</i> Dalman (брахиоподы) из утраченных обнажений среднеордовикских отложений на р.Пулковке (Ленинградская область).....	72
<i>Судариков С.М., Нгуен Там Тханг.</i> Роль подземных вод в образовании метана на угольном месторождении Маохе (Северный Вьетнам)	79
<i>Устюгов Д.Л., Мирончук Д.П.</i> Экспресс-откачки как способ выявления взаимодействия обводненной толщи с внешней средой	84
<i>Норватов Ю.А., Сергутин М.В.</i> Прогнозирование водопритоков в горные выработки при разработке рудных месторождений комбинированным открыто-подземным способом.....	89
Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых	
<i>Ермолин Е.Ю., Ингеров А.И., Шаабан Х.М.</i> Использование вертикальной магнитной компоненты в магнитотеллурическом методе для оценки параметров аномальных объектов, находящихся в стороне от профиля измерений	95
<i>Жамалетдинов А.А., Шевцов А.Н., Колобов В.В., Петрищев М.С.</i> Опыт электромагнитного зондирования в поле промышленной ЛЭП «Уренгой – Пангоды» в комплексе с АМТ-МТ-зондированиями	101
<i>Неведрова Н.Н., Санчаа А.М., Бабушкин С.М., Кречетов Д.В.</i> Возможности речной электроразведки в нефтеносных районах Сибирской платформы (акватория р.Лены, Криволюкская площадь)	113
<i>Орехов А.Н.</i> Информативность геофизических методов при поисках золотого оруденения в черносланцевых толщах	117
<i>Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., Оборнев И.Е., Родионов Е.А.</i> Численные методы оценки достоверности результатов интерпретации данных электромагнитных зондирований.....	122
<i>Филимончиков А.А., Татаркин А.В., Гилева М.И.</i> Оценка перспективности месторождений грунтовых строительных материалов методами электрометрии	130
<i>Шаабан Х.М., Газала Х., Аль-Сайед Э., Эль-Кадди Г.</i> Применение электромагнитного метода переходных процессов для поисков неглубоких залежей подземных вод в районе города Итай Эль-Баруд, дельта Нила (Египет)	135
<i>Сенчина Н.П.</i> Анализ корреляционных связей результатов измерения естественного электрического поля и содержаний химических элементов (на примере объектов Среднего Урала).....	141

CONTENTS

Editorial Note	5
----------------------	---

Geological support for Russia's mineral resources development

<i>Archegov V.B., Nefedov Y.V.</i> Oil and gas exploration strategy in evaluation of fuel and energy potential of Russian Arctic shelf	6
<i>Alekseev V.I.</i> Far east belt of lithium-fluoric granites, ongonites and tin ore zwitterers.....	14
<i>Ivanov M.A.</i> Mineralogical characteristics and spatial distribution of different age fractures in granites and pegmatites of the «Vozrozhdenie» deposit («Kawantsaari»), the Vyborg massif	21
<i>Sendek S.V., Chernyshev K.E.</i> Theoretical justification for analyzing distribution of gold concentrations in ores of hydrothermal gold deposits.....	30
<i>Duryagina A.M., Vorontsova N.I., Nikolaeva E.S.</i> Geology, mineralogy and geochemistry of weathering crust of the Svetloborsky and Nizhnetagilsky massifs, the Middle Urals	40
<i>Pilyugin A.G., Talovina I.V., Duryagina A.M., Nikiforova V.S.</i> Geochemical features of platiniferous dunites of the Svetloborsky and Nizhnetagilsky massifs, the Platinum Belt of the Urals	50
<i>Tarasenko A.B., Matveev V.P., Slyadneva D.A., Kirillova D.V.</i> Lithological and geochemical characteristics of the reef mass of ostrov Berkha (the Novaya Zemlya archipelago)	62
<i>Tsinkoburova M.G., Bezgodova D.V.</i> On the features of the complex <i>Orthambonites</i> Pander – <i>Orthis</i> Dalman (brachiopoda) of the lost outcrops ordovician sediments on the river Pulkovka (Leningrad region)	72
<i>Sudarikov S.M., Nguen Tat Thang.</i> The role of groundwater in methane formation in the coal field of Maohe (North Vietnam)	79
<i>Ustyugov D.L., Mironchuk D.P.</i> Short-term pumping tests as an identification method of aquifer-surface interaction	84
<i>Norvatov Yu.A., Sergutin M.V.</i> Prediction of water inflows into mine workings in the process of combined open-underground ore mining operations	89

Application of up-to-date electric exploration technologies in mineral deposits prospecting

<i>Ermolin E.J., Ingerov A.I., Shaaban H.M.</i> Application of vertical magnetic component in magnetotelluric method to estimate parameters of anomalous objects away from the profile line.....	95
<i>Zhamaletdinov A.A., Shevtsov A.N., Kolobov V.V., Petrishchev M.S.</i> Pilot electromagnetic soundings with the use of industrial power transmission line «Urengoy – Pangody» along with AMT-MT-soundings	101
<i>Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Babushkin S.M., Krechetov D.V.</i> Potential of river electrical exploration in oil regions of the Siberian platform (the Lena river area, Krivolukskaya area).....	113
<i>Orekhov A.N.</i> Informative importance of geophysical methods for exploration of gold ore mineralization in black shale strata	117
<i>Shimelevich M.I., Osbornev E.A., Osbornev I.E., Rodionov E.A.</i> Numerical methods of validity estimation of electromagnetic sounding data interpretation results	122
<i>Filimonchikov A.A., Tatarkin A.V., Gileva M.I.</i> Prospectivity assessment of ground building materials deposits using electrologging	130
<i>Shaaban H.M., Ghazala H., Al-Sayed E., El-Qady G.</i> Application of the time-domain electromagnetic method for shallow groundwater prospecting in Itay El-Baroud area, Nile Delta (Egypt)....	135
<i>Senchina N.P.</i> The analysis of correlation relationships between results of natural electric field and chemical elements content measurements (a case study of Central Urals objects)	141

В представляемый читателю том «Записок Горного института» вошли работы по геологии и геофизике, которые явились результатом научных исследований преподавателей, сотрудников и молодых ученых геологоразведочного факультета Горного университета, а также специалистов из других учебных, научных и производственных организаций геологического профиля.

Часть журнала представляют статьи, касающиеся проблем минералогии, петрологии, геохимии, инженерной геологии, вопросов строения, генезиса, закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых. Значительная часть работ посвящена вопросам применения электроразведочных методов для изучения сейсмоактивных регионов, поисков месторождений углеводородного сырья, рудных, геотермальных полезных ископаемых, решению гидрогеологических и инженерно-геологических задач. В ряде статей рассмотрены тенденции развития аппаратной базы, методик электроразведочных съемок и технологий обработки и интерпретации различных геофизических данных.

Представленный том журнала будет интересен тем, кто работает и учится в геологической сфере, – научным работникам, геологам-практикам, молодым ученым, студентам.

Научные редакторы:

А.С.ЕГОРОВ, д-р геол.-минерал. наук, профессор
А.В.КОЗЛОВ, д-р геол.-минерал. наук, профессор

Редколлегия тома:

А.С.ЕГОРОВ, д-р геол.-минерал. наук, профессор
А.В.КОЗЛОВ, д-р геол.-минерал. наук, профессор
М.А.ИВАНОВ, д-р геол.-минерал. наук, профессор
И.В.ТАЛОВИНА, д-р геол.-минерал. наук, профессор
Д.Л.УСТЮГОВ, канд. геол.-минерал. наук, доцент
В.А.СТЕПАНОВ, канд. геол.-минерал. наук, доцент
Н.И.ВОРОНЦОВА, канд. геол.-минерал. наук, доцент
Н.Н.ПОКРОВСКАЯ, инженер УНЛ СТПр МПИ

Геологическое обеспечение развития минерально-сырьевого комплекса России Geological support for Russia's mineral resources development

УДК 553.041

СТРАТЕГИЯ НЕФТЕГАЗОПОИСКОВЫХ РАБОТ В ОЦЕНКЕ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ШЕЛЬФА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ

В.Б.АРЧЕГОВ, канд. геол.-минерал. наук, доцент, *v.archegov@ya.ru*

Ю.В.НЕФЕДОВ, канд. геол.-минерал. наук, ассистент, *yurijnefedov@yandex.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Нефть и газ являются самыми важными ресурсами, которыми обладает Арктика. Поиски, разведка и освоение залежей нефти и газа в арктических районах связаны с решением сложных технико-технологических задач. Важнейшим достижением стало открытие глобального Арктического пояса нефтегазоносности. На шельфах Баренцева, Печорского и Карского морей геологоразведочными работами закартированы многочисленные локальные объекты, выявлено 22 месторождения углеводородов. В связи с перспективой развития нефтегазопроисковых работ и в других арктических акваториях (моря Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) предлагается осуществить геофизические исследования и глубокое бурение. В зоне транзитного мелководья целесообразно применение самоподъемных установок с выдвигаемыми опорами. В других частях морей, где глубины нарастают, складывается сложная ледовая обстановка (айсберги, дрейфующие льды и ледовые поля, штормы) и проявляются другие климатические характеристики, повышающие риск ведения бурения с морских платформ, предлагается глубокое бурение с островов. Представляется возможным использование для выполнения гидрологических и геофизических исследований (последовательное изучение температур, солёности, плотности, газогидратности и других характеристик вод морских бассейнов) подводного флота и «точечного» бурения для изучения донных осадков и геологического разреза чехла в обусловленных пунктах перспективных земель.

Ключевые слова: арктические моря, минерально-сырьевой потенциал, нефтегазоносность, шельф, нефть, газ, месторождения, глубокое бурение, морские платформы, ледовая обстановка, климатические условия, газогидратообразование, подводный флот.

Арктическая морская геополитика – многогранная проблема, затрагивающая интересы России как в политическом, так и в экономическом аспектах. Остро назрела необходимость реального освоения минерально-сырьевого потенциала северных территорий и акваторий нашей страны – ее будущего расцвета.

Здесь сосредоточены крупные балансовые запасы редких металлов, значительная часть добычи нефелинового и кварц-полевошпатового сырья, добываются руды черных и цветных металлов, бокситы, золото, фосфаты, слюда-мусковит и огнеупорные глины. Есть реальные перспективы открытия в северо-западном арктическом регионе России новых месторождений титана, хромитов, алмазов, полиметаллических руд, марганца, барита, металлов платиновой группы, золота [1].

Нефть и газ в настоящее время являются самыми важными ресурсами, которыми обладает Арктика. Поиски, разведка и освоение залежей нефти и газа в арктических районах связаны с суровыми природно-климатическими условиями и решением сложных технико-технологических задач [2].

Проблема постановки научно-исследовательских работ и приоритетность их проведения будут зависеть и от географической ситуации, поскольку Россия обладает самой протяженной арктической границей (22600 км) среди всех северных держав и потому не может не быть субъектом приполярных экономических и юридически-правовых процессов.

Юридический статус Арктики с точки зрения межгосударственных соглашений и международного права – вопрос существенно менее определенный и гораздо более спорный. Пять стран уже обозначили, что именно они разделят между собой природные богатства Арктики: Норвегия, Исландия, Дания, Канада, США и Россия. Главным препятствием при разделе является недостаточность сведений о природе и происхождении шельфа. Основным и решающим доказательством происхождения границы континентального шельфа могут быть, по мнению Института географии РАН [6], только прямые измерения. При бурении глубиной как минимум 5 км может быть найден гранит (значит, это шельф) или базальт (значит, хребет океанический и не соединен с материком).

В настоящее время определенного статуса за Арктикой не закреплено. Документами, которые в какой-то степени могут урегулировать данный вопрос, являются Конвенция ООН по морскому праву 1982 г. [4] и Конвенция о континентальном шельфе 1958 г. [5]. Но в них даются разные определения понятия «континентальный шельф». Согласно конвенции по морскому праву, континентальный шельф прибрежного государства включает в себя морское дно и недра подводных районов, простирающихся за пределы его территориального моря на всем протяжении естественного продолжения его сухопутной территории до внешней границы подводной окраины материка или на расстояние 200 морских миль от исходных линий, от которых отмеряется ширина территориального моря, когда внешняя граница подводной окраины материка не простирается на такое расстояние.

Понятие «континентальный шельф», по Женевской конвенции 1958 г., совпадает с геологическим понятием шельфа.

Именно расхождения в сущности понятия шельфа позволяют вести полемику о его разделе. Вопрос становится все острее с учетом того факта, что мировых запасов нефти при нынешних темпах добычи хватит на 40 лет, а если учитывать рост потребления энергии, на 30 лет. Таким образом, освоение шельфа как источника добычи энергетических ресурсов представляется стратегически важной задачей каждого государства.

На протяжении всей своей истории Россия имела в Арктике геополитические, военные, экономические интересы. До недавнего времени особый интерес к Арктике подогревало и военное противостояние двух супердержав – США и СССР. Это объясняется тем, что кратчайший путь полета между США и Россией лежит через Северный Ледовитый океан. К основным экономическим интересам Российской Федерации в Арктике можно отнести использование:

– Арктической зоны России в качестве стратегической ресурсной базы Федерации, обеспечивающей решение задач социально-экономического развития страны;

– Северного морского пути в качестве национальной единой транспортной коммуникации России в Арктике.

Раздел Арктического шельфа – это вариант обеспечения экономических и политических интересов Российской Федерации как на сегодняшний день, так и на далекую перспективу.

Проблемы, связанные с добычей нефти и газа, для современного общества являются определяющими. В настоящий момент нефть и газ рассматриваются как основные и на сегодняшний день незаменимые источники энергии, поэтому разработка естественных месторождений является приоритетной задачей для каждой энергонезависимой страны.

Нефть и газ относятся к невозобновляемым ресурсам, месторождения которых стремительно истощаются, поиск новых альтернативных источников энергии пока не дает существенного результата. Наиболее актуальным с точки зрения промышленного производства заменителем сырой нефти является синтетическая нефть. Синтетические нефтепродукты производятся из природного газа, существуют эффективные технологии производства из угля и отходов. Несмотря на высокие показатели качества синтетических продуктов, предполагать полную замену сырой нефти невозможно. При этом не следует забывать, что сырьем для синтетических продуктов являются также природные ресурсы – газ и уголь. При современном уровне технологий цивилизация обречена на энергетическую зависимость от природных залежей нефти, газа и другого энергетического сырья.

Работы по обоснованию внешней границы континентального шельфа России активно проводятся после ратификации в 1997 г. Россией Конвенции ООН по морскому праву. Это особенно актуально в XXI в., когда на российский север простираются интересы разных государств, даже тех, которые не имеют непосредственных границ с морями Северного Ледовитого океана.

Стратегия развития Арктической зоны РФ до 2020 г. [7] утверждена Президентом России В.В.Путиным 20 февраля 2013 г. В этом документе сформулированы приоритетные направления развития Арктики и обеспечения национальной безопасности. Одним из приоритетных направлений развития российского Севера является эффективное использование ресурсной базы.

Располагая огромными минерально-сырьевыми ресурсами, Арктика и восточные районы России характеризуются малой заселенностью (12 млн чел.) и чрезвычайно слабой социально-промышленной инфраструктурой.

Анализ структуры распределения начальных суммарных ресурсов (НСР) углеводородов (УВ) по арктическим акваториям показывает, что наибольшая доля (85 %) приходится на моря Западной Арктики – Баренцево, Печорское и Карское [6]. Геолого-геофизическая изученность арктического шельфа остается сравнительно низкой и крайне неравномерной (табл. 1).

Таблица 1

Геолого-геофизическая изученность морей России [10]

Число пробуренных скважин	Моря	Плотность сейсмических работ, км/км ²
0	Восточно-арктические	0,04
13	Карское	0,09
51	Баренцево	0,31

Анализ состояния геолого-геофизических исследований российского континентального шельфа свидетельствует о наличии научно-методических и теоретических проблем, требующих своего решения:

- развитие нормативной базы освоения ресурсов шельфа;
- разработка научных представлений об особенностях глубинного строения, тектоники и геодинамики земной коры и верхней мантии арктического шельфа и прилегающих частей суши;
- развитие методики трехмерного моделирования структур платформенного чехла и консолидированной коры по комплексу сейсмических, гравиметрических, магнитометрических, электроразведочных данных и результатов бурения.

Основой экономического развития арктического региона является воспроизводство минерально-сырьевой базы (МСБ) и, в первую очередь, становление и подъем ее топливно-энергетической составляющей. Важнейшим достижением последних лет стало открытие

глобального Арктического пояса нефтегазоносности. Была раскрыта общая геологическая структура изученных шельфовых зон, выявлены основные параметры нефтегазоносности, определены структурные элементы и тенденции изменения мощностей осадочного чехла.

Установлено, что средняя плотность извлекаемых НСР УВ составляет 20-25 тыс.т/км² [10]. В Западной Арктике (Баренцево и Карское моря), несмотря на скромный объем выполненных геологоразведочных работ (сейсморазведки в 5-6 раз, а бурения в 20-25 раз меньше, чем в норвежском секторе Северного моря), геологоразведочными работами закартированы многочисленные локальные объекты, выявлено 22 месторождения.

На шельфе Баренцева (включая Печорское) моря открыты Приразломное, Варандей-море, Медыньское-море, Долгинское – нефтяные (Н); Приразломное, Варандей-море, Медыньское-море, Долгинское – нефтегазоконденсатное (НГК); Штокмановское, Поморское, Ледовое – газоконденсатные и Северо-Кильдинское, Мурманское, Лудловское – газовые (Г) месторождения (табл.2).

Таблица 2

Характеристика месторождений нефти и газа, открытых в акватории Баренцева моря

Месторождение	Основные параметры нефтегазоносности месторождений					Флюид (газ, нефть)
	Количество продуктивных пластов	Ловушка	Нефтегазоносный комплекс (НГКс)			
Коллектор (К)			Покрышка (П)	Возраст (НГКс = К = П)		
Мурманское	Многопластовое (около 20 пластов)	Антиклиналь	Песчаный	Глинистая	Средний и верхний триас	Газ сухой метановый в интервале 3000-3100 м
Северо-Кильдинское	–	Брахиантиклиналь	Песчаники с прослоями алевролитов	Глинистая	Средний и верхний триас и верхняя пермь	Газ сухой метановый
Штокмановское уникальное	Многопластовое; пласты Ю ₀ , Ю ₁ , Ю ₂ , Ю ₃	Изометричная антиклиналь; пластово-сводовая	Песчаники	Глинистая региональная J ₃ -K ₁ , 900-1000 м	Средняя – верхняя юра	Газ, конденсат; интервал продуктивности 1380-2625 м
Лудловское крупное	Пласт толщиной 30-40 м	Брахиантиклиналь, осложнена разрывами; пластово-сводовая	Песчаники и алевролиты	Глинистая региональная J ₃ -K ₁ , 100-200 м	Верхняя юра (келловей)	Газ метановый (CH ₄ = 96±97 %); конденсат – до 0,84 г/см ³
Ледовое уникальное	Многопластовое; пласты Ю ₀ , Ю ₁ , Ю ₂ , Ю ₃	Брахиантиклиналь, осложнена разрывами; пластово-сводовая	Песчаники и алевролиты (12-50 м)	Глинистая	Средняя – верхняя юра	Газ метановый (CH ₄ = 96±97 %); конденсат – до 0,82 г/см ³
Варандей-море	–	Высокоамплитудная (> 200 м) узкая двухкупольная брахиантиклиналь, осложнена разрывами с амплитудами 150-200 м	–	–	–	–

На шельфе Карского моря, в Тазовской и Обской губах, открыты Салекаптское, Юрхаровское нефтегазоконденсатные, Ленинградское, Русановское газоконденсатные и Антипаютинское, Семаковское, Тота-Яхинское, Каменомысское-море, Северо-Каменомысское, Гугорьяхинское, Обское газовые месторождения.

За относительно короткий срок в Баренцево-Карской нефтегазоносной провинции можно разведать несколько супергигантских по запасам газовых месторождений и подготовить к освоению 20-25 трлн м³ газа с газоконденсатом, а вместе с Русановским и Ленинградским месторождениями – 30-35 трлн м³, что приведет к созданию новой, надежной, крупнейшей российской базы газоснабжения планетарного значения, способной обеспечить решение проблем энергетической политики страны, развитие производственного потенциала ее регионов в XXI в.

Для бурения поисково-разведочных скважин на континентальном шельфе, как показывает отечественный опыт, в зависимости от глубины моря могут применяться следующие технические средства: от 20 до 75 м – самоподъемные установки с выдвигными опорами; от 50 до 200 м – полупогружные установки с якорной системой позиционирования; от 50 до 300 м – буровые суда с динамической системой позиционирования [8].

Проведен сравнительный анализ характеристик водной среды арктических морей России: тип моря, площадь, объем, глубина средняя (максимальная), температура воздуха (воды), скорость ветра, соленость воды, плотность воды, циркуляция вод, приливы, колебания уровня моря, льды, содержание кислорода, питательных солей, хозяйственное использование, Чукотского и Восточно-Сибирского морей, моря Лаптевых, Карского и Баренцева морей [2].

В зоне транзитного мелководья [9] целесообразно применение самоподъемных установок с выдвигными опорами [8]. В других частях морей, где глубины нарастают, складывается сложная ледовая обстановка и проявляются другие климатические характеристики, повышающие риск ведения бурения с морских платформ, с целью изучения глубинного строения шельфа предлагается глубокое бурение с островов арктических морей. Первоочередными объектами для постановки глубокого бурения могут быть острова Врангеля (о. Геральд), Айон, Медвежьи, Бол. Ляховский (острова Мал. Ляховский, Котельный, Новая Сибирь), дельта Лены, острова Бол. Бегичев, Большевик (острова Октябрьской Революции, Комсомолец), мыс Челюскина, острова Свердруп (острова Арктического института, Известий ЦИК и др.), Гыданский полуостров, острова Вайгач, Колгуев, полуостров Канин (мыс Канин Нос) [1, 2].

Бурение с островов будет способствовать и решению ряда экологических проблем (утилизация технических вод, бурового фильтрата и др.); бурение с морских платформ – вопросы транспортировки, утилизации и захоронения отходов бурения, это большая экологическая проблема, поскольку арктические моря наиболее подвержены техногенному вмешательству.

На бурение глубоких скважин в арктической зоне следует возложить задачи, присущие опорному и параметрическому бурению. Данные бурения глубоких скважин будут способствовать:

- повышению достоверности интерпретации геофизических исследований;
- получению обоснованной количественной оценки нефтегазового потенциала;
- выявлению районов преобладающей нефте- или газоносности;
- прогнозу и определению нефтегазоносных комплексов, зон нефтегазонакопления и типов ловушек;
- получению информации о нефтегазоносности континентального склона и глубоководной области в пределах экономической зоны России.

Острова арктических морей России – объекты для постановки глубокого бурения с целью изучения геологического строения и нефтегазоносности осадочного чехла шельфовых и глубоководных зон северных морей.

Учитывая средние и максимальные глубины арктических морей, климатические условия (айсберги, дрейфующие льды и ледовые поля, шторма), представляется возможным использование для выполнения научно-исследовательских и буровых работ подводного флота [2].

Подводные лодки, отработавшие свой штатный срок, но корпуса и двигательные установки которых могут еще послужить, должны быть оборудованы буровыми установками и специ-

альной аппаратурой для проведения гидрологических и геофизических исследований (последовательное изучение температур, солености, плотности, газогидратности и других характеристик вод морских бассейнов) и «точечного» бурения с бортов подводных судов для изучения донных осадков и геологического разреза чехла в обусловленных пунктах перспективных земель [2].

Впервые морские научно-исследовательские работы с борта подводной лодки «Северянка» (переоборудованный «дизель» среднего класса) были осуществлены еще в 1950-е годы в СССР. Сегодня, судя по открытой печати, в этом направлении наглядным примером служат США.

Регулярные научные исследования Арктики в интересах ВМС США начались в 1994 г., когда была утверждена пятилетняя программа сотрудничества ВМС и ученых различных научных учреждений SCICEX (Scientific Ice Expeditions) по исследованию окружающей среды на период 1995-1999 годов, для которых военно-морские силы выделили атомные многоцелевые подводные (ПЛА) лодки типа «Стерджен» («Sturgeon») [3].

Первое пробное плавание ПЛА «Парго» (SSN-650 «Pargo») в 1993 г. с гражданскими учеными в Северный Ледовитый океан показало высокую эффективность такого сотрудничества. В дальнейшем плавание подводных лодок «Кавалла», «Поджи», «Арчерфиш» и «Хокбилл» («Kavalla», «Pogy» «Archerfish», «Hawkbill») совместно с гражданскими учеными позволило получить разнообразную информацию по геологии, физике, химии и биологии этого региона, динамике ледового покрова, циркуляции вод и батиметрическим характеристикам океана, которая могла быть использована при изучении влияния этих факторов на использование подводных лодок и их вооружения в арктических широтах [3].

Высокая мобильность подводных лодок обеспечила получение данных и позволила собрать образцы из недоступных ранее областей с маршрутов общей протяженностью более 100000 миль. На первом этапе исследования проходили в околополюсном районе и в море Бофорта. Продолжение исследований последовало в 2000 г. (SSN-686 L. Mendel Rivers), 2001 г. (SSN-756 Scranton), 2003 г. (SSN-718 Honolulu) и 2005 г. (SSN-716 Salt Lake City). В июне 2010 г. было подписано соглашение о проведении второго этапа программы SCICEX (Phase II SciencePlan – U.S. Arctic Research Commission) [3].

Серьезный риск при постановке и проведении морских буровых работ представляют газогидраты, которые все еще мало изучены в наших арктических морях. Газогидраты – соединения газа и воды, в котором молекулы газа (обычно метана) размещаются внутри молекул воды, приобретая вид снега. При этом объем метана в газогидрате уменьшается почти в 200 раз. При разрушении газогидрата, а это происходит при уменьшении давления или увеличении температуры, выделяется большой объем газа. Газогидрат может образоваться в донных осадках при давлении 25 атм и температуре 0 °С. Если температура выше, то для образования газогидрата необходимо увеличение давления.

В морях водная толща создает высокое давление на осадочные породы (на каждые 10 м глубины давление возрастает на 1 атм, при этом придонная вода имеет постоянно низкую температуру – до –(2-3) °С. В океанах и морях газогидраты обычно встречаются на глубинах от 300-400 до 1000-1200 м и более. Они насыщают верхний двухсотметровый слой донных осадков, содержатся в поровом пространстве в виде прослоев, линз, в рассеянном состоянии и составляют 10-20 % от общего объема осадков.

Роль газовых гидратов двойственна. С одной стороны, газовые гидраты участвуют в процессе формирования залежей нефти и газа, так как являются хорошим покрытием для их сохранения. С другой – при активизации зон разломов происходит разрушение нефтегазовых залежей и нефтегазоносных пород, интенсивная миграция газа из залежей газогидратов к дневной поверхности. В районе выходов пузырей метана формируются морфоструктуры нарушенных донных осадков. Как на глубине моря, так и на шельфе эти структуры напоминают грязевые вулканы [1].

В глубоководной зоне, например, Баренцева моря, в которой выявлено уникальное Штокмановское газоконденсатное месторождение, природные условия также благоприят-

ны для образования и стабильного существования гидрата метана: глубина моря свыше 240 м, температура придонной воды –1 °С, геотермический градиент 20-40° С/км, достаточная концентрация растворенного газа.

Высокое газосодержание переводит мелко- и тонкозернистые пески в плавунное состояние. Пузырьки газа, содержащиеся в поверхностных осадках Печорского моря, снижают водо- и газопроницаемость грунта, переводят его в состояние «тяжелой жидкости». Прочность таких жидкообразных систем стремится к нулю, погружение в них конуса под заданной нагрузкой, несколько замедляясь, может продолжаться до подошвы толщи. Песчаные и супесчаные газонасыщенные толщи Печорского моря (и других аналогичных акваторий) не могут рассматриваться в качестве надежного основания для любых инженерных сооружений.

Серьезные проблемы для проектирования и строительства буровых платформ и других подводных сооружений на морском дне под толщей воды свыше 240-300 м создает возможность присутствия в грунтах природных газовых гидратов. В любом случае, учитывая неустойчивость гидратоносных многолетнемерзлых грунтов с подземными льдами, следует избегать контактов с ними подводных сооружений.

Весьма актуальным является изучение процессов гидратообразования, прогноз зон газогидратообразования, влияние новейшего тектогенеза на рельефообразующую роль газовых гидратов и оценка рисков при разработке месторождений нефти и газа в зонах гидратообразования Баренцева моря.

Инвестирование в государственную программу комплексных нефтегазоперспективных работ в арктической зоне России должны в значительной степени осуществлять крупнейшие нефтегазодобывающие компании, заинтересованные в устойчивости и пополнении своего капитала, связанного с освоением новых нефтегазоперспективных территорий и акваторий [1, 2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Арчegov В.Б. Минерально-энергетический комплекс Севера европейской части России и проблемы его освоения // Тр. науч.-исслед. отдела Института военной истории. СПб: Политехника-сервис, 2013. Т.6, кн.2. С.413-428.
2. Арчegov В.Б. Арктические моря России и их будущее // Нефтегазгеологический прогноз и перспективы развития нефтегазового комплекса Востока России: Сб. материалов науч.-практ. конференции / ВНИГРИ. СПб, 2013. С.5-14.
3. Зайцев Ю.М. Современные исследования Арктики в интересах ВМС США // Труды науч.-исслед. отдела Института военной истории. СПб: Политехника-сервис, 2014. Т.9, кн.2. С.93-105.
4. Конвенция Организации Объединенных Наций по морскому праву: [Электронный ресурс] // 1082. http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/lawsea.pdf
5. Конвенция Организации Объединенных Наций о континентальном шельфе: [Электронный ресурс] // 1964. http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/conts.pdf
6. Морская геополитика в контексте XXI века: Сб. научных трудов. СПб: ИПК «Прикладная геология», Комиссия географии океана РГО, 2013. 295 с.
7. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года: [Электронный ресурс] // 2013. <http://government.ru/docs/22846/>
8. Техничко-технологическое обеспечение работ по изучению и освоению углеводородного потенциала // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. Минеральные ресурсы Российского шельфа. Спец. вып. 2006. С.24-33.
9. Транзитное мелководье – первоочередной объект освоения углеводородного потенциала морской периферии России: Сб. докл. Первой науч.-практ. конференции / ВНИГРИ. СПб, 2004. 305 с.
10. Углеводородный потенциал континентального шельфа России: состояние и проблемы освоения / Ю.Н.Григоренко, И.М.Мирчинк, В.И.Савченко, Б.В.Сенин, О.И.Супруненко // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. Минеральные ресурсы Российского шельфа. Спец. вып. 2006. С.14-21.

REFERENCES

1. Archegov V.B. Mineralno-energeticheskij kompleks Severa evropejskoj chasti Rossii i problemy ego osvoenija (*Mineral and Energy Complex of the Northern part of European Russia and problems of its development*). Trudy nauchno-issledovatel'skogo otdela Instituta voennoj istorii. St Petersburg: Politehnika-servis, 2013. Vol.6, book 2, p.413-428.

2. *Archegov V.B. Arkticheskie morja Rossii i ih budushhee (Russian Arctic seas and their perspectives)*. Neftegazogeologicheskij prognoz i perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa Vostoka Rossii. Sbornik materialov nauchno-prakticheskoj konferencii. VNIGRI. St Petersburg, 2013, p.5-14.
3. *Zajcev Ju.M. Sovremennye issledovanija Arktiki v interesah VMS SShA (Recent research in the Arctic region on behalf of the United States Navy)*. Trudy nauchno-issledovatel'skogo otdela Instituta voennoj istorii. St Petersburg: Politehnika-servis, 2014. Vol.9, book 2, p.93-105.
4. Konvenciya Organizacii Obedinyonnyh Nacij po morskomu pravu (*United Nations Convention on the Law of the Sea*). 1082. http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/lawsea.pdf
5. Konvenciya Organizacii Obedinyonnyh Nacij o kontinentanom shelfe (*Convention on the Continental Shelf*). 1964. http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/conts.pdf
6. Morskaya geopolitika v kontekste XXI veka (*Maritime geopolitics in the context of the XXI century*). Cb. Nauchnyh trudov. St Petersburg: IPK «Prikladnaya geologiya», Komissiya geografii okeana RGO, 2013, p.295.
7. Strategiya razvitiya Arkticheskoj zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacionalnoj bezopasnosti na period do 2020 goda (*Strategy for the Russian Arctic development and national security for the period up to 2020*). 2013. <http://government.ru/docs/22846>
8. Tehniko-tehnologicheskoe obespechenie rabot po izucheniju i osvoeniju uglevodorodnogo potenciala (*Technical and technological support for the exploration and development studies for hydrocarbon potential*). Mineral'nye resursy Rossii. Jekonomika i upravlenie. Mineralnye resursy Rossijskogo shelfa. Spec. vyp. 2006, p.24-33.
9. Tranzitnoe melkovode – pervoocherednoj obekt osvoenija uglevodorodnogo potenciala morskoy periferii Rossii (*Transit shallow waters - a primary object of hydrocarbon potential development of the Russian maritime periphery*). Sb. dokl. Pervoj nauchno-prakt. Konferencii. VNIGRI. St Petersburg, 2004, p.305.
10. *Grigorenko Ju.N., Mirchink I.M., Savchenko V.I., Senin B.V., Suprunenko O.I. Uglevodorodnyj potencial kontinentalnogo shelfa Rossii: sostojanie i problemy osvoenija (Hydrocarbon potential of the Russian continental shelf: state and problems of development)*. Mineralnye resursy Rossii. Jekonomika i upravlenie. Mineralnye resursy Rossijskogo shelfa. Spec. vyp. 2006, p.14-21.

OIL AND GAS EXPLORATION STRATEGY IN EVALUATION OF FUEL AND ENERGY POTENTIAL OF RUSSIAN ARCTIC SHELF

V.B.ARCHegov, *PhD in Geological and Mineral Sciences, Associate Professor, v.archegov@ya.ru*
Y.V.NEFEDOV, *PhD in Geological and Mineral Sciences, Assistant, yurijnefedov@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

Oil and gas are the most important resources of the Arctic region. Oil and gas prospecting, exploration and development in the Arctic region is associated with solving complex technical and technological problems. One of the most important achievements was the discovery of the global Arctic zone of oil and gas occurrence. Numerous local objects were mapped and 22 hydrocarbon deposits were found on the shelves of the Barents, Pechora and Kara Seas. In connection with the prospects of developing oil and gas exploration in other Arctic waters (the Laptev Sea, the East Siberian Sea, the Chukchi Sea) geophysical surveys and deep drilling were proposed to be carried out. In the area of transit shallow water it is advisable to use jack-up platforms with retractable legs. Deep drilling from islands is suggested for other parts of the seas with increasing depth and difficult ice conditions (icebergs, drifting ice fields, storms) and other climatic characteristics that increase the risk of drilling from offshore platforms. For performing hydrological and geophysical studies (studies of temperatures in layers, salinity, density, gas hydrates, and other characteristics of water in marine basins) it is possible to use «point» drilling and submarine fleet to study bottom sediments and geological section in promising areas.

Key words: Arctic seas, mineral resource potential, oil and gas occurrence, offshore, oil, gas, fields, deep drilling, offshore platforms, ice conditions, climatic conditions, gas-hydrate formations, submarine fleet.

ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ПОЯС ЛИТИЙ-ФТОРИСТЫХ ГРАНИТОВ, ОНГОНИТОВ И ОЛОВОРУДНЫХ ЦВИТТЕРОВ

В.И.АЛЕКСЕЕВ, канд. геол.-минерал. наук, доцент, *wia59@mail.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

С учетом опубликованных и авторских данных исследовано размещение ареалов редкометалльно-гранитового магматизма Северо-Восточной Азии. Выделен Дальневосточный пояс литий-фтористых гранитов и онгонитов. Обсуждены причины и история развития редкометалльно-гранитовых поясов Северо-Восточной Азии. Сделан вывод о том, что Дальневосточный пояс литий-фтористых гранитов контролирует крупнейшие вольфрам-оловянные месторождения Дальнего Востока.

Ключевые слова: литий-фтористый гранит, онгонит, цвиттер, вольфрамово-оловорудные месторождения, Дальний Восток, Чукотка, Якутия, Приамурье.

Дальний Восток России* представляет собой крупное звено Тихоокеанского рудного пояса, которое прослеживается на расстоянии более 6000 км в виде сложнейшего ансамбля геоблоков и является источником богатейших ресурсов олова, вольфрама, редкоземельных элементов и других полезных ископаемых. В позднем мезозое и кайнозое на Дальневосточной окраине Евразии развивались грандиозные по своим масштабам и энергетике геологические события, сопровождавшие взаимодействие Тихоокеанской и Азиатской плит. В результате возникли крупнейшие вулканогенно-плутонические и плутонические пояса – Охотско-Чукотский, Восточно-Сихотэ-Алинский, Главный Колымский и другие, которые «сшивают» гетерогенные и разновозрастные геоблоки и служат свидетельством единой природы Тихоокеанского рудного пояса (ТРП) [5, 8]. В последние десятилетия обнаружено еще одно доказательство единства геологической истории ТРП: во многих оловорудных районах региона установлены массивы редкометалльных литий-фтористых гранитов (ЛФГ) и онгонитов, подобные тем, что широко известны в оловорудных провинциях Европы, Австралии, Африки, Америки и Центральной Азии. Цель статьи – на основе новых данных о магматизме региона обсудить масштабы, движущие силы и рудоносность редкометалльного гранитового магматизма ТРП.

Определяющая особенность северо-западного сектора ТРП – многократное проявление орогенного гранитоидного магматизма, в том числе наиболее масштабного юрско-мелового: мезозойские гранитоиды занимают 75 % «гранитизированной» части территории [8]. Корреляция гранитоидов Дальнего Востока, сформированных в условиях перманентного взаимодействия континентальных и океанических плит, должна осуществляться на геодинамической основе. Препятствием этому служит противоречивость существующих геодинамических схем [5]. В статье использована классическая схема тектонического районирования Северо-Восточной Азии [6, 9] и схема металлогенического районирования Н.П.Митрофанова [7], в соответствии с которыми выделены Новосибирско-Чукотская, Яно-Колымская и Сихотэ-Алинская гранитоидно-металлогенические провинции. В сеномане – кампане (97-74 млн лет) установилась единая Восточно-Азиатская окраина, вдоль которой происходило наращивание континентальной коры. Пик конструктивных процессов пришелся на коньяк – сантон, когда наметился переход к трансформным перемещениям Тихоокеанской плиты, а в тылу континентальной окраины происходило растяжение и тектоно-магматическая активизация земной коры, развивался внутриплитный редкометалльно-гранитовый магматизм [1].

* Дальний Восток – восточная часть России, которая охватывает бассейны рек, впадающих в Тихий океан и моря Восточной Арктики, и соответствует Дальневосточному федеральному округу.

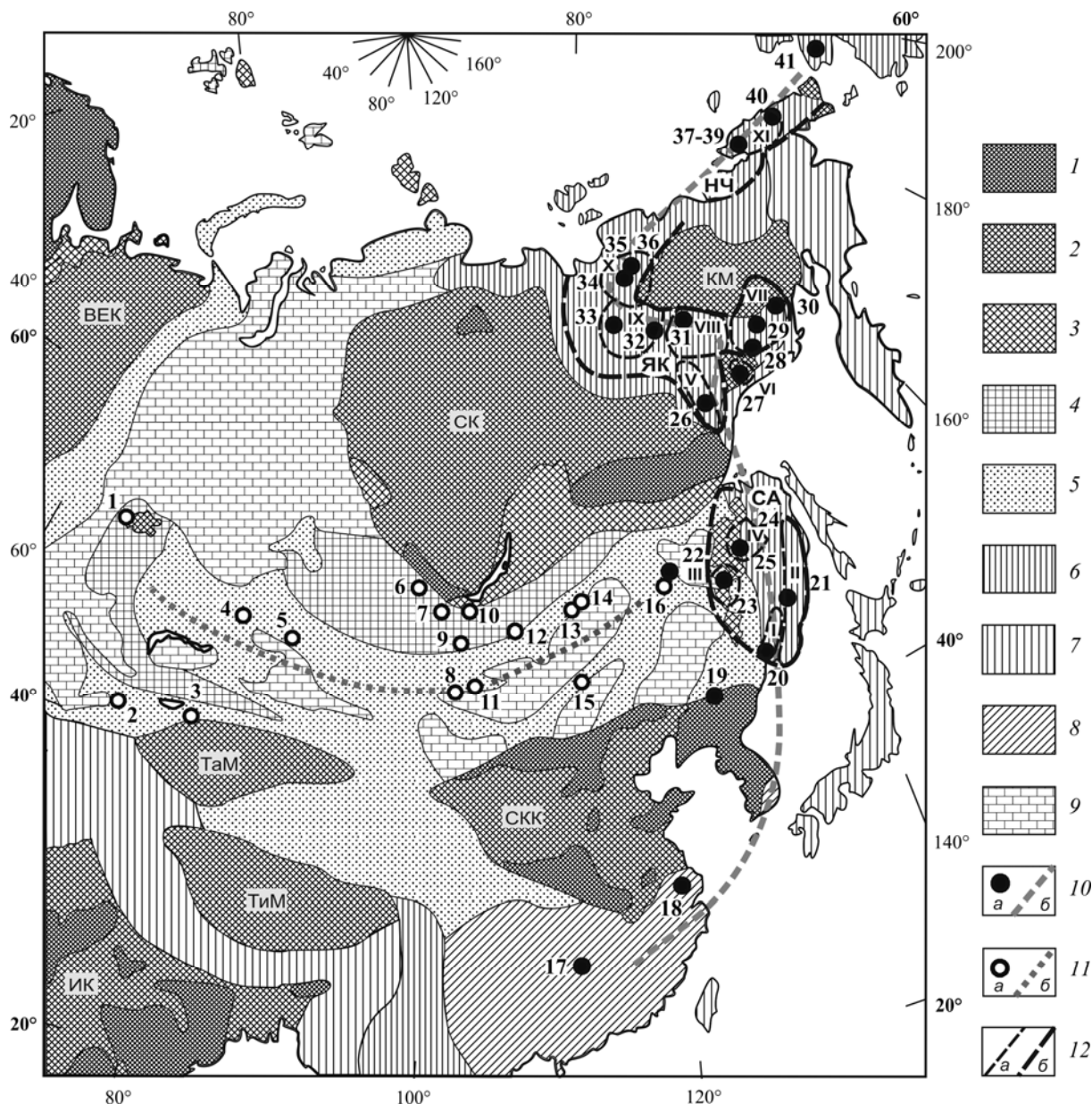


Рис.1. Геотектоническая позиция Дальневосточного и Центрально-Азиатского поясов литий-фтористых гранитов и онгонитов

1 – щиты; 2 – кратоны (ВЕК – Восточно-Европейский, СК – Сибирский, СКК – Северо-Китайский, ИК – Индостанский) и микроконтиненты с докембрийским фундаментом (ТаМ – Таримский, ТиМ – Тибетский, КМ – Колымский); 3 – рифейские срединные массивы; 4-7 – орогенные пояса: каледонские (4), герцинские (5), мезозойские (6), альпийские (7); 8 – Южно-Китайская платформа с юрско-меловыми (яньшаньскими) дислокациями; 9 – мезокайнозойский платформенный чехол; 10, 11 – ареалы литий-фтористых гранитов (а) и линии простираения редкометалльно-гранитовых поясов (б): Дальневосточного (10) и Центрально-Азиатского (11); 12 – границы орогенных мегаблоков (а) (I – Ханкайский, II – Приморский, III – Бира-Хинганский, IV – Буреино-Баджалский, V – Южно-Верхоянский, VI – Охотский, VII – Верхне-Колымский, VIII – Верхне-Индибирский, IX – Верхне-Янский, X – Полоусный, XI – Чаунский) и редкометалльно-гранитовых провинций (б) (НЧ – Новосибирско-Чукотская, ЯК – Яно-Кольмская, СА – Сихотэ-Алинская).
Тектоническое и металлогеническое районирование по [6, 7, 9]

Ареалы Li-F-гранитов приурочены к складчатым верхоянидам, реже располагаются в вулканических зонах и на активизированных окраинах срединных массивов (рис.1).

Вещественное сходство близких по возрасту магматических пород, развитых на обширных территориях, отмечено в трудах А.Харкера, Г.Розенбуша, А.Н.Заварицкого, Ю.А.Кузнецова, Э.П.Изоха, В.Н.Москалевой, О.А.Богатикова и послужило основанием для

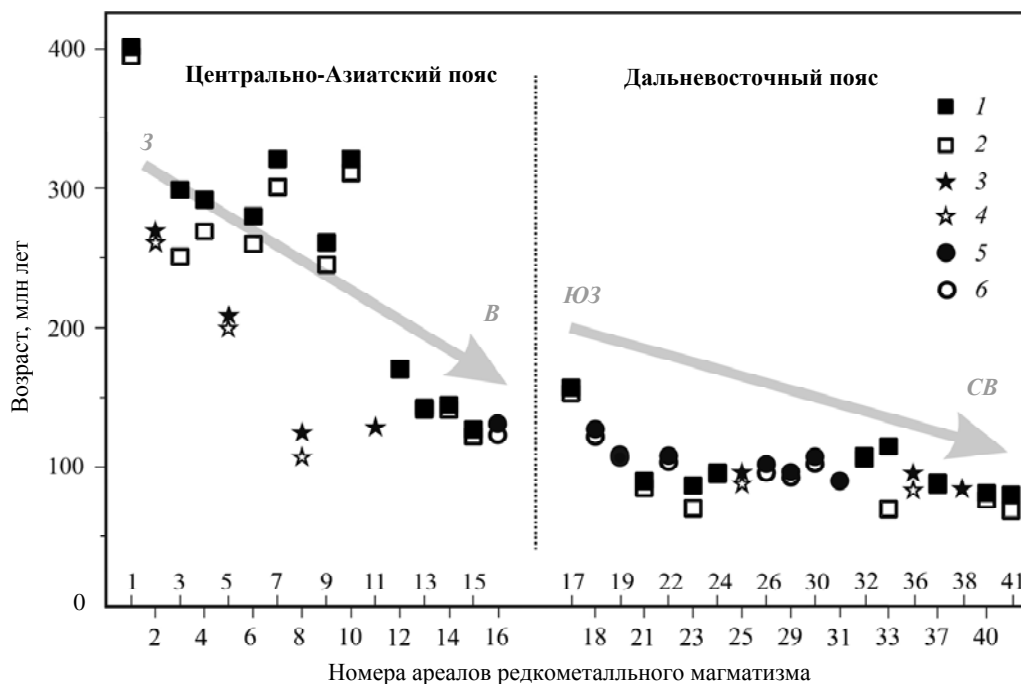


Рис.2. Латеральное скольжение возраста литий-фтористых гранитов и онгонитов

1, 2 – верхняя и нижняя границы возраста литий-фтористых гранитов; 3, 4 – верхняя и нижняя границы возраста онгонитов; 5, 6 – верхняя и нижняя границы возраста сопряженных лейкогранитов. Стрелки – тренды латерального скольжения возраста пород

выделения петрографических провинций. Современные крупные магматические провинции (КМП) объединяют разобщенные магматические ареалы, характеризующиеся сходным вещественным составом, возрастом, тектонической позицией и набором рудных формаций [13]. Редкометалльно-гранитовые КМП выделены в Центральной Азии, где образуют широтный пермско-меловой пояс, протянувшийся от Южного Урала до Большого Хингана, и контролируют многочисленные месторождения Sn, W, Ta, Nb, Li, Be [3]. В состав Центрально-Азиатского пояса входят самостоятельные в геотектоническом и минерагеническом отношении редкометалльно-гранитовые провинции (рис.1): Тянь-Шаньская, Казахстанская, Алтайская, Баргузинская, Монголо-Забайкальская [10], которые включают ареалы ЛФГ и онгонитов: 1 – Тотогуз, 2 – Чаткальский, 3 – Ташкоринский, 4 – Чечекский и Ахмировский, 5 – Калгутинский, 6 – Окинский, 7 – Биту-Джидинский, 8 – Цаганцабский, 9 – Хэнтэйский, 10 – Уругдей-Утуликский, 11 – Онгон-Хайерхан, 12 – Шумиловский, 13 – Ары-Булак, 14 – Этыка, 15 – Барун-Цогто, 16 – Водухэ и др. Устойчивая ассоциация и закономерное размещение Li-F-гранитов, их жильных и вулканических аналогов (онгонитов, эльванов, калгутитов, онгориолитов) и редкометалльных месторождений свидетельствует о явлении внутриплитного рудоносного редкометалльно-гранитового магматизма Центральной Азии, развивающегося в районах типа «горячих точек» в условиях локального растяжения континентальной коры над мантийными диапирами [3, 10, 11]. Анализ геохронологических данных показывает последовательное омоложение редкометалльно-гранитовых ареалов с запада на восток [12] (рис.2).

На Востоке Азии – от Южного Китая до Чукотки и Аляски, также выявлены многочисленные ареалы литий-фтористых гранитов, включающие крупнейшие вольфрамово-оловорудные месторождения (см.рис.1): 17 – Лэйцзылин, 18 – Сучжоу, 19 – Сюэцяцзе, 20 – Вознесенский, 21 – Тигринный, 22 – Шанмачан, 23 – Обманийский, 24 – Дождливый, 25 – Верхнеурмийский, 26 – Кютепский, 27 – Нютский, 28 – Бутугычагский, 29 – Верхне-Оротуканский, 30 – Невский, 31 – Хаяргастахский, 32 – Джелакагский, 33 – Кестер, 34 –

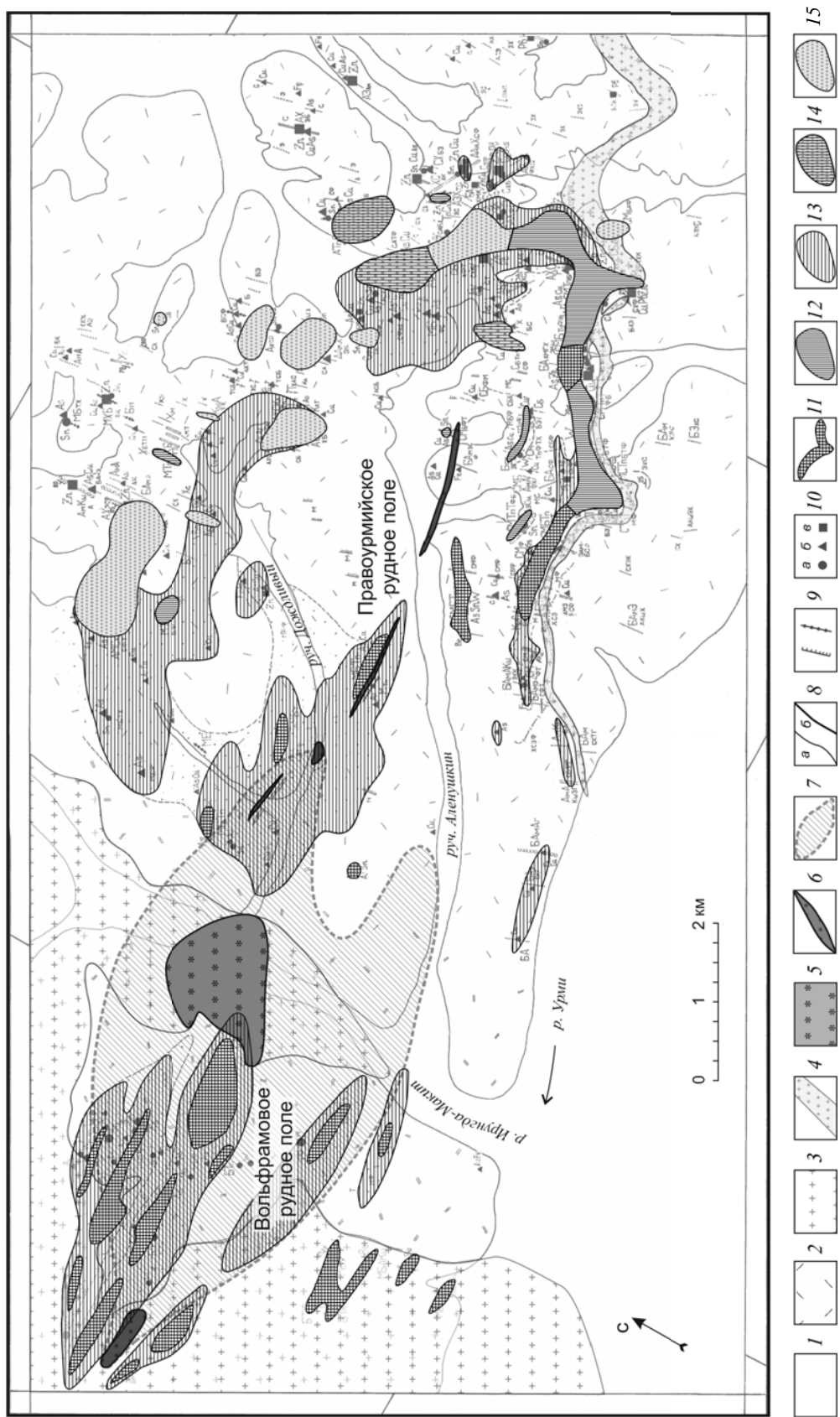


Рис.3. Фациальная зональность оловорудных цвиттеров Верхнеурмийского рудного узла, Приамурье

1 – четвертичные отложения; 2-4 – баджальский комплекс: кислые вулканиты (2), биотитовые граниты и лейкограниты (3), гранит-порфиры (4); 5-7 – правоурмийский комплекс: циннвальдитовые (5) и сидерофиллитовые (6) Li-F-граниты, арал онгонитов (7); 8 – границы: геологические (а), фациально-метасоматические (б); 9 – зоны минерализации; 10 – пункты минерализации: редкометалльно-оловянной (а), сульфидной (б), полиметаллической (в); 11-15 – фации цвиттеров: кварц-газовая и сидерофиллит-топаз-кварцевая нерасчлененные (11), кварц-топаз-мусковитовая (12), мусковит-сидерофиллит-кварцевая (13), кварц-топаз-мусковитовая и слюдиисто-полевшатовая нерасчлененные (14), слюдиисто-полевшатовая и кварц-альбитовая нерасчлененные (15)

Депутатский, 35 – Полярный, 36 – Одинокый, 37 – Кулвеевский, 38 – Пыркакайский, 39 – Куйвиевский, 40 – Иультинский, 41 – Сьюард. Вследствие незначительных размеров (первые квадратные километры) и внешнего сходства с вмещающими лейкогранитами ЛФГ большей частью не были установлены при мелко- и среднемасштабной геологической съемке и не включались в легенды Госгеолкарты. Заслуга их выделения принадлежит сотрудникам академических организаций и университетов России и Китая [1, 4, 5]. Сравнительный анализ Li-F-гранитов ареалов показал сходство их состава, возраста, рудной минерализации, общность геотектонической позиции и принадлежность к сходным интрузивным сериям региона [1, 2], что позволяет выделить единую магматическую суперпровинцию (Дальневосточный пояс) редкометалльных гранитов, простирающуюся во внешней, континентальной зоне ТРП и включающую несколько самостоятельных в геотектоническом отношении редкометалльно-гранитовых КМП – Новосибирско-Чукотскую, Яно-Колымскую, Сихотэ-Алинскую, Южно-Китайскую и др. (см.рис.1).

Таким образом, в Северо-Восточной Азии сосуществуют два редкометалльно-гранитовых пояса: Центрально-Азиатский позднепалеозойско-мезозойский, протянувшийся от Казахстана до Большого Хингана, и Дальневосточный мезозойский, сочлененный с первым в районе Ям-Алиня и Шантарских островов. Ареалы редкометалльного магматизма несут признаки глубинных очаговых структур и закономерно располагаются во внутриплитных магматических областях, связанных с мантийными плюмами [10]. Геофизическое моделирование строения литосферы показало наличие под ареалами ЛФГ глубинных структур разуплотнения земной коры, опирающихся на выступы астеносферы на глубинах от 20-25 до 70-100 км. Очаговые структуры выражены в виде аномалий силы тяжести (–30-160 мГал), теплового потока (55-90 мВт/м²), скорости продольных волн (8,0-8,17 км/с) и температуры на поверхности Мохо (до 600-900 °С). Движущей силой мезозойского редкометалльно-гранитового магматизма Центральной Азии и Дальнего Востока являлось взаимодействие Азиатской, Индо-Австралийской и Тихоокеанской плит, определившее трансрегиональное распространение ареалов Li-F-гранитов [1].

Крупнейшие месторождения Восточно-Азиатской олово-вольфрамовой зоны, такие как Правоурмийское, Пыркакайское, Иультинское, Одинокое, Тигриное, Сяньхуалин и другие, сосредоточены в ареалах редкометалльно-гранитового магматизма и являются вместе с интрузиями литий-фтористых гранитов закономерными элементами рудно-магматических систем. Литий-фтористые граниты Дальнего Востока – наиболее поздние из гранитоидов, предшествующих рудообразованию. Рудоносными (Sn, W, Cu, Nb, Bi, In, REE) являются генетически связанные с ними комплексы цвиттер-турмалинитовой метасоматической формации (ЦТФ), включающие последовательно образующиеся меланократовые метасоматиты: цвиттеры, турмалиниты и хлорититы, – а также сопряженные рудные жилы и прожилки. Анализ схем фациально-стадийного расчленения оловоносных метасоматитов ряда рудных районов показал единую направленность гидротермальных процессов и детальное сходство гидротермалитов конкретных фаций и стадий. Установлена связь вольфрамово-оловянного оруденения с гидротермалитами ЦТФ, чаще всего с цвиттерами [1]. Месторождения занимают закономерное положение в структуре метасоматической зональности рудных узлов и полей, а их геолого-промышленные параметры определяются размерами, морфологией и залеганием оловорудных цвиттеров (рис.3).

Таким образом, установлено геодинамическое, петрографическое, минералого-геохимическое, геохронологическое и минерагеническое единство разобщенных ареалов литий-фтористых гранитов Дальнего Востока и выделен Дальневосточный пояс ЛФГ, протянувшийся от Приморья до Чукотки и продолжающийся на смежных территориях Китая и США. Постмагматическая эволюция литий-фтористых гранитов Дальнего Востока сопровождается формированием многостадийных зональных цвиттер-турмалинитовых комплексов с литофильно-халькофильной (Sn, W, Cu, Nb, Bi, In, REE) рудной минерализацией. Месторождения с Li-F-гранитами и вольфрамово-оловорудными цвиттерами сле-

дует выделить в самостоятельную редкометалльно-оловянную рудную формацию, имеющую признаки касситерит-кварцевой и касситерит-силикатной формаций и собственные структурно-вещественные особенности. Связь гидротермалитов ЦТФ и W-Sn-оруденения редкометалльно-оловянной формации с Li-F-гранитами имеет преимущественно генетический характер и может служить основой прогнозирования, поисков и оценки вольфрамово-оловорудных месторождений Дальнего Востока.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-05-00364) и Минобрнауки РФ (в рамках базовой и проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 5.2115.2014/К на 2014-2016 годы).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.И. Литий-фтористые граниты Дальнего Востока / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2014. 244 с.
2. Алексеев В.И. Состав и эволюция акцессорной минерализации литий-фтористых гранитов Дальнего Востока как индикаторы их рудоносности / В.И.Алексеев, Ю.Б.Марин // Записки РМО. 2014. № 6. С.1-16.
3. Владимиров А.Г. Онгонит-эльвановый магматизм Южной Сибири / А.Г.Владимиров, И.Ю.Анникова, В.С.Антипин // Литосфера. 2007. № 4. С.21-40.
4. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: В 2 кн. / Под ред. А.И.Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн.1. 572 с.
5. Гонеvчук В.Г. Оловоносные магматические системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез. Владивосток: Дальнаука, 2002. 297 с.
6. Карта структурно-формационных комплексов России. Масштаб 1:10 000 000 / К.И.Дворцова, А.А.Смыслов, В.М.Терентьев и др.; отв. ред. А.А.Смыслов. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 1995.
7. Митрофанов Н.П. Геодинамические условия формирования месторождений олова в Северо-Западном секторе Тихоокеанского рудного пояса / ВИМС. М., 2013. 225 с. (Минеральное сырье. № 29).
8. Романовский Н.П. Тихоокеанский сегмент Земли: глубинное строение, гранитоидные рудно-магматические системы. Хабаровск: Изд-во ДВО РАН, 1999. 166 с.
9. Тектоническая карта Евразии. Масштаб 1:5 000 000 / Гл.ред. А.Л.Яншин, Н.С. Зайцев, М.В.Муратов, и др.; ГИН АН СССР; М-во геологии СССР. М.: ГУГК, 1966.
10. Ярмолюк В.В. Позднепалеозойский и раннемезозойский редкометалльный магматизм Центральной Азии: этапы, области и обстановки формирования / В.В.Ярмолюк, М.И.Кузьмин // Геология рудных месторождений. 2012. Т.54. № 5. С.375-399.
11. Эпохи формирования, геодинамическое положение и источники редкометалльного магматизма Центральной Азии / В.И.Коваленко, В.В.Ярмолюк, Н.В.Владыкин и др. // Петрология. 2002. Т.10 № 3. С.227-253.
12. Alekseev V.I., Marin Ju.B. Age boundaries of an ongonit province of Asia // Large igneous provinces of Asia, mantle plumes and metallogeny. Novosibirsk: Sibprint, 2009. P.22-24.
13. Bryan S.E. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs) / S.E.Bryan, R.E.Ernst // Earth-Science Reviews. 2008. Vol.86. P.175-202.

REFERENCES

1. Alekseev V.I. Litij-ftoristye granity Dal'nego Vostoka (*Lithium-fluoric granites of the Far East*). Nacional'nyj mineral'no-syr'evoj universitet «Gornyj». St Petersburg, 2014, p.244.
2. Alekseev V.I., Marin Ju.B. Sostav i jevoljucija akcessornoj mineralizacii litij-ftoristyh granitov Dal'nego Vostoka kak indikatory ih rudosnosti (*Composition and evolution of accessory mineralization in lithium-fluoric granites of the Far East as indicators of their ore content*). Zapiski RMO. 2014. N 6, p.1-16.
3. Vladimirov A.G., Annikova I.Ju., Antipin V.S. Ongonit-jel'vanovyj magmatizm Juzhnoj Sibiri (*Ongonite-elvanite magmatism of South Siberia*). Litosfera. 2007. N 4, p.21-40.
4. Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii (*Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russian East*): In 2 books. Ed. by A.I.Khanchuk. Vladivostok: Dalnauka, 2006. Book I, p.572.
5. Gonevchuk V.G. Olovonosnye magmaticheskie sistemy Dal'nego Vostoka: magmatizm i rudogenez (*Tin-bearing igneous systems of the Far East: magmatism and ore genesis*). Vladivostok: Dal'nauka, 2002, p.297.
6. Karta strukturno-formacionnyh kompleksov Rossii. Masshtab 1:10 000 000 (*Map of structural and formational complexes of Russia. Scale 1:10 000 000*). K.I.Dvorcova, A.A.Smyslov, V.M.Terent'ev et.al. St Petersburg: Izd-vo VSEGEI, 1995.
7. Mitrofanov N.P. Geodinamicheskie uslovija formirovanija mestorozhdenij olova v Severo-Zapadnom sektore Tihookeanskogo rudnogo pojasa (*Geodynamic conditions of tin-field formation in the Northwest sector of the Pacific ore belt*). VIMS. Moscow, 2013, p.225 (Mineral'noe syr'e N 29).
8. Romanovskij N.P. Tihookeanskij segment Zemli: glubinnoe stroenie, granitoidnye rudno-magmaticheskie sistemy (*The Earth's Pacific segment: deep structure, granitoid ore-magmatic systems*). Habarovsk: Izd-vo DVO RAN, 1999, p.166.

9. Tektonicheskaya karta Evrazii. Masshtab 1:5 000 000 (*Tectonic map of Eurasia. Scale 1 : 5 000 000*). Ed. A.L. Yanshin, N.S. Zaytsev, M.V. Muratov et al.; GIN AN SSSR; M-vo geologii SSSR. Moscow: GUGK, 1966.
10. Jarmoljuk V.V., Kuz'min M.I. Pozdnepaleozojskij i rannemezozojskij redkometal'nyj magmatizm Central'noj Azii: jetapy, oblasti i obstanovki formirovanija (*Late Palaeozoic and early mesozoic rare-metal magmatism of Central Asia: stages, areas and conditions of formation*). Geologija rudnyh mestorozhdenij. 2012. Vol.54. N 5, p.375-399.
11. Kovalenko V.I., Jarmoljuk V.V., Vladykin N.V. et.al. Jepohi formirovanija, geodinamicheskoe polozhenie i istochniki redkometal'nogo magmatizma Central'noj Azii (*Formation periods, geodynamic situation and sources of Central Asia rare-metal magmatism*). Petrologija. 2002. Vol.10. N 3, p.227-253.
12. Alekseev V.I. Age boundaries of a ongonit province of Asia. Large igneous provinces of Asia, mantle plumes and metallogeny. Novosibirsk: Sibprint, 2009, p.22-24.
13. Bryan S.E., Ernst R.E. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs). Earth-Science Reviews. 2008. Vol.86, p.175-202.

FAR EAST BELT OF LITHIUM-FLUORIC GRANITES, ONGONITES AND TIN ORE ZWITTERS

V.I.ALEKSEEV, *PhD in Geological and Mineral Sciences, Associate Professor, via59@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

Taking into consideration published and author's data, occurrence of areas of rare-metal granitic magmatism in Central and East Asia is investigated. The Far East Belt of lithium-fluoric granites and ongonites is defined. Reasons and history of development of rare-metal granitic belts in North-east Asia are discussed. The conclusion that the Far East Belt of lithium-fluoric granites controls the largest tungsten-tin fields of the Far East is drawn.

Key words: lithium-fluoric granite, ongonite, zwitter, tungsten-stanniferous deposits, the Far East, Chukotka, Yakutia, the Amur region.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОВОЗРАСТНОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ В ГРАНИТАХ И ПЕГМАТИТАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ВОЗРОЖДЕНИЕ» («КАВАНТСААРИ»), ВЫБОРГСКИЙ МАССИВ

М.А.ИВАНОВ, *д-р геол.-мин. наук, заведующий кафедрой, ivan@spti.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Уникальный размер монолитных блоков гранитов на месторождении «Возрождение» («Кавантсаари») объясняется устойчивостью этих пород в крутопадающей, вероятно, секущей части массива, где породы сохранили массивную текстуру и в наименьшей степени изменены на этапе образования в них редкометалльных пегматитов. Форму и размеры монолитных блоков определяет система нарушений, в формировании которой ведущая роль принадлежит трем крутопадающим зонам тектонической трещиноватости северо-западного простирания с ореолами изменений в условиях низкотемпературного кислотного метасоматоза. Более поздние тектонические срывы по эти зонам привели к разрушению заключенных между ними блоков пород по сериям поперечных трещин, а также к субгоризонтальным разрывам пород, обусловленных, вероятно, гравитационной разгрузкой массива и действием покровного ледника. Для трещин всех направлений характерно распределение через равные расстояния («шаг»).

Ключевые слова: Выборгский массив рапакиви, монолитные блоки гранитов, пегматиты, типы трещин, закономерности распределения трещин, прогноз трещиноватости.

Серые рапакививидные граниты месторождения «Возрождение» («Кавантсаари»), привозимые в Санкт-Петербург с начала каменного строительства города, известны своей прочностью, значительными размерами монолитных блоков и «податливой» ломкостью, особо ценимой в каменотесном деле. Разработки этого камня, проводимые в наше время близ железнодорожной станции «Возрождение» (Ленинградская область), еще 10-15 лет назад могли поразить наблюдателя уникальной возможностью видеть в северной части главного карьера ошлифованные с поверхности до блеска ледником монолиты размером $10 \times 15 \times 60$ м и более – без единой трещины. В настоящее время наиболее продуктивная часть месторождения на своем верхнем горизонте уже отработана и проблема надежной оценки перспектив освоения его флангов и более глубоких горизонтов не просто экономически актуальна для его разработчиков. Особые успехи старшего поколения геологов и горняков в разработке месторождения обязывают к большему. Тому свидетельство – извлеченный из недр месторождения гранитный монолит длиной 22,5 м и массой 2200 т, из которого изготовлен обелиск «Городу-герою Ленинграду», стоящий с 1981 г. в центре Санкт-Петербурга на площади Восстания.

Попытки приблизиться к решению проблемы путем бурения дополнительного числа разведочных скважин и привлечения специалистов по геофизическим методам исследования неоднородности пород столкнулись с трудностями методического характера и не привели к желаемым результатам. Вместе с тем, судя по материалам разведочных работ и опубликованным результатам научных исследований, собственно геологическая изученность самого месторождения остается на низком уровне и не позволяет аргументированно, на основе добротного фактического материала, определиться в решении ряда важнейших вопросов его строения и природы трещиноватости. Иными словами, возможности геологического подхода к изучению месторождения пока что не исчерпаны и важно сохранять и учитывать весь накопленный к настоящему времени фактический материал.

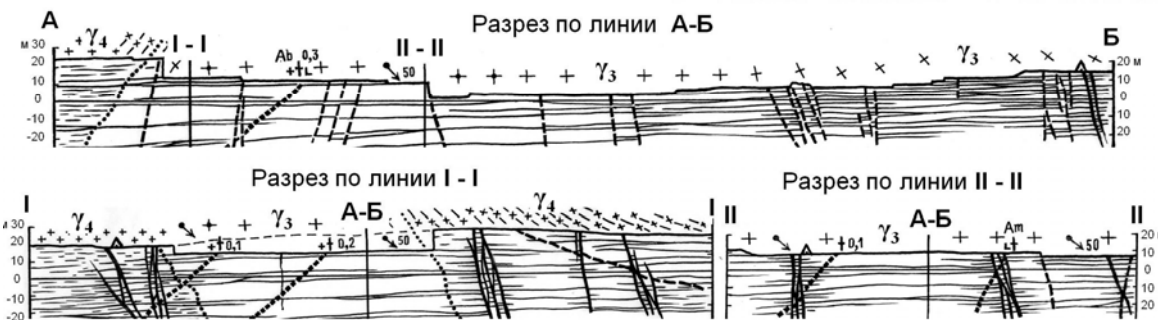
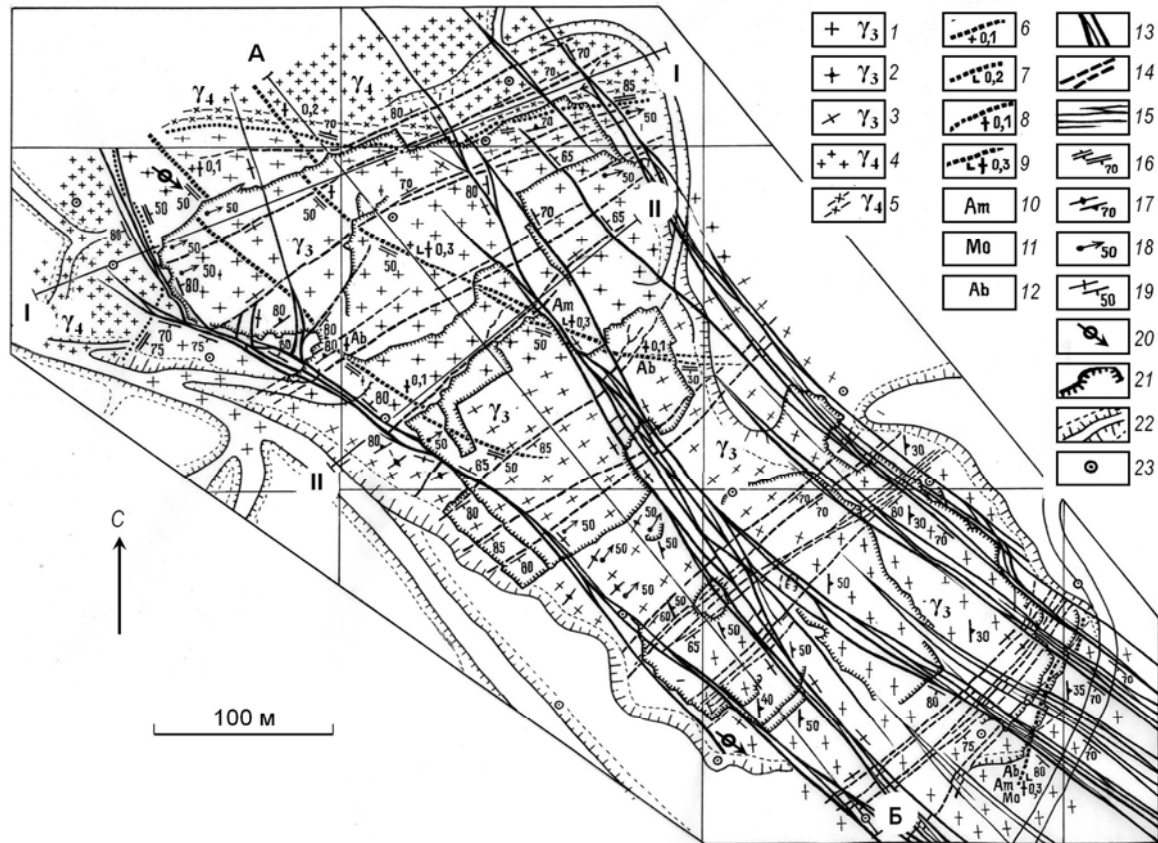


Рис.1. Схема геологического строения центральной части месторождения «Возрождение» (по материалам геологического картирования в масштабе 1:2000 [3])

1-3 – граниты рапакививидные с порфирированной основной массой, «серые» (1 – массивной текстуры, 2 – линейной текстуры, 3 – трахитоидной текстуры); 4, 5 – граниты рапакививидные с аплитовой основной массой, «розовые» (4 – массивной текстуры, 5 – полосчатой и шпировой текстуры); 6-9 – жильные тела с указанием мощности в метрах (6 – аплиты, 7 – пегматиты графической структуры; 8 – пегматиты пегматоидной структуры; 9 – пегматиты с сочетанием графической и пегматоидной структур); 10-12 – характерные минералогические особенности пегматитов (10 – с амазонитом, 11 – с молибденитом, 12 – с альбитом и морионом в пустотах выщелачивания); 13-15 – положение разновозрастных трещин (13 – трещины I возрастной группы, контролирующие проявления в гранитах низкотемпературного кислотного метасоматоза, повторно раскрытые в период образования трещин II возрастной группы; 14 – крутопадающие трещины II возрастной группы; 15 – субгоризонтальные трещины II возрастной группы); 16-19 – ориентировка структурных элементов (16 – контактов пород, 17 – плоскости трахитоидности гранитов, 18 – направления линейности гранитов, 19 – ориентировка трещин); 20 – направление ледниковой штриховки на скальной поверхности; 21 – борта карьера (по состоянию на 01.06.1998 г.); 22 – подъездные пути и откосы; 23 – разведочные скважины

В связи с этим представляется важным рассмотреть результаты детального геологического картирования месторождения, проведенного по традиционной («классической») методике в масштабе 1:2000 в 1998 г. [3]. Графические материалы в обобщенном виде представлены на рис.1, 2.

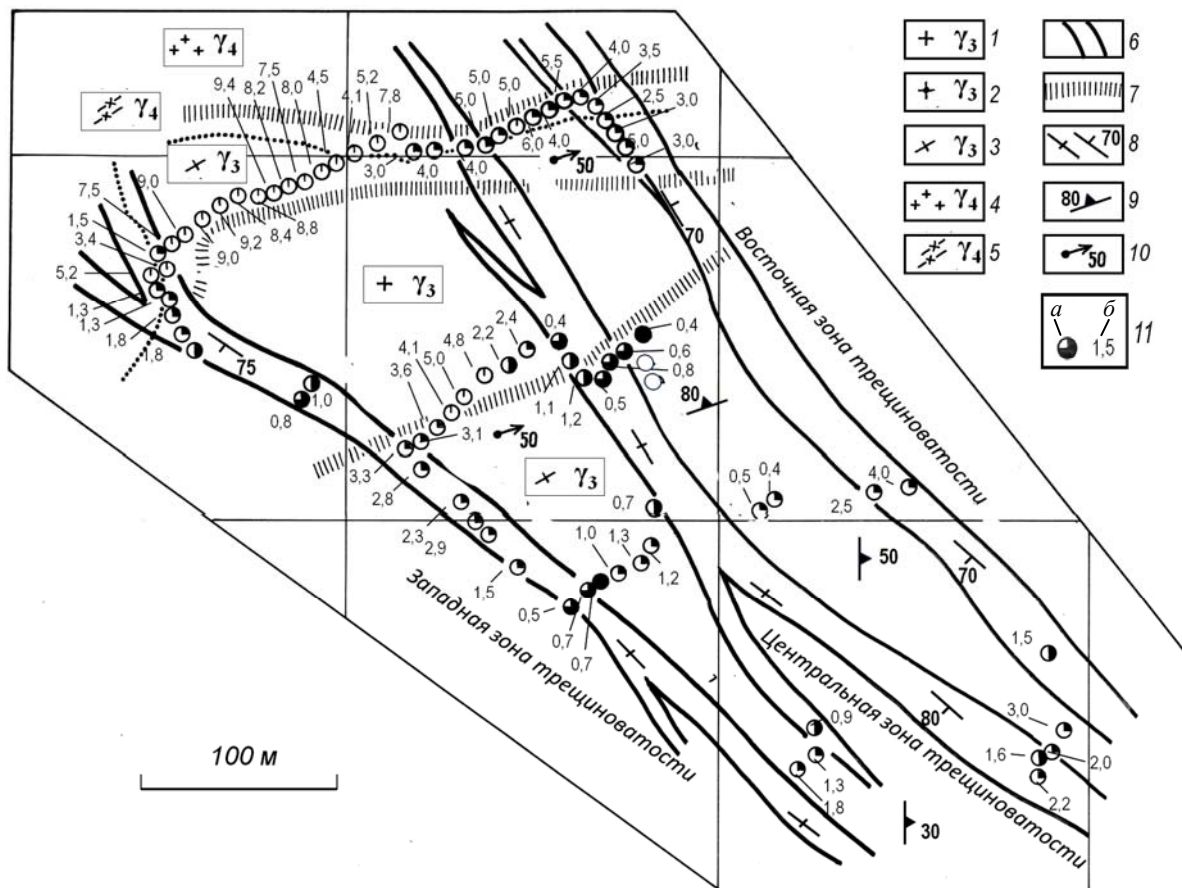


Рис.2. Геолого-структурная схема центральной части месторождения «Возрождение»

1-3 – поля гранитов рапакививидных с порфировидной основной массой, «серых» (1 – массивной текстуры, 2 – линейной текстуры, 3 – трахитоидной текстуры); 4-5 – поля гранитов рапакививидных с аплитовой основной массой, «розовых» (4 – массивной текстуры, 5 – полосчатой и шпировой текстуры); 6 – зоны повышенной концентрации трещин I возрастной группы, контролирующие проявления II возрастной группы; 7 – области перехода гранитов одних текстур в граниты других текстур; 8-10 – ориентировка структурных элементов (8 – преобладающих трещин в зонах их повышенной концентрации, 9 – плоскости трахитоидности гранитов, 10 – направления линейности гранитов); 11 – графическое отображение частоты субгоризонтальных трещин в вертикальном разрезе: а – среднее число трещин, приходящихся на 1 м разреза (○ – менее 1; ● – 1; ◐ – 2; ◑ – 3; ◒ – 4 трещины и более); б – цифрой указана наибольшая мощность монолита, заключенного между субгоризонтальными трещинами, в метрах

Месторождение представляет собой выходы на поверхность *серых* рапакививидных гранитов с крупнокристаллической порфировидной основной массой, относящихся к 3-й фазе Выборгского массива гранитов-рапакиви верхнерифейского возраста [1, 2]. Именно они представляют собой основную ценность месторождения и как блочный камень являются главным предметом разработки. В северной части карьера серые граниты контактируют с менее распространенными породами более поздней 4-й фазы Выборгского массива – *розовыми* рапакививидными гранитами с мелкокристаллической аплитовидной основной массой. Эти породы отличаются повышенной трещиноватостью, более «капризны» при раскалывании и как блочный камень представляют меньший практический интерес. Севернее 150 м от вскрытой части месторождения их выходы обрываются контактом с овоидными рапакиви 2-й (основной) фазы Выборгского массива – *выборгитами*. Жильные образования представлены крутопадающими на запад субмеридиональными дайками мелкокристаллических гранит-аплитов и телами редкометалльных (амазонитовых) пегматитов, про-

странственно большей частью сопряженными с гранит-аплитами в сложных и неоднозначно трактуемых генетических взаимоотношениях [4].

Несмотря на хорошую обнаженность однозначно подтвердить более позднее образование розовых гранитов по отношению к серым не представляется возможным. Вблизи контакта они переслаиваются, в тех и других видны одноплановые текстуры течения и поэтому однозначно интерпретировать секущий характер контакта этих пород для вывода об их возрастном взаимоотношении невозможно. По-видимому, в зоне контакта пород имело место смешение расплавов или пластическое течение пород на этапе кристаллизации. Трахитоидность и линейность в серых гранитах выражены в закономерной ориентировке кристаллов калиево-натриевых полевых шпатов основной массы породы – уплощения по {010} и удлинения по [001] соответственно. В розовых гранитах признаки течения выражены шлировой текстурой и полосчатостью. И такие текстуры позволяют установить субширотное простираание контакта этих пород (с падением на север под углом 70°), а также направление течения пород в плоскости контакта по линии, наклоненной под углом 50° на восток.

Изучение текстур показало, что северная наиболее продуктивная часть месторождения представляет собой область выходов на поверхность серых гранитов массивного сложения. С северной стороны эта область ограничена контактом с розовыми гранитами, вдоль которого, как уже отмечено, развиты текстуры течения. К югу она переходит в поле серых гранитов трахитоидной текстуры, плоскостные и линейные элементы которых ориентированы с наклоном на восток под углом порядка 50°, а в самой южной части карьера выполаживаются до 30°. По мере выполаживания трахитоидность в породе наблюдается все более отчетливо. Все это указывает на изменение формы залегания пород: в северной части месторождения серые граниты, вероятно, слагают крутопадающую массивную часть интрузива, переходящую к югу в другую пологоориентированную и менее мощную его часть, в которой создавались более благоприятные условия для возникновения текстур течения.

Полости выщелачивания существенно не влияют на общее состояние монолитности пород центральной части месторождения. Они локально развиты преимущественно в пегматитах и обнаруживаются в их приконтактных зонах (рис.3, а), в местах выклинивания кварцевых ядер (рис.3, б), в осевых частях пегматоидных зон, где кварцевое ядро оказалось большей частью или полностью растворенным (рис.3, в). Полости возникли на заключительном этапе развития пегматитового процесса и способ их образования и щелочной характер растворов устанавливается по явным признакам избирательного растворения кварца. По ряду признаков вместе с кварцем растворялся флюорит ранней генерации, а устойчивость к растворению сохраняли турмалин (шерл) и биотит. В микроклине частично растворялась только калиевая фаза, альбитовая фаза пертитов сохранялась. Так что кристаллы микроклина в целом сохранили первоначальную идиоморфную форму на стенках полостей, образовавшихся за счет растворения участков кварцевого ядра (рис.4). Процесс выщелачивания сменился кристаллизацией кварца (мориона), индивиды ко-

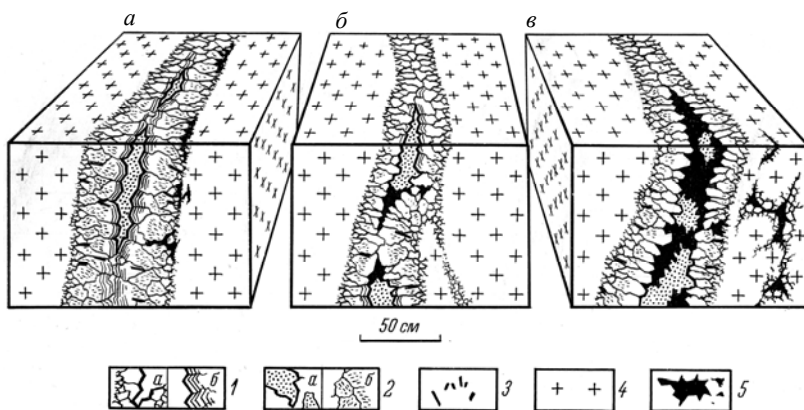


Рис.3. Положение полостей в пегматитовых телах (блок-схемы)

1 – полевые шпаты (а – микроклин, олигоклаз, б – амазонит); 2 – кварц (а – зернистые агрегаты, б – письменные вроски в полевых шпатах); 3 – биотит; 4 – гранит рапакививидный; 5 – полости

к растворению сохраняли турмалин (шерл) и биотит. В микроклине частично растворялась только калиевая фаза, альбитовая фаза пертитов сохранялась. Так что кристаллы микроклина в целом сохранили первоначальную идиоморфную форму на стенках полостей, образовавшихся за счет растворения участков кварцевого ядра (рис.4). Процесс выщелачивания сменился кристаллизацией кварца (мориона), индивиды ко-

торого ориентированно зарождались на кварце, сохранившемся при образовании полостей. Кристаллизация мориона сменялась кристаллизацией альбита (клевеландита) и флюорита поздней генерации (рис.4).

На тех участках пегматитовых жил, где процессы выщелачивания проявились в наибольшей степени, происходило полное или частичное обесцвечивание амазонита по зонам деформаций, в которых кристаллы под действием растворов претерпевали конституционные изменения, подобные ранее описанным [7] (рис.5).

Трещины I возрастной группы – крутопадающие, северо-западного простирания (320-330°) и протяженностью до сотен метров, пересекают с незначительным смещением как серые, так и розовые граниты вместе с аплитовыми дайками и пегматитами. Они протягиваются через всю вскрытую часть месторождения и концентрируются в пределах трех полос северо-западного простирания – западной, центральной и восточной зон повышенной трещиноватости (см. рис.1, 2, 6). Нарушения такого плана отмечаются в карьере западного участка месторождения, характерны для районов Выборга, Приозерска, наблюдаются на месторождениях Эркеля, Гаврилово и в региональном плане, по-видимому, фиксируют положение протяженных тектонических зон.

Первичные деформации пород в пределах указанных зон трещиноватости устанавливаются по тонким (1-5 мм) кварцевым прожилкам, которые сопровождаются ореолами метасоматического изменения пород. В наиболее мощных (до 5 см) прожилках сохранились пустоты с кристалликами горного хрусталя. Ореолы измененных пород характеризуются следующей метасоматической зональностью: кварц (в осевой части метасоматической зоны) – кварц + серицит (преимущественно по олигоклазу, биотит отсутствует) – хлорит + эпидот (по биотиту и олигоклазу) – минералы пелитового агрегата (по калишпату и олигоклазу) + дисперсные агрегаты гидроксидов железа (преимущественно по полевым шпатам в окружении биотита). Мощность внутренних подразделений таких ореолов колеблется от 1-5 см до 1 м, внешние прослеживаются до 10 м и более, что сказывается на цвете гранитов –

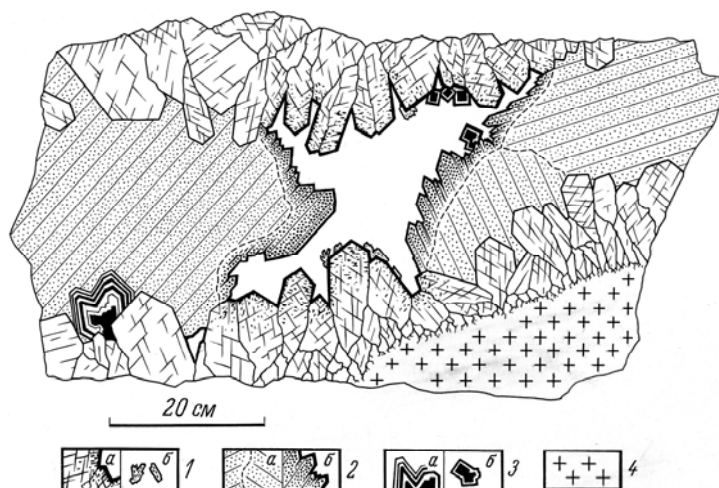


Рис.4. Зарисовка полости, образовавшейся в пегматитовом теле при растворении кварцевого ядра с последующей кристаллизацией кварца (мориона), альбита и флюорита

1 – полевые шпаты (а – микроклин с трещинами по спайности и микропористостью, образовавшейся при частичном растворении калиевой фазы пертита, б – альбит-клевеландит); 2 – кварц (а – кристаллы, составляющие кварцевое ядро пегматитового тела, б – кристаллы мориона); 3 – флюорит (а – ранней генерации, б – поздней генерации); 4 – гранит рапакививидный

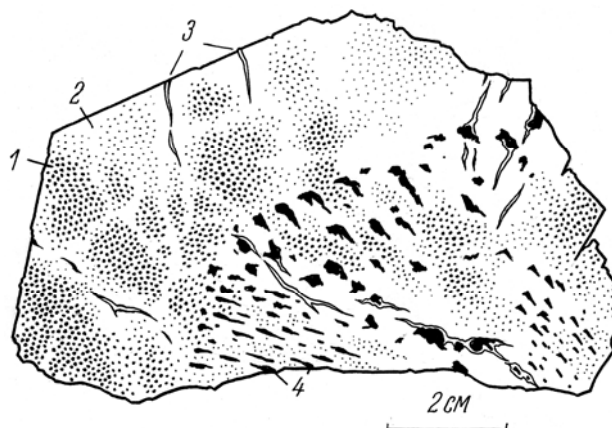


Рис.5. Зарисовка обломка кристалла калиево-натриевого полевого шпата из пегматитов с письменными вростками кварца (1), участками зеленой амазонитовой окраски (2), зонами преобразования с осветлением амазонитовой окраски (3) и прожилками кварца (4)

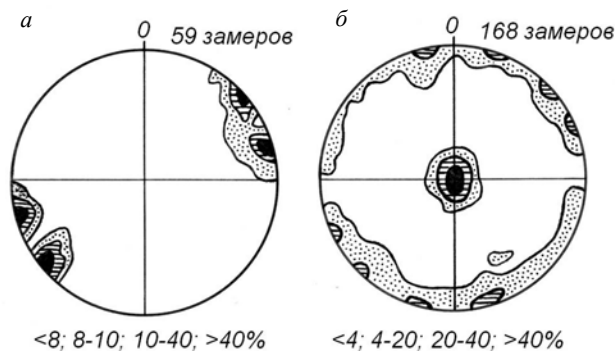


Рис.6. Стереографические проекции ориентировки трещин в гранитах месторождения «Возрождение»: а – трещины I возрастной группы; б – трещины II возрастной группы

венно наследует положение минерализованных трещин данной возрастной группы.

Трещины II возрастной группы – соответствуют трем системам ориентировки: а) крутопадающие северо-западного простирания ($320-330^\circ$), представляющие собой протяженные срывы более ранних минерализованных трещин I возрастной группы в пределах трех выделенных зон повышенной трещиноватости (II-а); б) крутопадающие северо-восточного простирания ($50-60^\circ$), пересекающие с шагом порядка 40-60 м блоки пород, заключенные между нарушениями северо-западного простирания, (II-б); в) субгоризонтальные, смыкающиеся с трещинами первых двух систем ориентировки и разделяющие блоки пород на пласты мощностью от 0,5 до 10 м (II-в) (см. рис.1, 2, б).

Смещения стенок и зеркала скольжения характерны лишь для трещин II-а, что указывает на их преимущественно сколовый характер. Трещины II-б и II-в в большинстве случаев обрываются на трещинах северо-западного простирания, редко их пересекают и являются, по-видимому, преимущественно отрывными.

Трещины II возрастной группы всех трех систем ориентировки не сопровождаются существенными проявлениями наложенной минерализации. На отдельных участках они приоткрыты, нередко заполнены гипергенными агрегатами бурого железняка, кальцита и глинистого вещества. На их поверхности можно наблюдать лишь коррозионное замещение олигоклаза агрегатом глинистых минералов, а также преобразование биотита в гидробиотит.

Трещины II возрастной группы трех указанных направлений в совокупности составляют единую систему нарушений сплошности пород. Они определяют форму и размеры монолитных блоков. В этой системе трещины II-а, судя по развитию в них зеркал скольжения, играли ведущую роль в создании напряженного состояния массива и разделению пород, заключенных между ними, трещинами II-б. Вопрос о структурной позиции в этой системе субгоризонтальных трещин II-в, имеющий особое значение для оценки состояния нижних горизонтов месторождения, потребовал проведения специальных исследований.

С этой целью в 80 точках внешних и внутренних уступов главного карьера было определено число субгоризонтальных трещин, приходящихся на единицу вертикальной мощности вскрытой части гранитного массива. Оказалось, субгоризонтальные трещины в разрезе, чередующиеся примерно через равные расстояния («шаг»), пространственно тяготеют к крутопадающим зонам трещиноватости северо-западного простирания – трещинам II-а: по приближению к таким зонам частота трещин II-в в разрезе возрастает, а максимальная мощность монолитных блоков, заключенных между ними, соответственно, уменьшается. Установлены случаи S-образного отщепления субгоризонтальных трещин от вертикальных. Подобной закономерной связи трещин II-в с трещинами II-б не установлено.

усилении розового оттенка. Все эти минералогические особенности метасоматического изменения гранитов вполне соответствуют признакам аргиллизитовой минеральной ассоциации, характерной для проявлений в гранитоидах низкотемпературного кислотного метасоматоза [5].

Открытая трещиноватость северо-западного плана, наблюдаемая в пределах трех выделенных зон, не сопровождается таким проявлением метасоматоза, обусловлена более поздними подвижками и в основном простран-

Данная закономерность проявлена в масштабе всего месторождения, где и в настоящее время ведется разработка серых порфиroidных гранитов-рапакиви. В южной части месторождения, где все три зоны повышенной трещиноватости северо-западного простирания сближаются и ветвятся, плотность субгоризонтальных трещин в заключенных между ними блоках пород возрастает (наибольшее расстояние – «шаг» – между трещинами 2-3 м). В северной части по мере расхождения северо-западных зон, наоборот, расстояние между субгоризонтальными трещинами возрастает до 8-9 м. Кстати, такая же закономерность в частоте чередования отмечается и в отношении трещин *II-в*.

Розовые порфиroidные граниты-рапакиви отличаются своеобразием в отношении субгоризонтальной трещиноватости. Наряду с протяженными субгоризонтальными трещинами, разделяющими их на пласты, граниты-рапакиви, в отличие от серых гранитов, во всем объеме разбиты также небольшими по протяженности (0,2-0,5 м) субгоризонтальными трещинами, большая часть которых выявляется только при раскалывании. Связать возникновение такой отдельности с процессами, обусловившими образование трещин *II-а* и *II-в*, затруднительно.

Закономерная пространственная связь субгоризонтальных трещин с крутопадающими тектоническими зонами трещин *II-а*, безусловно, указывает на определенную связь их с неотектоническими процессами, проявившимися в регионе. Но как при этом объяснить отсутствие каких-либо смещений по ним, выдержанность ориентировки на больших площадях, а также *S*-образные отщепления от трещин *II-а*? К тому же хорошо известно, что системы горизонтальных трещин являются региональной особенностью как магматических, так и метаморфических пород кристаллического фундамента всего Карельского перешейка.

В качестве наиболее вероятных следует указать причины, обуславливающие известное явление субгоризонтального растрескивания (отдельность) пород, вызванное гравитационной разгрузкой в процессе их подъема к поверхности и сноса вышележащих пород [6]. Признаком этих явлений является не только выдержанность субгоризонтальной ориентировки отрывных трещин отдельности на больших площадях, но и зависимость их протяженности и удельной частоты в разрезе (числа трещин на единицу мощности разреза) от характеристик пород, определяющих их физико-механические свойства. В нашем случае реально наблюдаемые явления и установленные закономерности вполне соответствуют этим признакам: ориентировка субгоризонтальных трещин устойчива, а удельная плотность трещиноватости определенно зависит от структурно-текстурных характеристик пород. Для доказательства достаточно сравнить трещиноватость в серых и розовых гранитах. Частота чередования таких трещин в разрезе («шаг») зависела от параметров монолитных блоков, которые, в свою очередь, были обусловлены положением крутопадающих тектонически активных зон северо-западного простирания с оперяющим трещинным обрамлением – трещинами *II-а* и *II-б*.

Предположение о связи субгоризонтальной трещиноватости, с одной стороны, с крутопадающими зонами тектонических нарушений, а с другой – с явлением гравитационной разгрузки пород указывает на ее полигенность. По-видимому, гравитационные явления явились главной причиной возникновения субгоризонтальных трещин. Не исключено, что определенную роль при этом играло явление изостазии в связи с ледниковым фактором, признаки которого на месторождении известны (см. рис.1). Очевидно, что форма массива определенно сказалась на положении в нем активных тектонических зон, а те, в свою очередь, определили сеть крутопадающих трещин, в зависимости от которых оказались субгоризонтальные трещины отдельности, выделяющиеся в сети трещиноватости пород в особую генетическую группу.

Выводы

Уникальная сохранность гранитов на месторождении обусловлена редким сочетанием обстоятельств его геологической истории. Во-первых, граниты и пегматиты в основной своей массе здесь претерпели лишь локальные и большей частью незначительные по интенсивности посткристаллизационные изменения и, благодаря сохранности первичного состава и структуры, не утратили высокие прочностные свойства. Во-вторых, на сохранность пород от тектонического воздействия повлияла форма залегания самого массива. Уходящая на глубину и, вероятно, секущая часть массива, составляющая северный фланг месторождения, в системе тектонических напряжений проявляла себя как относительно жесткий блок, наиболее устойчивый к разрушению. В-третьих, тектонические деформации регионально проявленного северо-западного плана и связанные с ними незначительные низкотемпературные метасоматические изменения пород на участке месторождения проявились в виде всего лишь трех пространственно разобщенных зон трещиноватости, что определило высокую сохранность заключенных между ними блоков пород и локальность развития процессов низкотемпературного гидротермального преобразования. В-четвертых, более поздние тектонические срывы по указанным тектоническим зонам привели к разрушению заключенных между ними блоков пород по сериям поперечных лестнично расположенных крутопадающих трещин, а также к субгоризонтальным разрывам пород – отдельности, обусловленной, вероятно, не столько тектоническими причинами, сколько гравитационной разгрузкой массива в процессе эрозии пород и действия ледника.

Независимо от высказанных суждений, приведенный фактический материал: минералогические данные, структурно-тектонические построения и выявленные эмпирические закономерности в распределении трещин, – может служить целям прогнозирования при производстве горных работ, а также быть методической основой для дальнейших геологических исследований как на данном объекте, так и на других месторождениях блочного камня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анортозит-рапакивгранитная формация: Восточно-Европейская платформа / Под ред. Д.А.Великославинского, Ф.П.Митрофанова; Институт геологии и геохронологии докембрия, Академия наук СССР. Л., 1978. 296 с.
2. *Великославинский Д.А.* Петрология Выборгского массива рапакиви // Труды Лаборатории геологии докембрия АН СССР. М.- Л., 1953. Вып.3. 142 с.
3. *Иванов М.А.* Методика прогнозирования трещиноватости пород уникального месторождения блочных и облицовочных гранитов «Возрождение» (Ленинградская область) // Минералогия месторождений камнесамоцветного и поделочного сырья: Тезисы докладов годовичного собрания Минералогического общества при РАН, Санкт-Петербург, 22-24 мая 1996 г. СПб, 1996. С.69-70.
4. *Иванов В.С.* Первая находка амазонита в пегматитах Выборгского массива гранитов рапакиви / В.С.Иванов, А.Я.Вохменцев // Доклады АН СССР. 1989. Т.307. № 3. С.707-710.
5. *Плющев Е.В.* Металлогения гидротермально-метасоматических образований / Е.В.Плющев, В.В.Шатов, С.В.Кашин / СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. 560 с. (Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. Т.354).
6. *Рамберг Х.* Сила тяжести и деформации в земной коре. М.: Недра, 1985. 399 с.
7. *Руденко С.А.* Метаморфизм минералов – важное явление в истории их формирования / С.А.Руденко, М.А.Иванов, В.А.Романов // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1978. Ч.107. Вып.6. С.697-710.

REFERENCES

1. Anortozit-rapakivgranitnaja formacija: Vostochno-Evropskaja platform (*Anorthosite-rapakivi granite formation: the East-European platform*). Ed. by D.A.Velikoslavinskij, F.P.Mitrofanov; Institut geologii i geohronologii dokembrija, Akademija nauk SSSR. Leningrad, 1978, p.296.
2. *Velikoslavinskij D.A.* Petrologija Vyborgskogo massiva rapakivi (*Petrology of the Vyborg rapakivi massif*). Trudy Laboratorii geologii dokembrija AN SSSR, Moscow – Leningrad, 1953. Iss.3, p.142.

3. *Ivanov M.A.* Metodika prognozirovanija treshhinovatosti porod unikal'nogo mestorozhdenija blochnyh i oblicovochnyh granitov «Vozrozhdenie» (Leningradskaja oblast') (*Methods of forecasting rock fracturing of granite blocks and facing blocks in the unique «Vozrozhdenie» deposit (the Leningrad region)*). Mineralogija mestorozhdenij kamnesamocvetnogo i podelochnogo syr'ja: Tezisy dokladov godichnogo sobraniya Mineralogicheskogo obshchestva pri RAN, St Petersburg, 22-24 maja 1996 g. St Petersburg, 1996, p.69-70.

4. *Ivanov V.S., Vohmencev A.Ja.* Pervaja nahodka amazonita v pegmatitah Vyborgskogo massiva granitov rapakivi (*The first finding of amazonite in pegmatites of the Vyborg rapakivi granite massif*). Doklady AN SSSR. 1989. Vol.307. N 3, p.707-710.

5. *Pljushev E.V., Shatov V.V., Kashin S.V.* Metallogenija gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovanij (*Metallogeny of hydrothermal-metasomatic formations*). St Petersburg: Izd-vo VSEGEI, 2012. p.560. (Trudy VSEGEI. Novaja serija. Vol.354).

6. *Ramberg H.* Sila tjazhesti i deformacii v zemnoj kore (*Gravity and deformation in the Earth's crust*). Moscow: Nedra, 1985, p.399.

7. *Rudenko S.A., Ivanov M.A., Romanov V.A.* Metamorfizm mineralov – vazhnoe javlenie v istorii ih formirovanija (*Metamorphism of minerals is an important phenomenon in the history of their formation*). Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva. 1978. Part 107. Iss.6, p.697-710.

MINERALOGICAL CHARACTERISTICS AND SPATIAL DISTRIBUTION OF DIFFERENT AGE FRACTURES IN GRANITES AND PEGMATITES OF THE «VOZROZHDENIE» DEPOSIT («KAWANTSAARI»), THE VYBORG MASSIF

M.A.IVANOV, *Dr. of Geological and Mineral Sciences, Head of Department, ivan@spmi.ru
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia*

The unique size of monolithic blocks of granite in the «Vozrozhdenie» deposit («Kawant-saari») is due to the stability of these rocks in the steeply dipping and probably crosscutting part of the massif, where the rocks have retained their massive texture and have been least modified at the stage of formation of rare-metal pegmatites. The shape and size of monolithic blocks are determined by the pattern of disturbances, in the formation of which the leading role belongs to three steeply dipping zones of tectonic fractures of the North-West strike with the haloes of changes in the conditions of low-temperature acidic metasomatism. Later tectonic disruptions in these zones led to the destruction of rock blocks between them within a series of transverse fractures and to subhorizontal discontinuities of rocks caused probably by gravitational unloading of the massif and glacier action. The distribution of fractures in all directions is characterized by equal spacing («step»).

Key words: the Vyborg rapakivi massif, monolithic blocks of granite, pegmatites, types of fractures, patterns of fracture distribution, fracture prediction.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗОЛОТА В РУДАХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С.В.СЕНДЕК, канд. геол.-минерал. наук, *sendek-sv12@yandex.ru*

К.Е.ЧЕРНЫШЕВ, аспирант, *mekosoy@mail.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены теоретические обоснования анализа закономерных распределений золота в рудах гидротермальных месторождений. В основу анализа положены принципы энтропийной зависимости изменчивости распределений концентраций золота в различных физико-химических рудообразующих условиях, формирующих определенные золоторудные парагенезисы минералов руды. Распределение концентраций золота в конкретном рудном парагенезисе подчинено логнормальному закону и, следовательно, на двоичной (логнормальной) шкале концентраций золота конкретный парагенезис минералов руды отображается в виде частотного максимума того или иного класса шкалы. Используя определенные методические приемы обработки данных бороздowego опробования рудных тел, можно выявить или подтвердить присутствие нескольких продуктивных рудных ассоциаций минералов руды, сопоставить их объемные и количественные соотношения в рудных телах и эксплуатационных блоках месторождений. Полученные результаты проведенных аналитических исследований распределений концентраций золота в рудах разных, в том числе полистадийных гидротермальных, месторождений подтверждают возможность широкого использования методики анализа распределений концентраций золота в рудах для дополнительного исследования генетической природы оруденения и промышленной особенности руды.

Ключевые слова: концентрации золота, логнормальное распределение, бороздowego опробование, частость проб, мощность рудного тела, продуктивность или линейный запас золота.

В производственной геологической практике оценки, разведки и особенно эксплуатации золоторудных месторождений непременным условием достоверности получения сведений о месторождении является использование данных систематического опробования рудных тел. Основным показателем опробования является концентрация золота в рудных телах и ее изменчивость, позволяющие анализировать плотности разведочных сетей, виды и способы взятия проб, подсчитывать запасы золота. Концентрация золота или содержание золота в рудах определяет качественную и количественную оценку рудного тела и месторождения в целом. Поэтому не случайно на протяжении многих десятилетий геологи разрабатывали методы наиболее точного определения концентраций металлов, в том числе и золота, в анализируемых рудах. В фундаментальных работах К.Л.Пожарицкого, В.М.Крейтера, А.Д.Краснова, П.Л.Каллистова, М.Н.Альбова, Е.О.Погребницкого, Л.И.Четверикова и других для достоверной оценки концентраций металлов предложен целый ряд методик по способам и видам опробования руд применительно к тем или иным месторождениям, включая и золоторудные.

Для выявления достоверных значений концентраций металлов широко используются методы вероятностной математической статистики данных опробования руд. Использование этих методов основано на том, что каждая проба, взятая из одного и того же рудного тела, не гарантирует подтверждения в соседней, смежной части рудного тела. Поэтому совокупности опробования руд составляют случайный набор цифровых показателей проб, который может и должен анализироваться вероятностными математическими методами. Основные методы вероятностного математического анализа распределений золота в рудах

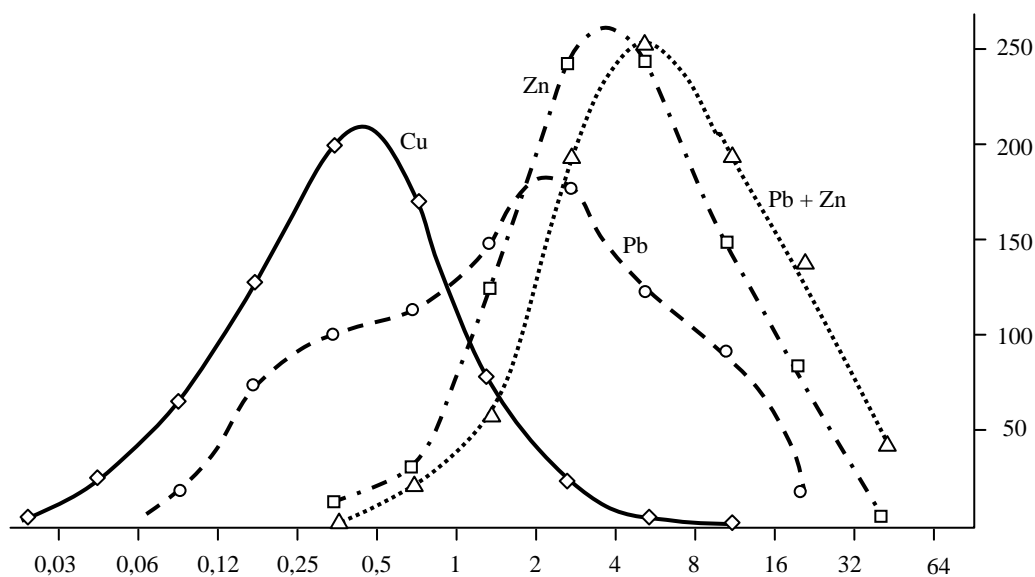


Рис.1. Графики распределений концентраций металлов в рудах Риддер-Сокольского месторождения. Абсцисса – логнормальная шкала концентраций, %, ордината – частота проб, шт.

и рудных телах направлены на получение наиболее точных параметров концентраций золота в руде с последующим использованием полученных аналитических данных для подсчета запасов. С этой целью прежде всего рассматривается совокупное распределение данных опробования для получения информации о распределении содержаний металлов. По характеру распределений содержаний определяется их нормальная (арифметическая) или логарифмическая (геометрическая) закономерность, с помощью которой рассчитываются параметры: средние концентрации, медианы, моды, эксцессы и дисперсии концентраций золота в анализируемой выборке.

Вместе с тем при анализе изменчивости концентраций металлов в рудах всегда возникают вопросы о причинах их появления, о том, какие геологические особенности рудообразования формируют закономерности распределений концентраций металлов и в чем это выражается.

Многолетний анализ распределений металлов в рудах (Н.К.Разумовский, А.Н.Колмогоров, Р.И.Коган, Д.А.Родионов и др.) позволил обнаружить в рудах металлов логнормальный тип распределений концентраций. Впервые это показал Н.К.Разумовский [9], который на примере распределений Cu, Pb, Zn и суммы Pb + Zn в Ново-Сокольской линзе Риддерского месторождения установил, что логарифмически нормальный закон является господствующим (рис.1).

Причина такого распределения металлов для Н.К.Разумовского была не ясна. Тем не менее, это позволило ему сделать важные выводы о необходимости использования логнормального закона при подсчете запасов рудных и россыпных месторождений, поскольку «...логарифмически-нормальный закон, по-видимому, в природе распространен гораздо больше, чем это до сих пор известно» [9, с.817].

Это предположение было раскрыто математиком академиком А.Н.Колмогоровым, который показал, что логнормальное распределение широко применяется в самых различных областях естествознания. Например, ему подчинены распределения содержаний редких и малых элементов в породах различного генезиса или размеры частиц при дроблении руды.

В справочной литературе по математическим методам в геологии отмечается, что «... хотя во многих случаях аппроксимация логнормальным распределением вполне удовлетворительная, надлежащее теоретическое обоснование, ведущее к логнормальной модели, почти всегда отсутствует. Это не позволяет исследователю дать генетическую интер-

претацию полученных таким путем вероятностных моделей. Тем не менее, если ограничиться задачей подбора достаточно приемлемой аппроксимации наблюдаемых в результате опыта асимметричных распределений (например, для более сжатого представления обширной выборочной информации или с целью более обоснованного применения некоторых статистических критериев и т.п.), то логнормальный закон нередко оказывается вполне подходящей моделью» [13, с.33].

Закономерности логнормального распределения могут быть проиллюстрированы и с других позиций.

В.С.Урусов писал: «Когда несколько различных явлений природы накладываются друг на друга, образуя одну систему, диссимметрии их складываются таким образом, чтобы сохранить максимальное количество тех элементов симметрии и/или тех частей пространства, которые являются общими для каждого явления, взятого отдельно. Количественное сходство или похожесть изменившихся элементов энтропии может быть оценено как среднеквадратичные отклонения от первоначального» [14, с.18].

Известно, что гидротермальное рудообразование всегда сопряжено с дислоцированностью пород, в которых формируется руда. Эти дислокации могут быть сколового и отрывного типов, но обязательно образуются в обстановке сжатия и разрушения первичной породной системы.

По данным В.А.Чантурия и др. [16], анализ разрушения горных пород при их квазистатическом сжатии на примере гранодиорита показал, что в интервале разрушенных частиц от 4 до 0,0625 мм на ситах Фишера – Вилера расчеты массовых процентов соответствующих отсеиваемых фракций, отстроенные в виде кумулятивных кривых, соответствуют логнормальному распределению. Эти же исследования на примере гранитов, песчаников и сланцев показывают, что для каждой породы свойственны свои параметры расчетных фракций разрушенных частиц, но внутренние распределения этих фракций подчиняются логнормальному закону распределения.

В этой связи уместно сослаться на работу В.А.Падукова [6], который для любой горной породы, подвергаемой механическому разрушению, использует главную характеристику – структурную энтропию, отражающую качественную и количественную стороны энергетики породообразования. Составные элементы структурной энтропии функционально объединены логнормальными связями и поэтому однотипны. Сама же структурная энтропия, как порода, дискретна. Следовательно, по типу структурных энтропий породы различны, что впервые позволило классифицировать их по энергоемкости разрушения.

В работе [17] приведены результаты изучения разрушенного образца гнейса с точки зрения количественной оценки возникших обломочных частиц. Проводилась съемка поверхности образца с помощью оптического и электронного микроскопов при увеличениях в 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800; 1600 раз. В каждом поле изучаемой поверхности с помощью специальных трафаретов подсчитывалось количество частиц. Все подсчеты группировались по четырем классам крупности. Результат подсчета таков: каждый класс крупности содержит частицы, средний размер которых в 2 раза меньше или больше предыдущего или последующего класса соответственно. Расчет плотностных характеристик частиц в каждом из классов свидетельствует об определенном подобии в изменении крупности частиц при переходе с одного масштабного уровня на другой.

Смысл логнормального функционального распределения металла в рудах как генетической характеристики рудообразования показал А.В.Канцель [3]. Он рассматривал рудообразование как сложную по многим параметрам гидротермальную систему, для которой существует начало и конец формирования руды или парагенетической минеральной ассоциации. Оруденение функционально зависит от времени и скорости минералообразующего процесса, обусловленного его кинетической энергией, пропорциональной квадрату скорости. В результате завершения рудообразования создается минеральная ассоциация, которой

свойственна совокупность распределений концентраций металла (взятых проб) от минимального до максимального значений. На цифровой шкале концентраций наибольшее число одинаковых значений определяет максимум выборки проб, отвечающий, скорее всего, среднеарифметическому. Этот максимум характеризует некий средний параметр концентрации металла, свойственный данной руде.

Еще одной важной стороной распределения концентраций является дисперсия значений в анализируемой совокупности. При равномерном распределении металла в руде дисперсия минимальна. В случае неравномерного распределения металла дисперсия возрастает. «Таким образом, дисперсия является мерой упорядоченности в расположении частиц рудного вещества в жильной массе. Под упорядоченностью, согласно принципам термодинамики, понимается равномерное распределение вещества в рассматриваемом объеме или же его сгущение в отдельных точках. В термодинамике функция состояния системы, являющейся мерой упорядоченности системы, известна под названием энтропии. Отсюда и величину дисперсии мы можем рассматривать как функцию состояния системы, связанную с энтропией процесса» [3, с.23].

Из данного постулата следует вывод, что функция распределения металла в рудном теле через скорость процесса и термодинамическую функцию его состояния связана со всеми факторами как внешнего, так и внутреннего характера, влияющими на процесс рудообразования. Это дает основание рассматривать функцию распределения металла как одну из генетических характеристик.

Взаимосвязь распределений запасов металла как следствие генетических особенностей рудообразования была показана во многих работах [2, 4, 7, 15 и др.]. В работах С.В.Сендека [1, 10-12], изучавшего ряд золоторудных месторождений Северо-Востока России, показаны закономерные распределения концентраций золота в рудах, подчиненных логнормальным соотношениям параметров руд: частостей проб, мощностей рудных тел, продуктивностей оруденения.

Таким образом, используя закон логнормального распределения концентраций золота в руде, можно по имеющемуся банку данных опробования и известной геолого-генетической модели рудообразования выявить закономерные соотношения концентраций золота с природными типами руд, что имеет важное теоретическое и практическое значение для познания генезиса и промышленного типа месторождения.

Всякая рудообразующая гидротермальная система создается во времени и пространстве, где время – это период или скорость рудообразования, а пространство – это термодинамическая среда минералообразования в тех или иных горных породах. Истинные значения периода времени определить сложно, но ясно одно: процесс рудообразования не мгновенный, он растянут во времени и имеет определенную скорость. За этот период могут меняться энергетические характеристики процесса, что особенно характерно для вулканогенных гидротермальных месторождений. Учитывая временную изменчивость параметров, рудообразование можно считать прерывистым, дискретным, что создаст стадийность формирования руды со значительной изменчивостью ее состава, выражающейся в широкой дисперсии распределений металлов.

Вне зависимости от единого последовательного или дискретного рудообразования обнаруживается направленная изменчивость состояния или упорядоченность рудообразующей системы во времени. В термодинамике мера оценки состояния или упорядоченности системы называется энтропией. Поэтому в процессе становления руды или ассоциаций минералов каждому временному периоду свойственна своя упорядоченность системы, выражающаяся в особенности энтропийных условий формирующейся руды. Отсюда вытекает важный вывод о временной изменчивости рудообразующей энтропии по типу кинетического энергетического процесса для движущегося тела (кристаллизация и рост минералов, растворение и перекристаллизация ранних парагенезисов и др.).

Физическое определение энергетического состояния энтропии зависит от квадрата скорости происходящего процесса: $E = kmv^2/2$, где k – постоянная Больцмана; m – масса вещества; v – скорость процесса. Если энергетическое состояние процесса стабильно, то изменчивость скорости повлечет за собой изменение массы, пропорциональное логнормальному распределению. В случае золоторудных месторождений масса золота обычно определяется как концентрация или содержание его в руде в граммах на тонну. Следовательно, на логнормальной (двоичной) шкале концентраций золота в руде можно выявить стабильные уровни содержаний золота, свойственные данному состоянию энтропии. Чем значительнее изменение условий энтропии, тем разнообразнее будут минеральные парагенезисы, тем разнообразнее условия концентрации полезного компонента, создающие дисперсии распределения металлов. Следовательно, дисперсия концентраций золота является величиной, пропорциональной квадрату скорости минералообразования, и генетическим показателем энергетической характеристики рудообразующего процесса.

Дисперсия служит мерой отклонения содержаний металлов от среднеарифметической величины. Если рудные минералы распределены в рудном теле равномерно, то дисперсия будет небольшой. В случае неравномерного распределения значение возрастет. Следовательно, дисперсия может рассматриваться как функция состояния системы, связанной с энтропией процесса. Окончательный вывод: «распределение металла в рудном теле через скорость процесса и термодинамическую функцию его состояния (процесса – $S.C.$) связано со всеми факторами, влияющими на процесс рудообразования» [3, с.23]. Это позволяет рассматривать функцию распределения металла как одну из генетических особенностей характеристик, воплощающих в себе важнейшие особенности процесса рудообразования, и служащую количественным выражением этих особенностей, взятых во взаимодействии и взаимосвязи.

Анализ генетических особенностей рудообразования, на основе теоретически рассмотренных постулатов распределений металлов, должен исходить из того, что главной характеристикой руд является концентрация или содержание металлов в руде и дисперсия этих содержаний. Однако полноценный геологический анализ и расшифровка полученных распределений должны рассматриваться и анализироваться только для конкретного объекта на соответствующем масштабном уровне: элементов – в минерале, минералов – в руде, руд – на месторождении, месторождений – в рудном узле и т.п. Главным фактурным материалом для рассмотрения тех или иных закономерностей распределений металлов являются геологические характеристики минерального состава руд, морфологические особенности рудных тел и данные их опробования, полученные в процессе поисковых, разведочных и эксплуатационных работ.

Гидротермальное рудообразование, как правило, формируется в условиях меняющихся физико-химических и термодинамических обстановок, что обуславливает появление нескольких парагенетических минеральных ассоциаций, составляющих природную руду. Отдельно взятый минеральный парагенезис создается в условиях ограниченных и оптимальных параметров (P , T , рН и др.), которым соответствует определенная минеральная ассоциация. Эта ассоциация характеризуется конкретной минеральной формой присутствия металла и его связью с сопутствующими минералами парагенезиса, что обуславливает определенный уровень концентрации металла в этом парагенезисе. Следовательно, по совокупности анализируемых проб данного рудного тела можно судить о характере распределения количества проб по уровням концентраций металла и выявить оптимальный уровень концентрации металла, свойственный данному парагенезису. Этому значению будет соответствовать максимальное число проб (частость проб), приходящееся на определенный уровень (класс) содержаний металла в руде.

Методические рекомендации по обработке и анализу материалов опробования золоторудных месторождений значительны по объему и не могут быть приведены в настоящей

статье. Интересующихся отсылаем к опубликованным работам [8, 10, 11]. Здесь же рассмотрим принципиальные положения анализа распределений концентраций золота в рудах на основе ранее изложенных положений.

Анализируются распределения золота в рудах, которые представлены концентрацией или содержанием золота в единице руды, за которую принята тонна. Обозначим концентрацию c , единица – грамм на тонну. Количество анализируемых проб обозначим n . Распределение n , или частота проб по двоичной (логнормальной) шкале концентраций золота, выявляет один или более максимумов, отвечающих преобладающим рудным парагенезисам в данном рудном теле. В качестве примера можно сослаться на работу сотрудников ЦНИГРИ [7], изучавших распределение частоты проб в Ново-Кузнецовской жиле месторождения Дарасун. На шкале концентраций золота обнаружили два частотных максимума, отвечающих золотокварцевой и золотосульфидной продуктивным минеральным ассоциациям, составляющим жильную руду.

Второй важный количественный параметр золота в руде составляет продуктивность, или линейный запас золота. Этот параметр относится к конкретной пробе, каждая из которых имеет свой объем. При одних и тех же концентрациях золота в двух пробах количество золота в большей пробе будет больше во столько раз, во сколько объем большей пробы превышает меньшую. Объем каждой пробы определяется произведением поперечного сечения на длину пробы. Поскольку размеры поперечных сечений бороздовых проб одинаковы, продуктивность, или линейный запас, всегда определяется как произведение mc , где m – длина пробы, единица – метр. Продуктивность, или линейный запас, определяется как метрограмм ($m \cdot g/t$), где длина пробы m фактически отображает не только линейный, но и объемный показатель взятой пробы. В анализируемой выборке проб для каждого класса двоичной шкалы концентраций золота определяются: число проб n , длины проб m и их сумма; продуктивности золота mc и их сумма. В случае большого числа проб все суммарные значения нужно принять за 100 % и распределить по классам концентраций золота на анализируемой шкале. В итоге составляются сводные таблицы результатов опробования и графики распределений по классам концентраций (в процентном выражении) суммы n , m , mc [8].

Полученные расчетные данные результатов опробования позволяют выявить важные генетические особенности руд. Частота распределения проб n позволяет определить наиболее широко проявленные продуктивные минеральные ассоциации, формирующие руду. Каждый максимум должен рассматриваться как природная концентрация золота, соответствующая выделенным классам шкалы концентраций. Если положение максимума асимметрично, возрастает его дисперсия за счет выполаживания кривой распределения в сторону более высоких классов и, более того, на этом выполаживании обнаруживается незначительный максимум в одном из классов шкалы. Это значит, что существует не одна, а несколько дополнительных стадий рудообразования. Новый максимум, хотя и меньший по значению, также отражает проявление стадии минерализации со своим уровнем концентрации золота в руде. Поскольку частота проб по классам концентраций золота отображается в процентах, параметры амплитуд максимумов на графиках будут отображать преобладающее значение того рудного минерального парагенезиса, амплитуда которого является большей. По параметрам амплитуд можно судить о доле участия того или иного рудного парагенезиса в общем частотном распределении проб анализируемой руды.

В качестве примера можно проиллюстрировать частоты распределений проб из эксплуатационных блоков Игуменовского жильного золоторудного месторождения с бедной, рядовой и богатой рудой. Выполненное распределение проб (рис.2, а) показало, что в разных блоках различных жил отчетливо фиксируются три однотипные продуктивные минеральные ассоциации, из которых наиболее бедная руда образована ранним парагенезисом так называемого серого кварца; наиболее продуктивная, формирующая рядовые руды, свя-

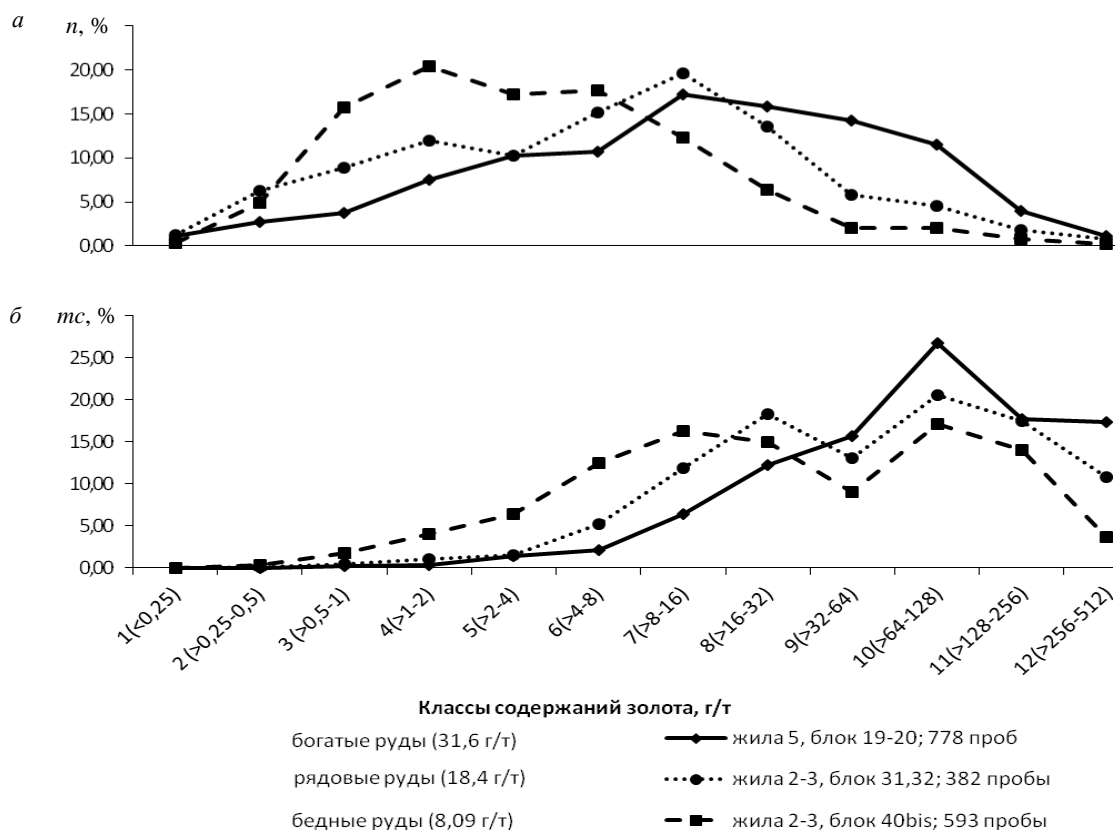


Рис.2. Графики распределений частот проб (а) и продуктивностей золота (б) в эксплуатационных блоках Игуменовского золоторудного месторождения на логнормальной шкале концентраций золота

зана со становлением молочно-белого жильного кварца, а наиболее богатые руды образованы в процессе деформации жильного тела, перераспределения и перекристаллизации жильных и рудных минералов, в том числе перекристаллизованного крупного золота [15].

В каждом из эксплуатационных блоков относительные соотношения трех продуктивных ассоциаций изменяются. Бедные руды представлены ассоциацией ранней и средней стадий минерализации, в то время как богатые руды, составляющие жильные тела, – это в основном широко проявленная в объеме жил средняя золотокварцевая с сульфидами ассоциация, осложненная проявлениями поздней продуктивной ассоциации свободного и крупного золота в местах морфологически усложненных участков жильных тел.

Распределение продуктивностей *mc* на двоичной шкале концентраций свидетельствует о доле золота, приходящейся на ту или иную стадии рудообразования. Это дает основание для выделения наиболее продуктивного парагенезиса минералов в рудообразующем процессе.

В эксплуатационных блоках Игуменовского месторождения (рис.2, б) распределение соотношений продуктивностей *mc* в этих же блоках отчетливо свидетельствует о главенствующей роли средней продуктивной минерализации в рядовых и богатых по содержанию золота рудах. Поэтому еще на ранних стадиях изучения Игуменовского золоторудного месторождения обращалось внимание на то, что индикаторным минералом среди сульфидов промышленных руд является галенит, свойственный этой продуктивной золотокварцевой ассоциации.

Полученные графики распределений продуктивностей золотого оруденения позволяют в первом приближении оценить и технологические особенности руд. По результатам эксплуатационных работ были определены два технологических типа руд – связанного и сво-

бодного золота, что обусловило комбинированное гравитационное с амальгамацией и флотационное с цианированием извлечение золота. Недооценка соотношений связанного и свободного золота в разведваемом блоке жилы существенно повлияла на оценку возможности извлечения крупного золота, тем более при постоянном урезании концентрационных значений золота в ураганных пробах при подсчете эксплуатационных запасов.

Приведенное распределение продуктивностей золота (рис.2, б) свидетельствует, что во всех блоках есть большая доля свободного и крупного золота. Многолетняя практика исследований руд золотосодержащих кварцевых жил позволяет уверенно утверждать, что значения концентраций золота в жилах от 50 г/т и более (9-й класс шкалы) гарантируют присутствие пусть даже мелкого, но свободного золота. Концентрация свыше 100 г/т (10-й класс шкалы) свидетельствует, что в руде возрастает крупность свободного золота и такое золото можно обнаружить в виде зерен разного размера при просмотре образцов руды. Классы 11-й и 12-й шкалы концентраций золота характеризуют наличие крупного и даже самородкового золота. Площадь под графиками продуктивностей золота (рис.2, б) фактически составляет 100 % запаса золота для каждого блока. Поэтому с 9-го по 12-й классы шкалы доля свободного и крупного золота в блоках на графиках составляет от 40 до 60 %. По данным Е.С.Мокрушиной [5], изучавшей технологические схемы извлечения золота из руд Игуменовского месторождения на руднике им. Белова, где опробованию подверглись жилы 2-3 и 5, включая указанные блоки, «опытами было установлено, что отсадкой руды, крупность которой изменялась от 6 до 0,6 мм, извлечение золота в гравитационный концентрат повышалось с 44 до 65 %. В амальгаму из этих гравитационных концентратов соответственно извлекалось 40-64 % золота» [5, с.26].

При разведке и эксплуатации Игуменовского месторождения требования подсчета запасов золота ограничивали уровень концентраций богатых проб 100 г/т. В последующем главным геологом В.И.Бодягиным [15] по результатам извлечения золота на фабрике и оперативным подсчетом запасов было проведено сопоставление повариантных подсчетов запасов на стадии разведки, эксплуатации и фабричных данных, принятых за 100 %. Данные разведочных работ с учетом всех проб без ограничения значений концентрации золота по отношению к фабричным пробам составили 93,6 %, а с урезанием богатых проб – 72,4 %. Эксплуатационное опробование с учетом всех проб по сравнению с разведочным составило 100,6 %, а с учетом ограничения до 100 г/т – 78,5 %. Следовательно, ограничение концентраций золота до 100 г/т фактически исключает свыше 20 % крупного золота, которое отчетливо демонстрируют графики продуктивностей в классах с 10-го по 12-й шкалы концентраций золота (рис.2, б), на долю которых и приходятся отмеченные расхождения.

Рассмотрим распределение длин проб m . Как отмечалось ранее, каждый интервал взятой бороздовой пробы (длина пробы), при ее постоянном поперечном сечении, свидетельствует о ее доле в объеме выражении опробованного рудного тела. Отсюда каждый класс двоичной шкалы концентраций золота по сумме длин проб, выраженных в процентах, к общей длине всех проб характеризуется объемной долей данного класса шкалы в рудном теле. На этом основании по характеру распределений длин проб можно судить о доле участия продуктивных минеральных ассоциаций в формировании рудного тела, определять объемы наиболее минерализованных руд (рудных столбов) в рудном теле, оценивать вероятность обнаружения наиболее богатых золотом руд при совпадении общего характера распределений продуктивностей и длин проб в однотипных месторождениях. Это особенно важно при учете ураганных проб или самородкового золота.

В заключение отметим, что логнормальное распределение концентраций золота определяется генетической природой золотого жильного гидротермального рудообразования. Используя анализ распределений концентраций золота в рудах, можно получить важную дополнительную информацию о генезисе оруденения и его промышленной значимости на стадии геологоразведочных и эксплуатационных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахрушева А.П. Внутрирудный метаморфизм и природные типы золотосодержащих руд / А.П.Вахрушева, С.В.Сендек // Записки Горного института. 2011. Т.194. С.60-67.
2. Золоторудные месторождения России / Ред. М.М.Константинов. М.: Акварель, 2010. 349 с.
3. Канцель А.В. Функция распределения металла в рудах как генетическая характеристика процесса рудообразования // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1988. № 10. С.18-30.
4. Многофакторные прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России / Ред. М.М.Константинов, И.С.Розенблюм, М.З.Зиннатуллин. Комитет по геологии и использованию недр РФ, Северо-Восточный геологический комитет. М.-Магадан, 1992. 140 с.
5. Мокрушина Е.С. Разработка технологической схемы для золотосодержащей руды рудника им.Белова // Тр. ВНИИ-1. Раздел IV. Обогащение и металлургия. 1956. Вып.16. С.21-35.
6. Падуков В.А. Энтропийный закон разрушения горных пород // Записки Горного института. 2007. Т.168. С.48-50.
7. Перец В.А. О взаимосвязи содержаний золота, серебра и других компонентов руд и мощностей рудных тел Арасунского месторождения / В.А.Перец, Д.А.Тимофеевский, Н.И.Эпов // Тр. ЦНИГРИ. 1969. Вып.86. Ч.1. С.44-67.
8. Прогнозно-поисковые модели месторождений полезных ископаемых различных формационных типов: Метод. указания для самостоятельной работы / Сост. С.В.Сендек; Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2009. 25 с.
9. Разумовский Н.К. Характер распределения содержаний металлов в рудных месторождениях // Докл. АН СССР. 1940. Т.28. № 9. С.815-817.
10. Сендек С.В. Структура запасов металла как следствие генетических особенностей рудообразования // Записки Санкт-Петербургского горного ин-та. 1993. Т.137. С.28-38.
11. Сендек С.В. Проявление энтропийного закона распределения массы золота при формировании промышленного оруденения // Записки Горного института. 2009. Т.183. С.112-126.
12. Сендек С.В. Закономерности распределений золота в рудах месторождений, подверженных процессам метаморфизма // Материалы конф. 100-летия Н.А.Шило / ИГЕМ РАН. М., 2013. Т.1. С.168.
13. Справочник по математическим методам в геологии / Д.А.Родионов, Р.И.Коган, В.А.Голубева и др. М.: Недра, 1987. 335 с.
14. Урусов В.С. Эволюция Земли и Космоса в свете концепции симметрии-дисимметрии // Смирновский сборник – 2007. М.: Изд-во МГУ, 2007. 338 с.
15. Фирсов Л.В. Структура, морфология, минералогия и оруденение Игуменовского золоторудного месторождения // Тр. ВНИИ-1, сер. геология. 1958. Вып.33. С.191-262.
16. Чантурия В.А. Наночастицы в процессе разрушения и вскрытия геоматериалов / В.А.Чантурия, К.Н.Трубецкой, С.Д.Викторов, И.Ж.Бунин; ИПКОН РАН. М., 2006. 216 с.
17. Santarelli F.J. Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests // F.J.Santarelli, E.T.Brown // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1989. Vol.124. N 5. P.401-413.

REFERENCES

1. Vakhrusheva A.P., Sendek S.V. Vnutrirudnyi metamorfizm i prirodnye tipy zolotosoderzhashchikh rud (*Intra-ore-forming metamorphism and natural types of gold-bearing ores*). Zapiski Gornogo instituta. 2011. Vol.194, p.60-67.
2. Zolotorudnye mestorozhdeniya Rossii (*Gold-bearing deposits of Russia*). Edit. M.M.Konstantinov. Moscow: Akvarel', 2010, p.349.
3. Kantsel' A.V. Funktsiya raspredeleniya metalla v rudakh kak geneticheskaya kharakteristika protsessa rudoobrazovaniya (*Function of metal distribution in ores as a genetic characteristic of the ore-forming process*) Izv. AN SSSR. Ser. geol. 1988. N 10, p.18-30.
4. Mnogofaktornye prognozno-poiskovye modeli mestorozhdenii zolota i serebra Severo-Vostoka Rossii (*Multifactor prognostic-prospecting models of gold and silver deposits of the Russian North-East*). Editors: M.M.Konstantinov, I.S.Rozenblyum, M.Z.Zinnatullin. Moscow-Magadan, 1992, p.140.
5. Mokrushina E.S. Razrabotka tekhnologicheskoi skhemy dlya zolotosoderzhashchei rudy rudnika im.Belova (*Flow-sheet design for gold-bearing ore of the Belov mine*). // Trudy VNII-1, part IV. Obogashchenie i metallurgiya. 1956. Iss.16, p.21-35.
6. Padukov V.A. Entropiinyi zakon razrusheniya gornykh porod (*Entropy law of rock disintegration*). Zapiski Gornogo instituta. 2007. Vol.168, p.48-50.
7. Perets V.A., Timofeevskii D.A., Epov N.I. O vzaimosvyazi soderzhaniy zolota, serebra i drugikh komponentov rud i moshchnosti rudnykh tel Arasunskogo mestorozhdeniya (*On the relationship between the content of gold, silver, and other components and thickness of ore-bodies in the Arasunskoye deposit*). Trudy TsNIGRI. 1969. Iss.86. Part 1, p.44-67.
8. Prognozno-poiskovye modeli mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh razlichnykh formatsionnykh tipov (*Prognostic-prospecting models of mineral deposits of different formation types*). Written by S.V.Sendek; Natsional'nyi mineral'no-syr'evoi universitet «Gornyi». St Petersburg, 2009, p.25.
9. Razumovskii N.K. Kharakter raspredeleniya soderzhaniy metallov v rudnykh mestorozhdeniyakh (*Distribution pattern of metal content in ore deposits*). Dokl. AN SSSR. 1940. Vol.28. N 9, p.815-817.

10. *Sendek S.V.* Struktura zapasov metalla kak sledstvie geneticheskikh osobennostei rudoobrazovaniya (*Structure of metal reserves as a consequence of genetic peculiarities of the ore-forming process*). Zapiski Sankt-Peterburgskogo gornogo instituta. 1993. Vol.137, p.28-38.
11. *Sendek S.V.* Proyavlenie entropiinogo zakona raspredeleniya massy zolota pri formirovanii promyshlennogo orudneniya (*Manifestation of the entropy law in distribution of the gold mass during the minable ore forming*). Zapiski Gornogo instituta. 2009. Vol.183, p.112-126.
12. *Sendek S.V.* Zakonomernosti raspredelenii zolota v rudakh mestorozhdenii, podverzhennykh protsessam metamorfizma (*Regular patterns in distribution of gold in ore deposits that are prone to metamorphism processes*). Materialy konf. 100-letiya N.A.Shilo. IGEM RAN. Moscow, 2013. Vol.1, p.168.
13. *Rodionov D.A., Kogan R.I., Golubeva V.A.* et al. Spravochnik po matematicheskim metodam v geologii (*Reference book for mathematical methods in Geology*). Moscow: Nedra, 1987, p.335.
14. *Urusov V.S.* Evolyutsiya Zemli i Kosmosa v svete kontseptsii simmetrii-disimmetrii (*Evolution of the Earth and the Universe in view of the symmetry-dissymmetry concept*). Smirnovskii sbornik – 2007. Moscow: Izd-vo MGU, 2007, p.338.
15. *Firsov L.V.* Struktura, morfologiya, mineralogiya i orudnenie Igumenovskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (*Structure, morphology, mineralogy and ore-forming processes of the Igumenovskoye gold ore deposit*). Trudy VNII-1, seria geologiya. 1958. Iss.33, p.191-262.
16. *Chanturia V.A., Trubetskoy K.N., Viktorov S.D., Bunin I.Zh.* Nanochastitsy v protsesse razrusheniya i vskrytiya geomaterialov (*Nanoparticles in the process of disintegration and development of geomaterials*). IPKON RAN. Moscow, 2006, p.216.
17. *Santarelli F.J., Brown E.T.* Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1989. Vol.124. N 5, p.401-413.

THEORETICAL JUSTIFICATION FOR ANALYZING DISTRIBUTION OF GOLD CONCENTRATIONS IN ORES OF HYDROTHERMAL GOLD DEPOSITS

S.V.SENDEK, *PhD in Geological and Mineral Sciences, sendek-sv12@yandex.ru*

K.E.CHERNYSHEV, *Postgraduate student, mekosoy@mail.ru*

National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article covers theoretical justification for the analysis of the regular pattern of gold distribution within ores of hydrothermal gold deposits. The analysis is based on principles of entropy dependence of gold concentration distribution variability in different physical-chemical conditions of ore-forming processes providing certain gold-bearing parageneses of ore minerals. At this rate, distribution of gold concentrations in an ore paragenesis is subordinated to the log-normal rule, and, subsequently, on the binary (lognormal) scale of gold concentrations this certain paragenesis of ore minerals is reflected as the frequency maximum of one or another class of this scale. Using some methodical steps in processing channel sampling data, it is possible to reveal or confirm the presence of several gold-bearing mineral associations and compare their volumetric and quantitative ratios in ore-bodies and blocks of mining. Results of the performed analysis of gold concentration distribution in ores of different hydrothermal gold deposits, including the polystadial ones, prove the validity of this technique for estimation of the gold distribution in ores with the purpose of carrying out supplementary study of the genetic nature of ores, and their mining feasibility.

Key words: gold concentrations, lognormal distribution, channel sampling, frequency of samples, ore-body thickness, specific capacity or the gold linear reserve.

ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ НИЖНЕТАГИЛЬСКОГО И СВЕТЛОБОРСКОГО МАССИВОВ СРЕДНЕГО УРАЛА

А.М.ДУРЯГИНА, аспирантка, *gayfutdinovaam@yandex.ru*

Н.И.ВОРОНЦОВА, канд. геол.-минерал. наук, доцент, *natvoron@yandex.ru*

Е.С.НИКОЛАЕВА, аспирантка, *legenda.92@mail.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Приведен анализ минерального состава и геохимических данных по корам выветривания Нижнетагильского и Светлоборского массивов Платиноносного пояса Урала. Коры выветривания здесь представлены неполным профилем и сложены дезинтегрированными лизардит-хризотилловыми и рыхлыми выщелоченными лизардитовыми серпентинитами, на Светлоборском массиве выявлена глинистая нонтронитовая зона. Коры выветривания изученных массивов характеризуются накоплением большинства элементов-примесей и редкоземельных элементов (РЗЭ) вверх по профилю. В породах Светлоборского массива из зон контакта дунитов с дайковыми комплексами обнаружен высокий уровень РЗЭ и рассчитаны их коэффициенты накопления. Коры выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов характеризуются низкими содержаниями благородных металлов. Их геохимическая специализация определяется палладием и платиной, а в первичных зональных массивах субстрата главными платиноидами являются иридий и платина.

Ключевые слова: Светлоборский массив, Нижнетагильский массив, Платиноносный пояс Урала, кора выветривания, редкоземельные элементы, элементы платиновой группы, золото, серебро.

Введение. В связи с истощением запасов россыпных месторождений платины в России вопрос поисков и освоения новых и альтернативных источников платиновых металлов в последние десятилетия становится все более актуальным. С этой точки зрения интересными представляются массивы Платиноносного пояса Урала, освоенного промышленного региона, в котором выделяются одни из крупнейших в мире россыпеобразующие Светлоборский и Нижнетагильский зональные массивы.

Многими исследователями уже в начале XX в. отмечалось поисковое значение элювия и коры выветривания платиноносных массивов Урала: при задирке нижнего слоя коры выветривания (дунита, разрушенного в щебень или распадающегося на большие глыбы шарообразной формы) старатели не раз наталкивались на коренные проявления платины (Высоцкий, 1913). Кроме того, на сегодняшний день в мировой практике известно множество примеров выявления промышленных концентраций элементов платиновой группы (ЭПГ) в корях выветривания по ультраосновным массивам. Обогащенными благородными металлами являются никелевые месторождения кор выветривания Кубы (Моа и Никаро), Новой Каледонии, Индонезии (Сороако, Помалеа), Австралии (Гринвейл, Рокгемптон), Польши (Шкляры), Бразилии, России (Серовское, Уфалейское, Буруктальское, Сахаринское никелевые месторождения Урала) [8, 9, 14, 16]. С этой точки зрения весьма актуальным представляется изучение кор выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов, особенно на фоне широкомасштабного проведения на них поисково-разведочных работ [6, 18, 19] по изучению коренных рудопроявлений платины (рудопроявление им. Н.К.Высоцкого, Светлоборский массив и т.д.).

Строение Светлоборского и Нижнетагильского массивов. Строение массивов освещено во многих работах, включая классические труды Н.К.Высоцкого (1913), А.Н.Заварицкого (1928), А.Г.Бетехтина (1935), И.А.Малахова [11] и других. Нижнетагильский и Светлоборский массивы входят в цепочку 16 концентрически-зональных массивов Платиноносного пояса Урала (рис.1): 1 – Ревдинский, 2 – Тагило-Баранчинский, 3 – Нижнетагильский, 4 – Арбатский, 5 – Качканарский, 6 – Светлоборский, 7 – Вересовоборский, 8 – Павдинский, 9 – Косьвинский, 10 – Кытлымский, 11 – Княпинский, 12 – Кумбинский, 13 – Денежкинский, 14 – Помурский, 15 – Чистопский, Ялпинг-Ньерский, 16 – Хорасюрский. Зональное строение характеризуется наличием дунитового ядра и клинопироксеновой оболочки. Для дунитов также отмечается зональность: мелкозернистые дуниты периферии сменяются средне- и крупнозернистыми в центральных частях. Породы жильной серии на Нижнетагильском массиве представлены, главным образом, хромититами, на Светлоборском – дайками клинопироксенов, горнблендитов и иситов [17].

Строение коры выветривания на Светлоборском и Нижнетагильском массивах. Развитие коры выветривания в пределах Светлоборского и Нижнетагильского массивов носит прерывистый характер. Кора карманообразно залегает на серпентинизированных дунитах, наблюдается в бортах логов, отдельные интервалы ее вскрыты расчистками. Мощность кор выветривания в обнажениях не превышает 20 м на Светлоборском массиве и 10 м на Нижнетагильском массиве.

На основании описанных нами обнажений были составлены сводные профили выветривания обоих массивов (рис.2). В зональном профиле выветривания преобладает серпентинитовая зона, мощность которой составляет от 0,5 до 5 м, в редких случаях до 10 м. В составе ее нами выделяются подзоны дезинтегрированных (2-3 м) и выщелоченных серпентинитов (0,3-10 м). Первые представлены плотными, трещиноватыми, хризотиловыми серпентинитами, сложенными количественно доминирующим хризотилом $2O_{Cr1}$ и лизардитом $1T$ с многочисленными серпентин-сапонит-магнезитовыми прожилками, с редкой хромитовой вкрапленностью (размер зерен хромита 0,3-2,5 мм) и округлыми реликтами невыветрелого дунита размером до 40 см. Выщелоченные серпентиниты второй подзоны сложены преимущественно лизардитом $1T$ с подчиненным количеством хризотила $2O_{Cr1}$ [14]. В нижней части разреза они плотные, слабо трещиноватые, в верхней части становятся более трещиноватыми и переходят в тонкоплитчатые и рыхлые серпентиниты, местами нонтронитизированные и обохранные, с гидроксидами железа и марганца.

Помимо серпентинитовой зоны на Светлоборском массиве выделяются участки развития глинистой – нонтронито-

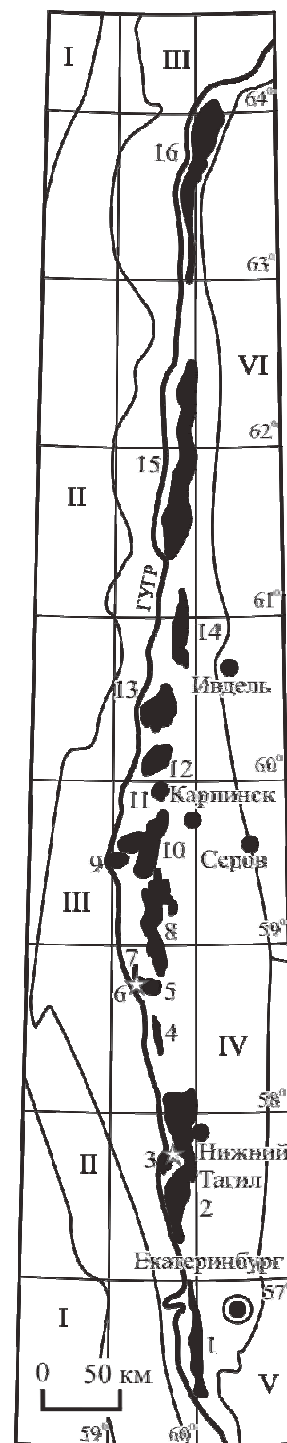


Рис.1. Положение массивов Платиноносного пояса Урала (по [5]). Пояснения см. в тексте

Структурно-минерогенетические мегазоны Уральской складчатой системы: I – Предуральский краевой прогиб, II – Западно-Уральская, III – Центрально-Уральская, IV – Тагило-Магнитогорская, V – Восточно-Уральская, VI – чехол Западно-Сибирской платформы. ГУГР – Главный уральский глубинный разлом

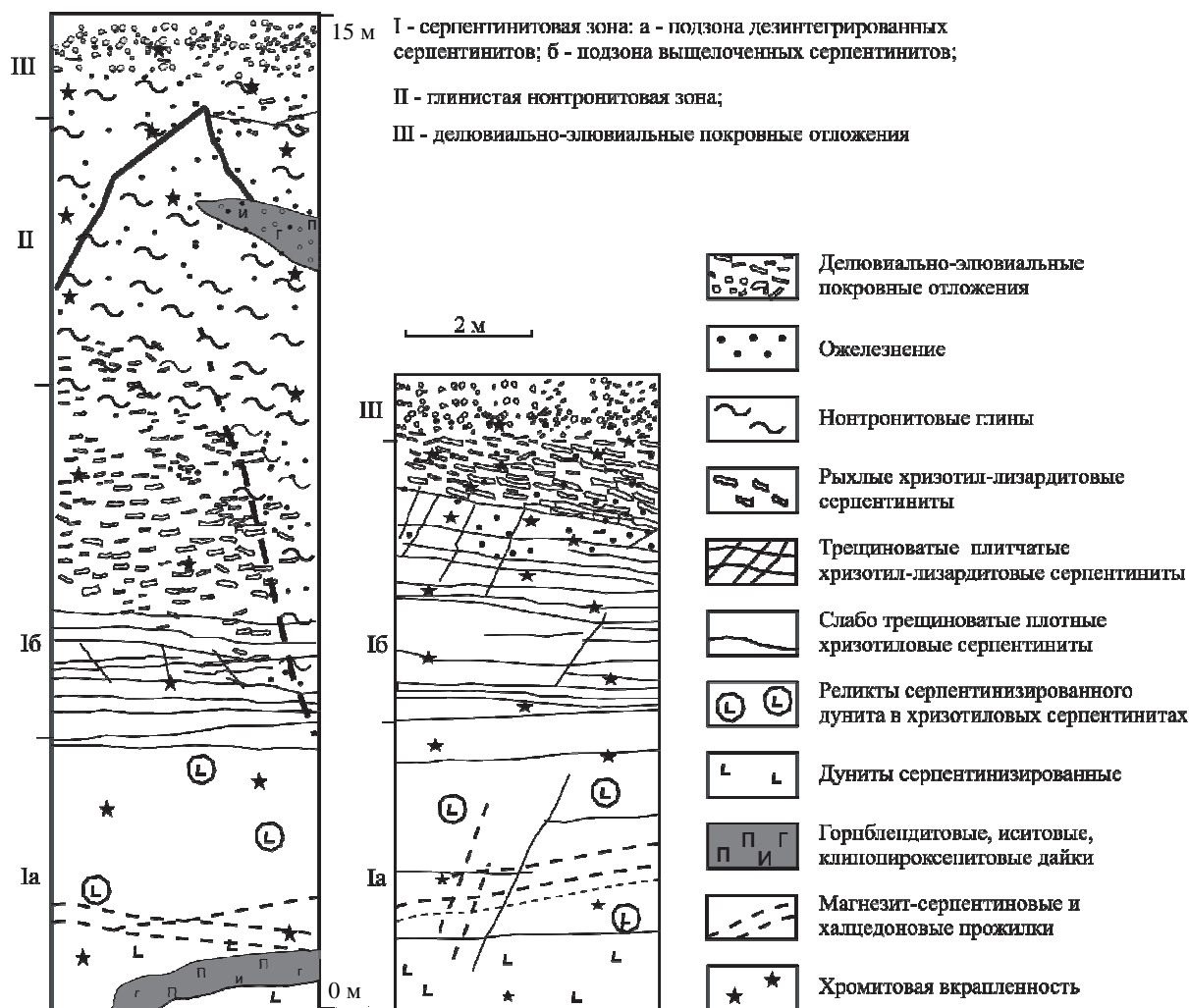


Рис.2. Профиль кор выветривания Светлоборского (слева) и Нижнетагильского (справа) массивов

вой зоны, по И.И.Гинзбургу (1953) – мощностью от 0,5 до 10 м. Неравномерно обохренные глины залегают на рыхлых выщелоченных хризотил-лизардитовых серпентинитах (лизардит 1Т), которые образуют своеобразные карманы коры выветривания, ограниченные разрывными нарушениями. По результатам проведенного рентгенофазового анализа установлено, что в составе нонтронитовой зоны преобладают минералы группы серпентина (непуит, лизардит 1Т, хризотил), глинистые минералы (сапонит, монтмориллонит 15А, корренсит), в подчиненном количестве присутствуют клинохлор, кальцит, гетит, ферригидрит, кварц.

Оксидно-железная зона в профиле выветривания отсутствует и выражена только в ожелезнении верхних частей разреза и некотором обогащении их гидроксидами Fe и Mn. В верхней части разреза породы кор выветривания как Светлоборского, так и Нижнетагильского массивов перекрываются элювиально-делювиальными и делювиально-элювиальными покровными отложениями мощностью от 0,2 до 2,5-3 м. Согласно отчету Висимского геоморфологического отряда о полевых работах 1968-1969 годов (А.П.Сигов, А.В.Ломаев, И.И.Титаренко и др.), возраст продуктов выветривания – палеогеновый.

Геохимия кор выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов. Для изучения распределения петрогенных и редких элементов в зональном профиле коры выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов было проведено исследование химического состава проб подзоны дезинтегрированных хризотилитовых серпентинитов

(1 и 10 проб соответственно), рыхлых выщелоченных хризотил-лизардитовых серпентинитов (6 и 2 пробы соответственно) и глинистой нонtronитовой зоны (6 проб, Светлоборский массив). Петрогенные элементы определялись рентгеноспектральным силикатным методом, редкие элементы методом ICP-MS. Анализ проб выполнялся в ЦАЛ ВСЕГЕИ. Результаты анализов представлены в таблице.

Содержание петрогенных и редких элементов в коре выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов

Химические элементы	Зона дезинтегрированных хризотилловых серпентинитов			Зона рыхлых выщелоченных хризотил-лизардитовых серпентинитов				Глинистая нонtronитовая зона	
	СБМ	НТМ		СБМ		НТМ		СБМ	
		x	x	s	x	s	x	s	x
Петрогенные элементы, % по массе									
SiO ₂	36,6	36,4	1,4	38,9	0,9	41,8	0,2	43,1	2,9
TiO ₂	0,011	0,005	0,000	0,012	0,008	0,070	0,011	0,106	0,117
Al ₂ O ₃	0,16	0,17	0,14	0,29	0,16	1,46	0,13	1,99	2,04
Fe ₂ O ₃	8,15	10,75	1,10	11,32	1,57	10,95	2,06	10,26	2,52
MnO	0,14	0,21	0,02	0,19	0,03	0,18	0,04	0,20	0,07
MgO	43,7	39,0	2,7	41,6	1,2	34,4	3,0	28,8	6,4
CaO	0,25	0,19	0,25	0,45	0,35	0,11	0,02	4,20	7,32
Na ₂ O	0,02	0,02	0,001	0,02	0,000	0,09	0,02	0,13	0,15
K ₂ O	0,09	0,01	0,038	0,04	0,048	0,23	0,014	0,09	0,041
P ₂ O ₅	0,04	0,02	0,016	0,03	0,02	0,06	0,01	0,05	0,03
BaO	–	0,01	0,001	0,01	0,001	–	–	0,01	0,003
C общ	0,20	0,23	0,05	0,14	0,02	0,34	0,15	0,25	0,14
П.л.п	10,10	12,69	2,42	6,64	2,91	9,65	0,78	10,40	4,94
Сумма	99,47	99,43		99,43		99,05		99,58	
Элементы группы железа (ЭГЖ), г/т									
V	1,25	8,28	7,69	9,09	7,94	16,50	2,69	50,94	54,82
Cr	3360	8921	8398	3710	3174	3150	255	3252	1299
Ni	2070	1307	355	1317	585	2385	148	1590	1319
Co	129	141	1	162	26	186	34	197	33
Группа транзитных элементов (ТЭ), г/т									
Cu	2,03	23,29	16,81	8,32	4,42	8,96	0,51	14,78	10,54
Zn	38,5	40,1	10,02	49,4	17,1	62,4	9,05	63,56	21,87
Pb	0,50	0,80	0,43	1,04	0,76	2,42	0,50	0,50	0,00
Cs	0,05	0,05	0,00	0,05	0,00	0,61	0,03	0,08	0,07
Группа крупноионных литофилов (LIL), г/т									
Rb	1,00	1,61	1,001	0,73	0,35	9,60	0,32	1,48	0,67
Ba	3,21	1,54	2,20	7,11	7,18	38,4	9,69	26,06	36,30
Sr	1,68	2,51	6,16	3,64	2,23	7,18	1,94	42,27	43,14
Группа высокозарядных элементов (HFS), г/т									
Y	0,10	0,07	0,03	0,42	0,14	2,10	0,38	3,19	2,67
Th	0,05	0,03	0,01	0,03	0,01	0,94	0,20	0,11	0,10
U	0,05	0,03	0,01	0,06	0,06	0,24	0,06	0,24	0,30
Zr	0,87	1,35	0,90	2,27	1,44	12,71	4,23	5,70	5,11
Nb	0,25	0,09	0,08	0,15	0,10	1,16	0,28	0,38	0,24
Ta	–	0,05	0,00	0,05	0,00	–	–	0,04	0,02
Hf	0,02	0,05	0,01	0,11	0,09	0,30	0,14	0,23	0,20

Химические элементы	Зона дезинтегрированных хризотилловых серпентинитов			Зона рыхлых выщелоченных хризотил-лизардитовых серпентинитов				Глинистая нонтронитовая зона	
	СБМ	НТМ		СБМ		НТМ		СБМ	
		x	x	s	x	s	x	s	x
Группа редкоземельных элементов (РЗЭ, REE), г/т									
La	0,05	0,05	0,03	0,39	0,37	2,48	0,50	1,54	0,95
Ce	0,09	0,05	0,04	0,30	0,22	5,14	1,75	3,09	3,12
Pr	0,01	0,02	0,01	0,09	0,04	0,60	0,13	0,60	0,42
Nd	0,07	0,08	0,08	0,39	0,28	2,40	0,52	2,92	2,25
Sm	0,02	0,01	0,02	0,08	0,04	0,47	0,13	0,70	0,58
Eu	0,003	0,01	0,008	0,03	0,01	0,10	0,02	0,18	0,178
Gd	0,005	0,03	0,02	0,11	0,06	0,46	0,13	0,679	0,68
Tb	0,003	0,005	0,001	0,01	0,006	0,08	0,02	0,092	0,090
Dy	0,005	0,02	0,01	0,05	0,04	0,43	0,08	0,55	0,51
Ho	0,003	0,005	0,001	0,01	0,008	0,09	0,03	0,10	0,096
Er	0,005	0,02	0,01	0,06	0,03	0,19	0,06	0,29	0,289
Tm	0,003	0,005	0,001	0,01	0,004	0,03	0,01	0,04	0,039
Yb	0,005	0,02	0,018	0,05	0,02	0,16	0,04	0,27	0,25
Lu	0,003	0,005	0,001	0,01	0,005	0,03	0,01	0,04	0,03
Сумма	0,28	0,32		1,59		12,67		11,10	
Благородные металлы, мг/т									
Ru	0,001	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001
Rh	0,004	0,004	0,0003	0,005	0,002	0,005	0,0004	0,004	0,004
Pd	0,001	0,0114	0,0217	0,0268	0,0328	0,0655	0,0205	0,0162	0,0162
Ir	0,001	0,006	0,007	0,011	0,003	0,010	0,0001	0,006	0,0057
Pt	0,004	0,053	0,0933	0,341	0,5549	0,044	0,0240	0,108	0,1083
Au	0,001	0,004	0,0013	0,070	0,1617	0,003	0,0009	0,003	0,003
Ag	0,005	0,011	0,008	0,005	0,000	0,009	0,006	0,005	0,005

Примечание. СБМ – Светлоборский массив, НТМ – Нижнетагильский массив; x – среднее; s – стандартное отклонение от среднего, Fe₂O₃ – общее.

Из таблицы следует, что характер распределения петрогенных элементов в коре выветривания Нижнетагильского и Светлоборского массивов демонстрирует общие закономерности процессов, происходящих при выветривании: к верхним частям профиля выветривания интенсивно выносятся магний, в незначительной степени накапливаются железо и алюминий.

Распределение редких элементов носит более дифференцированный характер. Для пород коры выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов были построены графики нормированных к мантийному перидотиту концентраций редких элементов (рис.3, 4) и подсчитаны их коэффициенты накопления K_n относительно мантийного перидотита, дунитов Платиноносного пояса Урала. Также было проведено сравнение с мощными мезозойскими корами выветривания, развитыми по другим ультрамафитовым массивам Урала (Уфалейский, Буруктальский, Еловский офиолитовые комплексы, Сахаринский зональный массив и т.д.).

На рис.3 видно, что характер распределения редких элементов в корях выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов весьма неустойчив в зоне хризотил-лизардитовых серпентинитов, в то время как лизардитовые серпентиниты характеризуются более спокойным трендом распределения. В Нижнетагильском массиве наблюдается увеличение содержания редких элементов в верхних зонах коры выветривания, что подтвер-

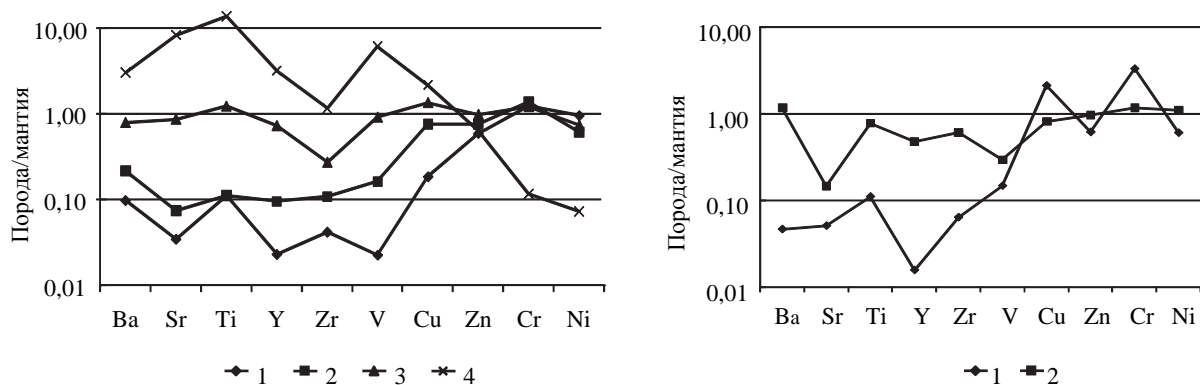


Рис.3. Распределение редких элементов в породах коры выветривания Светлоборского (слева) и Нижнетагильского (справа) массивов, нормированное к мантийному гарцбургиту [23]

1 – хризотилитовые серпентиниты с реликтами серпентинизированных дунитов и карбонатными прожилками; 2 – трещиноватые, плитчатые хризотил-лизардитовые серпентиниты, рыхлые в верхней части разреза; 3 – неравномерно обохрененные нонтронитовые глины; 4 – горнблендиты Светлоборского массива [3]

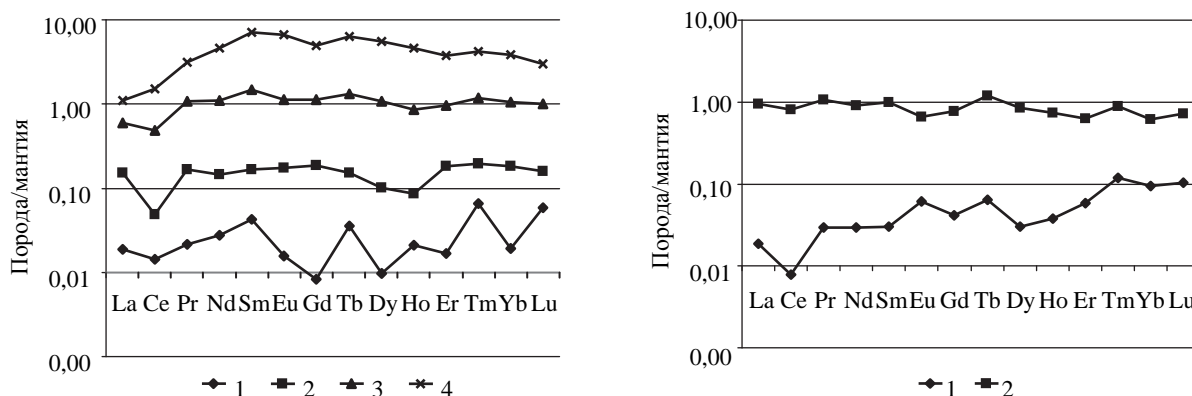


Рис.4. Распределение РЗЭ в горных породах кор выветривания Светлоборского (слева) и Нижнетагильского (справа) массивов, нормированное к мантийному гарцбургиту [23]. Усл. обозн. см. на рис.3

ждается и их коэффициентами накопления: хром, марганец и кобальт накапливаются во всех зонах массивов ($K_n = 1,3 \div 3,0$), медь, свинец ($K_n = 1,9 \div 10,8$) и цезий, рубидий интенсивно накапливаются в верхних частях профиля (K_n до 14,3). Стоит отметить также высокий уровень редких элементов и их K_n в породах Светлоборского массива из зон контакта дунитов с дайковыми образованиями (горнблендитового, иситового и других составов), а также в самих горнблендитах [3]. При нормировании к дуниту Платиноносного пояса Урала [13] дунита Нижнетагильского массива [10, 21] основные особенности распределения редких элементов сохраняются.

Из таблицы видно, что преобладающую роль в профиле выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов играют легкие редкие земли. Содержания РЗЭ в зоне хризотилитовых серпентинитов крайне неравномерны и, как следует из рис.4, почти на 2 порядка меньше мантийных, в то время как хризотил-лизардитовые серпентиниты характеризуются более спокойным трендом распределения РЗЭ. Все РЗЭ демонстрируют характер распределения, близкий мантийному. Наблюдается отчетливое увеличение содержаний РЗЭ вверх по профилю выветривания, что подтверждается и коэффициентами накопления: РЗЭ накапливаются в нонтронитовой зоне Светлоборского массива ($K_n = 1,05 \div 1,5$), истощаясь в серпентинитах ($K_n = 0,05 \div 0,1$), особенно в карбонатизированных хризотил-лизардитовых разностях ($K_n = 0,01 \div 0,07$). Редкоземельные элементы Нижнетагильского массива также

характеризуются пониженными концентрациями в зоне хризотилловых серпентинитов ($K_n = 0,01 \div 0,12$) и повышаются к верхним частям разреза ($K_n = 0,7 \div 1,2$). При этом значения K_n РЗЭ сопоставимы с аналогичными зонами Буруктальского ($K_n = 0,08 \div 1,01$) и Еловского ($K_n = 0,2 \div 1,6$) силикатных никелевых месторождений Урала [20]. Цериевая аномалия проявлена незначительно в хризотилловых серпентинитах ($K_n = 0,008$).

В породах профиля выветривания Светлоборского массива относительно Нижнетагильского наблюдается повышенный уровень РЗЭ. Возможно, это связано с широким развитием дайкового комплекса в породах Светлоборского массива. Горнбендитовые, иситовые и пироксенитовые дайки, пронизывающие дуниты Светлоборского массива по тектонически ослабленным зонам, в коре выветривания претерпевают изменения и превращаются в вермикулит-хлорит-нонтронитовые породы. Вероятно, жильные породы изначально содержат более высокие концентрации редкоземельных элементов, чем дуниты (рис.4), и при разложении они дополнительно обогащают глины коры выветривания Светлоборского массива лантаноидами. Как наиболее инертные компоненты РЗЭ накапливаются в процессах выщелачивания и гидратации ультрабазитов, причем, по мнению А.В.Дубинина, более 99 % остается во вторичных минералах [4]. Многочисленные литературные данные указывают на то, что в окислительных условиях под воздействием метеорных вод РЗЭ могут переходить в водные комплексы [1, 2, 4, 23] и в дальнейшем образовывать собственные гипергенные минералы [16], либо сорбироваться марганцевыми и глинистыми минералами коры выветривания, которые, как известно, обладают значительной сорбционной способностью, связанной в основном с большой площадью поверхности минеральных частиц.

Элементы платиновой группы, золото и серебро в Светлоборском и Нижнетагильском массивах. Как видно из таблицы, коры выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов характеризуются низкими содержаниями элементов группы платины, золота, серебра, интенсивным выносом их из нижних зон профиля выветривания (относительно углистого хондрита С1 $K_n = 0,001 \div 0,049$ для пород Нижнетагильского массива и $K_n = 0,001 \div 0,259$ для Светлоборского) и частичным накоплением в верхних. Рудная специализация в коре выветривания обоих массивов (палладий-платиновая с повышенными концентрациями Au и Ag) отличается от коренной преимущественно иридий-платиновой минерализации в дунитах Нижнетагильского массива [7, 12, 15]. Отношение Pt/Pd > 1 практически во всех зонах профиля выветривания обоих массивов, за исключением зоны выщелачивания, где в лизардитовых обохренных серпентинитах оно падает до 0,67.

В серпентинитовых рудах мощных мезозойских кор выветривания, развитых по ультрамафитам Урала (Уфалейский, Буруктальский, Еловский офиолитовые комплексы, Сахаринский зональный массив и т.д.), обычно соотношение Pt/Pd < 1, т.е. в них, за некоторым исключением, преобладает палладий. В окисдно-железных рудах Уфалейского, Рокгемптонского (Австралия), Гринвейлского (Австралия) массивов величина Pt/Pd > 1, в рудах Буруктальского и Еловского месторождений Pt/Pd < 1, а в месторождении Никаро (Куба) вообще падает до 0,15 [16]. Таким образом, по сравнению с мощными корами выветривания, развитыми по ультрамафитам Урала, Австралии, Кубы, процессы геохимической миграции элементов в профиле выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов, с их сокращенной мощностью, неполным профилем, проходили не в полной мере.

Выводы. В заключение подведем некоторые итоги, касающиеся уровня концентраций элементов-примесей, РЗЭ и благородных металлов в породах кор выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов.

1. Кора выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов сложена дезинтегрированными хризотилловыми и рыхлыми выщелоченными хризотил-лизардитовыми серпентинитами. Помимо серпентинитовой зоны в Светлоборском массиве наблюдается глинистая нонтронитовая зона, сложенная смесью серпентиновых и глинистых минералов.

Реликты этой зоны сохранились только в карманах коры выветривания вдоль тектонических нарушений. Оксидно-железная зона выветривания на массивах не сохранилась.

2. Коры выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов характеризуются выносом большинства элементов-примесей и РЗЭ из серпентинитовой зоны, их дальнейшим накоплением в верхней (глинистой) части разреза и мантийным характером распределения, наследуемым от пород субстрата.

3. Высокий уровень содержаний элементов-примесей и их коэффициенты накопления в породах Светлоборского массива из зон контакта дунитов с дайковыми комплексами, а также мантийный характер распределения позволяют предполагать, что в ходе наложенных процессов внедрения даек разного состава некогерентные (высокозарядные, крупноионные литофильные и щелочные) элементы подвергались перераспределению и накоплению к верхним частям профиля. Основным механизмом их накопления связан с высокими сорбционными свойствами глинистых минералов.

4. Коры выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов характеризуются низкими содержаниями элементов группы платины, золота, серебра. Геохимическая специализация их определяется палладием и платиной, тогда как в дунит-клинопироксенитовом субстрате первичных зональных массивов главными платиноидами являются иридий и платина, что свидетельствует о перераспределении благородных металлов в профиле выветривания и может быть использовано в поисково-геохимических целях.

5. Отношение $Pt/Pd > 1$ практически во всех зонах профиля выветривания обоих массивов, за исключением зоны ожелезненных хризотил-лизардитовых серпентинитов, где оно падает до 0,67. Этим коры выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов отличаются от мощных кор выветривания по офиолитовым массивам Урала, Австралии, Кубы, где это соотношение обычно ниже единицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 268 с.
2. Бугельский Ю.Ю. Эзогенные рудообразующие системы кор выветривания / Ю.Ю.Бугельский, И.В.Витовская, А.П.Никитина. М.: Наука, 1990. 365 с.
3. Готтман И.А. Геологические данные о магматической природе горнблендитов в габбро-ультрамафитовых комплексах Урало-Аляскинского типа / И.А.Готтман, Е.В.Пушкарев // Литосфера. 2009. № 2. С.78-86.
4. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука. 2006. 360 с.
5. Ефимов А.А. Итоги столетнего изучения Платиноносного пояса Урала // Литосфера. 2010. № 5. С.134-153.
6. Крупно-объемные рудные месторождения платины в зональных базит-ультрабазитовых комплексах урало-аляскинского типа и перспективы их освоения / А.П.Козлов, В.А.Чантурия, Е.Г.Сидоров, Н.Д.Толстых, Ю.М.Телегин // Геология рудных месторождений. 2011. Т.53. № 5. С.419-437.
7. Лазаренков В.Г. Геохимия элементов платиновой группы / В.Г.Лазаренков, И.В.Таловина. СПб: Галарт, 2001. 266 с.
8. Лазаренков В.Г. Никелевые коры выветривания как потенциальный промышленный источник металлов платиновой группы / В.Г.Лазаренков, В.Ю.Абрамов, И.В.Таловина // Платина России. М.: Геоинформмарк, 1995. Т.2. Кн.1. С.121-125.
9. Лазаренков В.Г. Платиноиды, золото и серебро в гипергенных никелевых месторождениях / В.Г.Лазаренков, И.В.Таловина, Н.И.Воронцова // Платина России / ГПКК «КНИИГиМС». Красноярск, 2011. Т.7. С.379-394.
10. Ланда Э.А. Геохимические особенности Нижне-Тагильского зонального массива и вопросы его генезиса / Э.А.Ланда, В.Г.Лазаренков // Записки ВМО. Ч.127. № 4. 1990. С.38-50.
11. Малахов И.А. Нижнетагильский дунит-клинопироксенитовый массив и его вмещающие породы / И.А.Малахов, Л.В.Малахова // Труды Института геологии и геохимии УФАН СССР. Свердловск: Уральский рабочий, 1970. 157 с.
12. Малич К.Н. Платиноиды клинопироксенит-дунитовых массивов Восточной Сибири / ВСЕГЕИ. СПб, 1999. 296 с.
13. Новые данные по геохимии Платиноносного пояса Урала: вклад в понимание петрогенезиса / Г.Б.Ферштатер, Ф.Беа, Е.В.Пушкарев, Дж.Гарути, П.Монтеро, Ф.Заккарини // Геохимия. 1999. № 4. С.352-370.
14. Платиновые металлы в гипергенных никелевых месторождениях и перспективы их промышленного извлечения / В.Г.Лазаренков, И.В.Таловина, И.Н.Белоглазов, В.И.Володин. СПб: Недра, 2006. 188 с.
15. Структурно-вещественная эволюция комплексов Платиноносного пояса Урала при формировании хромит-платиновых месторождений уральского типа. Ч.1 / Ю.А.Волченко, К.С.Иванов, В.А.Коротеев, Т.Оже // Литосфера. 2007. № 4. С.73-101.

16. *Таловина И.В.* Геохимия уральских оксидно-силикатных никелевых месторождений / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2012. 270 с.
17. *Телегин Ю.М.* Геологические особенности рудопроявлений платины Светлоборского и Каменушинского массивов Платиноносного пояса Урала / Ю.М.Телегин, Т.В.Телегина, Н.Д.Толстых // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2009. Т.2. С.212-215.
18. *Толстых Н.Д.* Коренная платиновая минерализация Светлоборского и Нижнетагильского массивов, Платиноносный пояс Урала / Н.Д.Толстых, А.П.Козлов, Ю.М.Телегин // Платина России / ГПКК «КНИИГиМС». Красноярск, 2012. С.297-312.
19. *Толстых Н.Д.* Коренная платина Светлоборского и Каменушинского массивов платиноносного пояса Урала / Н.Д.Толстых, Ю.М.Телегин, А.П.Козлов // Геология и геофизика. 2011. Т.52. № 6. С.775-793.
20. Характер распределения редкоземельных элементов в рудах Еловского и Буруктальского гипергенных никелевых месторождений / И.В.Таловина, Н.И.Воронцова, С.О.Рыжкова, О.П.Мезенцева, А.Г.Пилюгин // Записки Горного института. 2012. Т.196. С.31-35.
21. *Шмелев В.Р.* Нижнетагильский дунит-клинопироксенитовый массив и его платиновые месторождения / В.Р.Шмелев, Е.В.Пушкарев, Е.В.Аникина // Путеводитель геологических экскурсий к XI Всероссийскому петрографическому совещанию. Екатеринбург: Изд-во Института геологии и геохимии УрО РАН, 2010. С.38-58.
22. *Lipin B.R.* Geochemistry and mineralogy of Rare Earth elements / B.R.Lipin, G.A.McKay // Reviews in mineralogy. Mineralogical society of America. 1989. Vol.21. 348 p.
23. *McDonough W.F.* Constrains of the composition of continental lithospheric mantle // EPSL. 1990. Vol.101. N 1. P.1-18.

REFERENCES

1. *Balashov Ju.A.* Geohimija redkozemel'nyh elementov (*Geochemistry of Rare Earth elements*). Moscow: Nauka, 1976, p.265.
2. *Bugelskiy Ju.Ju., Vitovskaya I.V., Nikitina A.P.* et al. Ekzogennye rudoobrazujushhie sistemy kor vyvetrivanija (*Exogenic ore-forming systems of weathering crusts*). Moscow: Nauka, 1990, p.365.
3. *Gottman I.A., Pushkarev E.V.* Geologicheskie dannye o magmaticheskoi prirode gornblenditov v gabbro-ul'tramafitovyh kompleksah Uralo-Alyaskinskogo tipa (*Geological data on the magma nature of hornblendites in gabbro-ultramafic complexes of the Ural-Alaskan type*). Litosfera. 2009. N 2, p.78-86.
4. *Dubin A.V.* Geohimija redkozemel'nyh elementov v okeane (*Geochemistry of Rare Earth elements in the ocean*). Moscow: Nauka, 2006, p.360.
5. *Efimov A.A.* Itogi stoletnego izuchenija Platinonosnogo pojasa Urala (*Results of centennial studying of the Ural Platinum Belt*). Litosfera. 2010. N 5, p.134-153.
6. *Kozlov A.P., Chanturiya V.A., Sidorov E.G.* et al. Krupno-ob'emnye rudnye mestorozhdeniya platiny v zonal'nyh bazit-ul'trabazitovyh kompleksah uralo-alyaskinskogo tipa i perspektivy ih osvoeniya (*Platinum ore deposits of a large volume in zonal basic-ultrabasic complexes of the Ural-Alaskan type and prospects for their development*). Geologiya rudnyh mestorozhdenii. 2011. Vol.53. N 5, p.419-437.
7. *Lazarenkov V.G., Talovina I.V.* Geohimija elementov platinovoj grupy (*Geochemistry of Platinum Group Elements*). St Petersburg: Galart, 2001, p.266.
8. *Lazarenkov V.G., Abramov V.Yu., Talovina I.V.* Nikelevye kory vyvetrivanija kak potencial'nyj promyshlennyj istochnik metallov platinovoj grupy (*Nickel-bearing weathering crusts as a potential commercial source of platinum group metals*). Platina Rossii. Moscow: Geoinformmark, 1995. Vol.2. Book 1, p.121-125.
9. *Lazarenkov V.G., Talovina I.V., Vorontsova N.I.* Platinoidy, zoloto i srebro v gipergennyh nikelevykh mestorozhdenijah (*Platinum group elements (PGE), gold (Au) and silver (Ag) in supergene nickel deposits*). Platina Rossii. GPKK «КНИИГиМС». Krasnoyarsk, 2011. Vol.7, p.379-394.
10. *Landa E.A., Lazarenkov V.G.* Geohimicheskie osobennosti Nizhne-Tagil'skogo zonal'nogo massiva i voprosy ego genezisa (*Geochemical features of the Nizhny Tagil zonal massif and issues of its genesis*). Zapiski VMO. 1990. Vol.127. N 4, p.38-50.
11. *Malakhov I.A., Malakhova L.V.* Nizhnetagil'skij dunit-klinopiroksenitovyj massiv i ego vmeshhajushhie porody (*The Nizhny Tagil dunit-clinopyroxenite massif and its host rocks*). Trudy Instituta geologii i geohimii UFAN SSSR. Sverdlovsk: Ural'skii rabochii. 1970, p.157.
12. *Malitch K.N.* Platinoidy klinopiroksenit-dunitovyh massivov Vostochnoi Sibiri (*Platinoids of clinopyroxene-dunit massifs of East Siberia*). VSEGEI. St Petersburg, 1999, p.296.
13. *Fershtater G.B., Bea F., Pushkarev E.V.* et al. Novye dannye po geohimii Platinonosnogo pojasa Urala: vklad v ponimanie petrogenezisa (*New data on geochemistry of the Ural Platinum Belt: a contribution to the understanding of petrogenesis*). Geohimiya. 1999. N 4, p.352-370.
14. *Lazarenkov V.G., Talovina I.V., Beloglazov I.N., Volodin V.I.* Platinovye metally v gipergennyh nikelevykh mestorozhdenijah i perspektivy ih promyshlennogo izvlechenija (*Platinum metals in supergene nickel deposits and prospects for their commercial extraction*). St Petersburg: Nedra, 2006, p.188.
15. *Volchenko Y.A., Ivanov K.S., Koroteev V.A.* et al. Strukturno-veshhestvennaja evoljuciya kompleksov Platinonosnogo pojasa Urala pri formirovanii hromit-platinovykh mestorozhdenii ural'skogo tipa (*Structural-compositional*

evolution of the Ural Platinum Belt complexes during the formation of platinum-chromite deposits of the Ural type). Part 1. Litosfera. 2007. N 4, p.73-101.

16. Talovina I.V. Geohimija ural'skih oksidno-silikatnyh nikel'nykh mestorozhdenij (*Geochemistry of the Uralian oxide-silicate nickel deposits*). Natsional'nyi mineral'no-syr'evoi universitet «Gornyi». St Petersburg, 2012, p.270.

17. Telegin Y.M., Telegina T.V., Tolstykh N.D. Geologicheskie osobennosti rudoprojavenii platiny Svetloborskogo i Kamenushinskogo massivov Platinonosnogo pojasa Urala (*Geologic features of platinum occurrences of the Svetloborsky and Kamenushinsky massifs of the Ural Platinum Belt*). Ekaterinburg: Izd-vo IGIg UrO RAN, 2009. Vol.2, p.212-215.

18. Tolstykh N.D., Kozlov A.P., Telegin Y.M. Korennaya platinovaya mineralizaciya Svetloborskogo i Nizhnetagil'skogo massivov, Platinonosnyi pojas Urala (*Bedrock platinum mineralization of the Svetloborsky and Nizhny Tagil massifs of the Ural Platinum Belt*). Platina Rossii. GPKK «KNIIGiMS». Krasnoyarsk, 2012, p.297-312.

19. Tolstykh N.D., Telegin Y.M., Kozlov A.P. Korennaya platina Svetloborskogo i Kamenushinskogo massivov platinonosnogo pojasa Urala (*Bedrock platinum mineralization of the Svetloborsky and Kamenushinsky massifs of the Ural Platinum Belt*). Geologiya i geofizika. 2011. Vol.52, N 6, p.775-793.

20. Talovina I.V., Vorontsova N.I., Ryzhkova S.O., Mezentseva O.P., Pilugin A.G. Karakter raspredelenija redkozemel'nykh jelementov v rudah Elovskogo i Buruktal'skogo gipergennykh nikel'nykh mestorozhdenij (*Pattern of rare earth element distribution in ores of the Elov and Buruktal supergene nickel deposits*). Zapiski Gornogo instituta. 2012. Vol.196, p.31-35.

21. Shmeliov V.R., Pushkarev E.V., Anikina E.V. Nizhnetagil'skii dunit-klinopiroksenitovyj massiv i ego platinovye mestorozhdeniya (*The Nizhny Tagil dunite-clinopyroxenite massif and its platinum deposits*). Putevoditel' geologicheskikh ekskursii k XI Vserossiiskomu petrograficheskomu soveshchaniyu. Ekaterinburg: Izd-vo IGIg UrO RAN, 2010, p.38-58.

22. Lipin B.R., McKay G.A. Geochemistry and mineralogy of Rare Earth elements. Reviews in mineralogy. Mineralogical society of America. 1989. Vol.21, p.348.

23. McDonough W.F. Constrains of the composition of continental lithospheric mantle. EPSL. 1990. Vol.101. N 1, p.1-18.

GEOLOGY, MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF WEATHERING CRUST OF THE SVETLOBORSKY AND NIZHNETAGILSKY MASSIFS, THE MIDDLE URALS

A.M.DURYAGINA, Postgraduate student, gayfutdinovaam@yandex.ru

N.I.VORONTSOVA, PhD in Geological and Mineral Sciences, Assistant Professor, natvoron@yandex.ru

E.S.NIKOLAEVA, Postgraduate student, legenda.92@mail.ru

National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article encompasses the analysis of the mineral composition and geochemistry of weathering crusts of the Svetloborsky and Nizhnetagilsky massifs of the Ural Platinum Belt. Weathering crusts are represented by a partial profile and composed of disintegrated lizardite-chrysotile and loose leached lizardite serpentinite, which are overlapped by clays of nontronite zone at the Svetloborsky massif. The supergene process reveals accumulation of trace elements and rare earth elements (REE) upwards within the weathering profile. Rocks of the Svetloborsky massif contacting with dike complexes show high levels of REE content and their accumulation coefficients. In weathering profile of the Svetloborsky and Nizhnetagilsky massifs, the average content of precious metals is low; palladium and platinum prevail, in contrast to primary substrate rocks, where the main platinum group metals are platinum and iridium.

Key words: the Svetloborsky massif, the Nizhnetagilsky massif, the Platinum Belt of the Urals, weathering crust, rare earth elements, platinum group elements, gold, silver.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАТИНОНОСНЫХ ДУНИТОВ СВЕТЛОБОРСКОГО И НИЖНЕТАГИЛЬСКОГО МАССИВОВ ПЛАТИНОНОСНОГО ПОЯСА УРАЛА

А.Г.ПИЛЮГИН, канд. геол.-минерал. наук, геолог, *andrew_pilugin@mail.ru*

ОАО «Артель старателей «Амур», Хабаровск, Россия

И.В.ТАЛОВИНА, д-р геол.-минерал. наук, профессор, *i.talovina@gmail.com*

А.М.ДУРЯГИНА, аспирантка, *gayfutdinovaam@yandex.ru*

В.С.НИКИФОРОВА, аспирантка, *nikiforova.victoria@gmail.com*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Приводятся новые данные по геохимии дунитов, слагающих Светлоборский и Нижнетагильский ультраосновные массивы Платиноносного пояса Урала. На основе их интерпретации обсуждены особенности петрогенезиса обоих массивов. Установлено, что массивы являются петрохимическими аналогами пород зональных массивов и альпино-типных комплексов, но имеют при этом свои особенности. Так, Светлоборский массив больше обогащен элементами-примесями по сравнению с Нижнетагильским, что, скорее всего, связано с их перераспределением в ходе наложенных процессов вследствие внедрения даек основного состава.

Ключевые слова: зонально-концентрические массивы, геохимия, дуниты, Светлоборский массив, Нижнетагильский массив, Платиноносный пояс Урала.

Введение. Светлоборский и Нижнетагильский концентрически-зональные клинопироксенит-дунитовые массивы Платиноносного пояса Урала являются источниками крупнейших в мире россыпных месторождений платины, отрабатывающихся здесь с 1824 г. По разным оценкам, за это время россыпи дали не менее 390 т платины. Традиционно считается, что коренными источниками россыпных месторождений явились разрозненные платиноносные хромитовые сегрегации в дунитах. На Нижнетагильском массиве известно лишь несколько мелких месторождений, где платина добывалась непосредственно из дунитов, а основная масса рудных месторождений и проявлений ассоциирует с хромититами. Тем не менее, несмотря на богатство руд, до недавнего времени эти массивы считались малоперспективными на коренное платиновое оруденение. Открытие потенциально промышленно значимых рудных зон в дунитах Светлоборского массива [11], наряду с открытием рудных зон в дунитах массива Гальмознан в Корякии, в свете разрабатываемых технологий переработки нетрадиционного платиносодержащего сырья [4] обуславливает актуальность исследований состава, типов и особенностей распределения платиновой минерализации в породах Светлоборского и Нижнетагильского массивов, перспективных на обнаружение коренных крупнообъемных месторождений платины. В связи с этим изучение химических особенностей пород массивов, в частности распределение элементов-примесей в дунитах, представляет повышенный интерес.

Геологическое строение обоих массивов подробно приведено в монографиях Н.К.Высоцкого, А.Н.Заварицкого, О.К.Иванова, К.К.Золоева и др., поэтому остановимся лишь на отличительных чертах массивов, приводимых во многих работах, в частности Ю.М.Телегиным, Н.Д.Толстых и др. [11-13].

Геологическое строение массивов. Светлоборский клинопироксенит-дунитовый массив относится к Качканарскому интрузивному комплексу и входит в цепочку концентрически-зональных массивов Платиноносного пояса Урала. Имеет позднеордовикский

возраст и залегает среди зеленых сланцев выйской свиты среднего-верхнего ордовика [3]. Форма массива линзовидная, вытянутая в субмеридиональном направлении, согласная с северо-западным простираем вмещающих пород. Массив состоит из дунитового ядра и клинопироксенитовой оболочки. Центральную часть дунитового ядра слагают средне- и мелкозернистые дуниты. Мелкозернистые разности образуют несколько крупных полей в северной и южной половинах массива, среднезернистые – небольшие зоны на территории этих полей, а крупнозернистые разновидности имеют довольно ограниченное распространение. Хромитовые сегрегации в Светлоборском массиве встречаются редко: среди северного и южного поля средне- и мелкозернистых дунитов отмечаются две зоны развития жильных хромититов. Периферическая часть ядра сложена тонкозернистыми дунитами, прорванными дайками клинопироксенитов, магнетитовых клинопироксенитов, хромдиопсидитов, флогопит-хромдиопсидовых пород, горнблендитов, горнблендит-пегматитов, апатитовых горнблендитов и иситов. Клинопироксенитовая оболочка прослежена почти по всей периферии массива. Платинометалльное оруденение Светлоборского массива представлено двумя продуктивными минеральными ассоциациями: хромит-платиновой, приуроченной к эпигенетическим хромититовым жилам центральной части дунитового ядра, – нижнетагильский тип, и платиноносных дунитов, приуроченной к тонкозернистым дунитам краевой части ядра, прорванных серией субпараллельных даек клинопироксенитов, горнблендитов и иситов [11].

Нижнетагильский клинопироксенит-дунитовый массив урало-аляскинского типа имеет вытянутую в меридиональном направлении грушевидную форму, позднеордовикский возраст и приурочен к Тагильскому интрузивному комплексу. Массив относится к зональным интрузивным комплексам Платиноносного пояса Урала. Зональное строение характеризуется наличием дунитового ядра и клинопироксенитовой оболочки. Для дунитового ядра также характерна зональность: тонкозернистые дуниты периферии сменяются мелко-, средне- и крупнозернистыми в центральной части. Нижнетагильский концентрически-зональный массив послужил источником одного из крупнейших в мире Нижнетагильского россыпного района. Платиновая минерализация Нижнетагильского массива представлена также двумя рудно-формационными типами: «дунитовым», где платина образует промышленно значимые скопления непосредственно в дунитах (Авроринское месторождение), и «хромитовым», или нижнетагильским, в котором она локализована в хромититовых жилах, прожилках и шлирах (Госшахта, месторождения Александровского лога и др.).

Фактический материал и методы исследования. В ходе исследования анализировались серпентинизированные дуниты преимущественно в лаборатории ИГМ СО РАН г.Новосибирска. Петрогенные элементы определялись рентгеноспектральным силикатным анализом, микроэлементы – методом ICP-MS, элементы платиновой группы (ЭПГ) и золото установлены в ООО «Стюарт Геокемикл энд Эссей» пробирным анализом с последующим определением методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой.

Результаты исследования. Содержания порообразующих оксидов и элементов-примесей в дунитах Светлоборского и Нижнетагильского массивов приведены в табл.1. Группировка химических элементов проведена в соответствии с классификацией Х.Роллинсона [17]. Рассмотрены петрогенные элементы и элементы-примеси, среди которых выделяются элементы группы железа (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni), транзитные (Cu, Zn, Pb, Mo, Ga, W, Sn, Be, As, Sb), крупноионные литофильные (Sr, Ba, Rb, Cs), высокозарядные (Sc, Y, Zr, Ti, Th, U, Hf, Nb) и редкоземельные (легкие – La-Nd, средние – Sm-Ho, тяжелые – Er-Lu) элементы.

Таблица 1

Содержание породообразующих оксидов и элементов-примесей в дунитах Светлоборского массива

Химические элементы	Рудопроявление Высоцкого						Коробовский лог	Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	
<i>Петрогенные элементы, % по массе</i>								
SiO ₂	38,64	37,8	39,05	47,93	39,63	42,41	39,04	40,64
TiO ₂	< 0,01	< 0,01	0,02	0,31	0,14	0,14	< 0,01	0,09
Al ₂ O ₃	0,21	0,19	0,56	3,33	3,00	4,92	0,21	1,77
Fe ₂ O ₃	11,18	11,93	12,19	6,96	10,68	8,47	10,37	10,25
MnO	0,2	0,21	0,2	0,14	0,20	0,16	0,19	0,18
MgO	41,09	41,8	42,35	19,19	36,78	28,78	39,32	35,62
CaO	0,75	0,25	1,02	19,07	1,32	1,11	0,33	3,41
Na ₂ O	< 0,04	< 0,04	< 0,04	0,38	0,24	0,06	< 0,04	0,12
K ₂ O	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,15	0,07	0,03	< 0,01	0,04
P ₂ O ₅	0,01	0,02	0,01	0,02	0,09	0,02	0,02	0,03
BaO	0,005	0,005	0,004	0,009	–	0,005	0,007	0,006
CO ₂	–	–	–	–	0,51	–	–	–
H ₂ O±	–	–	–	–	7,11	–	–	–
П.п.п.	7,59	7,34	4,1	2,11	7,09	13,68	9,89	7,4
Сумма	99,63	99,51	99,5	99,6	99,77	99,78	99,35	
<i>Элементы-примеси, г/т</i>								
Элементы группы железа (ЭГЖ)								
V	7,02	5,13	24,90	146,20	55,41	76,25	4,70	45,66
Cr	1096,01	1022,65	7386,24	2962,42	3294,98	4454,99	2867,20	3297,78
Ni	950,00	999,49	923,08	249,65	835,29	728,13	1059,87	820,78
Группа транзитных элементов (ТЭ)								
Cu	9,12	10,37	12,22	12,83	30,24	9,10	12,48	12,77
Zn	35,01	48,25	57,93	33,06	89,80	73,61	40,88	54,08
Группа крупноионных литофилов (LIL)								
Rb	0,33	0,26	1,03	1,74	2,69	1,46	0,73	1,18
Sr	4,94	2,47	7,22	101,15	93,37	21,22	1,17	33,08
Cs	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,23	< 0,1	< 0,1	0,08
Ba	2,49	3,73	4,49	9,04	5,68	8,31	4,62	5,48
Группа высокозарядных элементов (HFS)								
Y	0,43	0,33	0,37	7,87	4,00	3,40	0,37	2,39
Zr	2,64	2,13	4,87	8,80	7,58	13,53	2,05	5,94
Nb	< 0,1	0,10	0,22	0,21	0,47	0,84	< 0,1	0,28
Th	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,23	0,25	< 0,05	0,09
U	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,08	0,05	< 0,05	0,04
Hf	0,15	0,17	0,23	0,50	0,25	0,45	< 0,1	0,26
Ta	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,02	< 0,1	< 0,1	0,05
Группа редкоземельных элементов (РЗЭ, REE)								
La	0,12	0,18	0,30	1,63	3,03	1,77	1,12	1,17
Ce	0,12	0,13	0,70	5,57	7,20	4,69	0,34	2,68
Pr	0,08	0,06	0,11	1,15	0,98	0,71	0,17	0,47
Nd	0,19	0,16	0,30	6,57	4,23	2,99	0,87	2,19
Sm	0,07	0,03	0,09	1,69	0,95	0,69	0,13	0,52
Eu	0,02	0,03	0,05	0,49	0,30	0,12	0,02	0,15
Gd	0,16	0,08	0,12	1,89	0,98	0,57	0,20	0,57
Tb	0,01	< 0,02	0,02	0,24	0,15	0,08	0,01	0,07
Dy	0,08	0,04	0,11	1,41	0,77	0,61	< 0,02	0,43
Ho	< 0,02	< 0,02	0,02	0,26	0,15	0,11	0,02	0,08
Er	0,07	0,09	0,07	0,79	0,41	0,30	0,06	0,26
Tm	< 0,02	< 0,02	0,01	0,11	0,06	0,05	0,01	0,04
Yb	0,07	< 0,02	0,07	0,71	0,37	0,30	0,05	0,23
Lu	< 0,02	< 0,02	0,01	0,10	0,06	0,05	0,02	0,03

Примечание. 1-7 – номера проб; Fe₂O₃ – общее; «–» – анализы не выполнялись.

Говоря об общих особенностях обоих массивов, необходимо отметить их практическую идентичность по содержанию петрогенных элементов. В частности, дуниты обоих массивов относятся к «магнезиальному типу» ультраосновных пород, выделенных О.М.Глазуновым, и характеризуются максимально высокой магнезиальностью (для Нижнетагильского массива $Mg\# = 100 \text{ MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO}) = 83,8$, для Светлоборского 77,4), минимальным содержанием титана и очень высоким отношением хром/титан. Исключение составляют две пробы Светлоборского массива с наиболее высокой концентрацией Al_2O_3 (пробы 4, 6). Характерно, что породы Светлоборского массива в целом являются более железистыми по сравнению с нижнетагильскими. Существенное возрастание не только алюминия, но и щелочной и летучей фазы в составе дунитов Светлоборского массива, по-видимому, обусловлено процессами амфиболитизации и флогопитизации, широко проявленными здесь, как указывал еще К.К.Золотов [9]. В свою очередь, серпентинизация в Нижнетагильском массиве проявлена в большей степени (13,1 % потерь при прокаливании в дунитах Нижнетагильского массива и 7,4 % – в светлоборских), что отмечалось и О.К.Ивановым [3]. Описанные особенности отличают и дуниты концентрически-зональных массивов в целом, как указывали Э.А.Ланда и В.Г.Лазаренков [5]. Ими также были сделаны выводы о том, что изучаемые массивы являются петрохимическими аналогами соответствующих пород как альпинотипных комплексов, так и зональных массивов, образующихся в других тектонических условиях и относящихся к иным формационным типам: платформенному Кондерскому массиву, в периферической зоне которого наряду с нормальными габброидами присутствуют щелочные породы, и Инаглинскому массиву, периферия которого сложена частично калиевыми щелочными породами.

Сравнение в распределении микроэлементов в дунитах Светлоборского и Нижнетагильского массивов позволяет выявить, что при относительно схожем характере поведения элементов-примесей в обоих массивах концентрации их отличны друг от друга. Так, дуниты обоих массивов обеднены относительно примитивной мантии литофильными элементами, V, Cu; содержания Ni, транзитных элементов близки к мантийным значениям (рис.1). На диаграмме видны и некоторые различия: относительная обогащенность нижнетагильских дунитов медью и хромом. Дуниты Нижнетагильского массива характеризуются повышенными концентрациями элементов группы железа и транзитных элементов относительно светлоборских. Причем суммарные концентрации ЭГЖ в дунитах Нижнетагильского массива в 3 раза превосходят содержания таковых в Светлоборском массиве. Среди элементов группы железа, относимых к разряду совместимых, только содержания хрома на Светлоборском массиве близки исходным, на Нижнетагильском же значительно превосходят мантийные концентрации. Особенности распределения хрома в породах Нижнетагильского и других зональных массивов Урала обсуждались И.А.Малаховым и Л.В.Малаховой [6]. Наши данные подтверждают сделанные в работе [15] выводы о некоторой обогащенности хромом дунитов Нижнетагильского массива по сравнению со светлоборскими, а также, как показывали Э.А.Ланда и В.Г.Лазаренков [5], с дунитами альпинотипных комплексов.

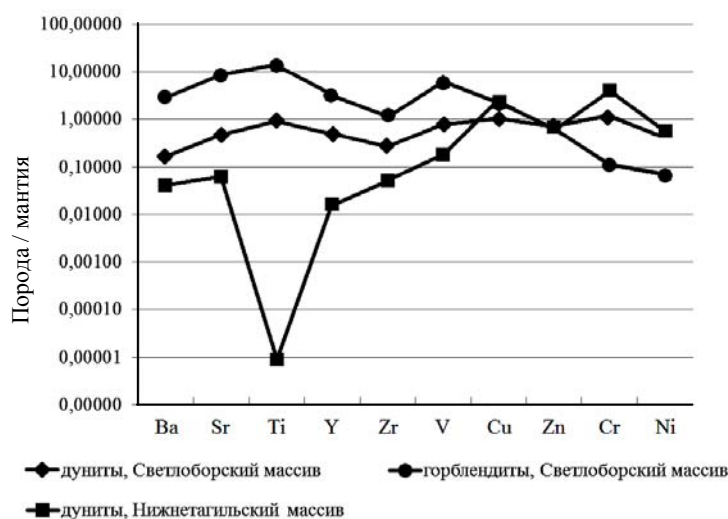


Рис.1. Распределение элементов-примесей, нормированных на примитивную мантию (по [16]), в породах Светлоборского и Нижнетагильского массивов (горблендиты по [2])

Обращают на себя внимание умеренные содержания никеля в дунитах – это общая особенность концентрически-зональных массивов, что отмечали еще по массивам Кондер, Туламин, Инагли [5]. При этом концентрации никеля в дунитах Нижнетагильского массива (1206 г/т) заметно выше светлоторских (821 г/т). Еще А.Б.Осипенко с соавторами указывал на практическое сходство Гальмознанского массива с Нижнетагильским и зональными массивами в целом [1], основываясь на данных о распределении элементов-примесей в дунитах. В частности, для них характерны повышенные содержания ультрафемафилов – никеля и хрома, и халькофильных элементов.

Среди зависимостей, выявленных при корреляционном анализе данных по дунитам Светлоторского массива, прежде всего, выделяется факт полного отсутствия значимых коэффициентов корреляции хрома с другими элементами, что естественно для Светлоторского массива ввиду слабого развития хромитовой минерализации. Элементы Fe, Mn, Mg, Ni характеризуются сильными положительными коэффициентами корреляции друг с другом (парный коэффициент корреляции $r = +0,97$ при значимом коэффициенте корреляции 0,75 для 95 %-й вероятности, 7 анализов) и сильными отрицательными – с Si ($r = -0,97$), Ti ($r = -0,95$), Al ($r = -0,77$), щелочами ($r = -0,87$), Ca ($r = -0,85$), а также со всей группой редких земель ($r < -0,93$). Коэффициенты корреляции на Нижнетагильском массиве значительно отличаются от указанных выше. Так, Cr имеет достаточно сильную связь с V (парный коэффициент корреляции $r = +0,97$ при значимом коэффициенте корреляции 0,71 для 95 %-й вероятности, 8 анализов), Al ($r = +0,94$) и Gd ($r = +0,81$), что объясняется широким развитием хромитовой минерализации на Нижнетагильском массиве. Также к этой группе примыкает рубидий ($r = +0,92$ с алюминием, $r = +0,94$ с ванадием, $r = +0,97$ с хромом). Железо сильно коррелирует с марганцем ($r = +0,97$) и цирконом ($r = +0,93$).

Распределение транзитных элементов (табл.1, 2, рис.1) указывает на относительную самостоятельность массивов. Они характеризуются сходным поведением при концентрациях, близких к мантийным, в дунитах Светлоторского массива (Cu = 13,7 г/т, Zn = 54,1 г/т) и Нижнетагильского (Cu = 28,6 г/т, Zn = 39,1 г/т). Разброс значений транзитных элементов невелик. При анализе коэффициентов корреляции для дунитов Нижнетагильского массива выявляется обратная связь меди и магния ($r = -0,91$), что может указывать на разное поведение при серпентинизации. Для Светлоторского массива сильных корреляций транзитных элементов с другими группами не наблюдается.

Среди крупноионных литофильных элементов количество стронция и бария на Светлоторском массиве (33,1 и 5,48 г/т соответственно) в несколько раз превышает содержания таковых в Нижнетагильском (3,01 и 1,45 г/т). По содержаниям рубидия картина обратная.

Высокочargedные элементы, по нашим данным, на Нижнетагильском массиве встречаются в предельно низких концентрациях (многие ниже предела обнаружения), за исключением циркония, концентрации которого также гораздо ниже по сравнению со Светлоторским массивом. Стоит отдельно отметить предельные концентрации титана в дунитах Нижнетагильского массива ($< 0,01$ г/т), отмечаемые и другими авторами [8, 15]. В свою очередь, повышенные концентрации титана в Светлоторском массиве (500 г/т) могут быть связаны с привнесением вместе с другими элементами во время внедрения жильных пород. На это указывают и данные работы [2], приведенные на рис.1. Отчетливо видно, что в горблендитах Светлоторского массива концентрации почти всех элементов-примесей (за исключением хрома, никеля) превышают мантийные концентрации и содержания в дунитах обоих массивов. Кроме того, характер распределения элементов в дунитах и горблендитах Светлоторского массива аналогичен, различаются лишь абсолютные концентрации.

Специфическая черта дунитов Светлоторского и Нижнетагильского массивов – пониженное содержание в них литофильных элементов. В частности, для нижнетагильских дунитов, как и для дунитов многих других зональных массивов [7, 8], характерны низкие (ниже мантийных) концентрации редкоземельных элементов (рис.2).

Таблица 2

Содержание породообразующих оксидов и элементов-примесей в дунитах Нижнетагильского массива

Химические элементы	Александровский лог			Крутой лог		Сырков лог	Новый Дунитовый карьер		Среднее
	8	9	10	11	12	13	14	15	
<i>Петрогенные элементы, % по массе</i>									
SiO ₂	36,45	35,16	37,11	35,16	37,32	37,52	33,34	33,81	35,73
TiO ₂	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,005
Al ₂ O ₃	0,17	0,25	0,35	0,29	0,16	0,28	0,15	0,54	0,27
Fe ₂ O ₃	10,75	7,56	8,1	8,29	6,81	7,3	7,43	8,38	8,08
MnO	0,21	0,14	0,15	0,14	0,12	0,14	0,14	0,15	0,15
MgO	38,98	45,46	43,11	45,18	38	38,21	43,12	41,54	41,70
CaO	0,19	0,3	0,2	0,28	0,99	0,09	0,29	0,19	0,32
Na ₂ O	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	0,02
K ₂ O	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,005
P ₂ O ₅	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
BaO	0,006	0,006	0,007	0,006	0,004	0,005	0,007	0,005	0,006
П.п.п.	12,69	10,58	10,07	9,82	16,21	15,98	15,15	14,52	13,13
Сумма	99,43	99,45	99,11	99,16	99,62	99,54	99,63	99,1	
<i>Элементы-примеси, г/т</i>									
Элементы группы железа (ЭГЖ)									
V	3,3	7,9	16,6	10,7	3,1	11,4	2,8	25	10,04
Cr	2 299	9 161	19 217	8 484	1 913	15 941	2 530	24 996	10567,58
Ni	1 027	1 361	1 290	1 478	1 113	1 493	1 060	829	1206,19
Группа транзитных элементов (ТЭ)									
Cu	32	15,9	20	12,3	57	34	33	23	28,57
Zn	50	47	50	33	19,0	39	30	45	39,13
Группа крупноионных литофилов (LIL)									
Rb	0,40	1,18	2,7	1,67	0,87	2,5	1,20	3,6	1,76
Sr	1,07	< 1	< 1	< 1	20	< 1	< 1	< 1	3,01
Cs	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,05
Ba	7,3	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1,35
Группа высокозарядных элементов (HFS)									
Y	0,10	< 0,1	0,13	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,07
Zr	1,58	0,99	1,16	1,18	0,73	1,00	1,00	0,97	1,08
Nb	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,05
Th	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,03
U	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,03
Hf	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,05
Ta	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,05
Группа редкоземельных элементов (РЗЭ, REE)									
La	0,10	< 0,05	0,085	< 0,05	< 0,05	0,097	< 0,05	< 0,05	0,05
Ce	0,16	< 0,05	0,080	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,05
Pr	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,038	< 0,03	< 0,03	0,02
Nd	0,11	< 0,03	0,13	0,066	0,036	0,28	< 0,03	< 0,03	0,08
Sm	0,010	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,075	< 0,01	< 0,01	0,01
Eu	< 0,01	< 0,01	0,018	< 0,01	0,018	0,024	0,012	< 0,01	0,01
Gd	< 0,02	0,039	0,069	< 0,02	< 0,02	0,050	< 0,02	0,041	0,03
Tb	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Dy	0,015	0,028	0,030	< 0,01	0,021	0,035	< 0,01	< 0,01	0,02
Ho	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Er	< 0,02	0,024	< 0,02	< 0,02	0,022	0,026	0,029	0,033	0,02
Tm	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01
Yb	< 0,02	0,027	< 0,02	0,036	0,046	0,052	< 0,02	< 0,02	0,03
Lu	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01

Примечание. 8-15 – номера проб.

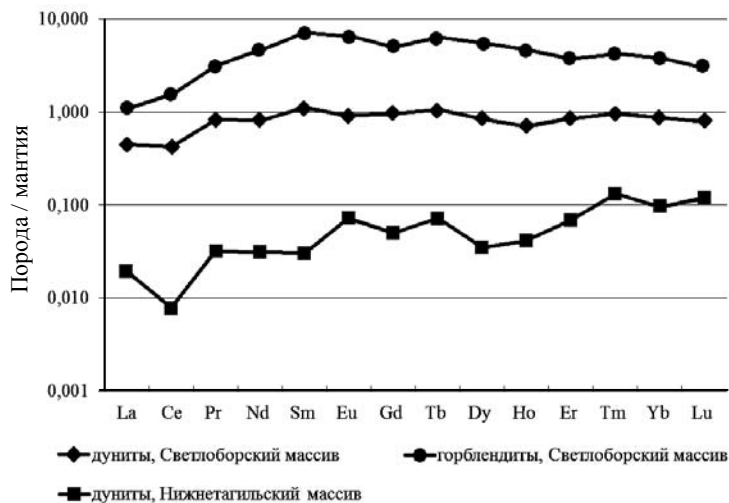


Рис.2. Распределение РЗЭ, нормированных на примитивную мантию (по [17]), в породах Светлоборского и Нижнетагильского массивов (горблендиты даны по [2])

Светлоборские дуниты, в свою очередь, характеризуются мантийными концентрациями РЗЭ. Асимметрия нормированных спектров связана со слабой обогащенностью тяжелыми и средними РЗЭ относительно легких: $(La/Yb)_N$ равно 0,17-2,41 – для дунитов Светлоборского массива, 0,07-1,01 – для дунитов Нижнетагильского массива; $(Sm/Yb)_N$ равно 0,53-1,8 – для дунитов Светлоборского массива, 0,06-0,79 – для дунитов Нижнетагильского массива, – при дифференцированном поведении легких РЗЭ относительно средних: $(La/Sm)_N$ равно 0,17-1,61 – для дунитов Светлоборского массива, 0,24-3,07 – для дунитов Нижнетагильского массива.

Содержание редкоземельных элементов в дунитах Нижнетагильского массива на порядок меньше мантийного. Сильнее проявлена асимметрия нормированных спектров, выраженная в обедненности легких РЗЭ относительно средних и тяжелых. Отмечается слабый отрицательный цериевый пик, который для дунитов Светлоборского массива едва различим. По нашим данным, содержания РЗЭ в дунитах пониженные, в связи с чем мы дополнительно анализировали распределение РЗЭ в дунитах Нижнетагильского массива по данным работ [8, 15]. Характер приведенного в них распределения аналогичен нашим данным.

Редкоземельные элементы в дунитах Светлоборского массива характеризуются преимущественно средними ($r < 0,92$) отрицательными связями с элементами группы железа (Mn, Fe, Co, Ni), за исключением V, с которым коэффициент корреляции достигает +0,99. Транзитные элементы с РЗЭ значимых коэффициентов корреляции не обнаруживают. Из группы крупноионных литофилов хорошую положительную связь с РЗЭ показывают Sr ($r = 0,96$) и Ba ($r = 0,88$); Rb коррелируется с легкими РЗЭ ($r = 0,94$), Cs же не коррелируется вовсе. Из группы высокозарядных практически все элементы с редкими землями не связаны, за исключением титана ($r = 0,99$) и иттрия ($r = 0,99$). На Нижнетагильском массиве сильные связи РЗЭ с другими группами не обнаружены.

Результаты определения содержаний платиновых металлов и золота в дунитах Светлоборского массива представлены в табл.3, Нижнетагильского – в табл.4.

Практически во всех пробах Светлоборского массива, за исключением одной, наиболее богатой платиной, обнаружилось крайне низкие, менее 0,01 г/т, содержания палладия и золота. Среднее содержание платины в проанализированных образцах дунитов из рудопроявления Высоцкого и перспективного оруденелого участка Коробовского лога составило 0,35 г/т. Содержания золота и палладия во всех проанализированных образцах Нижнетагильского массива ниже предела обнаружения метода (< 10 мг/т). Среднее содержание платины в дунитах, вмещающих тела богатых хромит-платиновых руд, по нашим данным составляет 61 мг/т, по данным Ю.А.Волченко – 27 мг/т.

Рудопроявления Светлоборского массива локализованы в краевой части дунитового ядра массива вблизи контакта вмещающих (неплатиноносных) тонкозернистых дунитов с клинопироксенидами оболочки. Оруденение представляет собой линейные минерализованные зоны шириной до 12 м с содержаниями платины от 0,2 до 22,5 г/т, обрамленные первичными ореолами шириной до 50 м и протяженностью до 1,3 км [11]. Распределение пла-

тины в пределах рудных зон достаточно неравномерное и соответствует схеме: Os < Ru < Rh < Ir < Pd < Pt. В проанализированных образцах платиноносных дунитов рудопроявления Высоцкого разброс значений составляет от 0,02 до 1,45 г/т. Повышенные концентрации платины в дунитах сопровождаются увеличением значений содержаний других платиновых металлов и золота. Максимальное содержание золота в дунитах составляет 0,4 г/т. Форма его нахождения в дунитах не установлена. Платиновая минерализация представлена главным образом платино-железистыми сплавами – прежде всего, изоферроплатиной. Размер зерен платиноидов составляет в пределах рудной зоны 10-100 мкм, а в наиболее обогащенных участках до 1 мм [11].

Таблица 3

Элементы платиновой группы и золото в дунитах Светлоборского массива, мг/т

Номер пробы	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	$\frac{Pt}{Pd}$	$\frac{Rh + Pd + Pt}{Ru + Os + Ir}$	Сумма ЭПГ	Au	Сумма ЭПГ + Au
1	–	–	10	–	–	1450	145	–	1460	400	1860
2	–	–	< 10	–	–	140	–	–	140	< 10	140
3	–	–	< 10	–	–	80	–	–	80	< 10	80
4	–	–	< 10	–	–	20	–	–	20	< 10	20
5	1,0	2,1	6,2	0,3	3,0	222	35,8	53,6	234,6	< 10	234,6
6	–	–	< 10	–	–	220	–	–	220	< 10	220
7	–	–	< 10	–	–	330	–	–	330	< 10	330
Среднее	1,0	2,1	5,9	0,3	3,0	351,7	59,6	83,7	364	70,8	434,8

Примечание. Пробы 1-6 – рудопроявление Высоцкого, 7 – Коробовский лог; «–» – анализы не выполнялись.

Таблица 4

Элементы платиновой группы и золото в дунитах Нижнетагильского массива, мг/т

Номер пробы	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	$\frac{Pt}{Pd}$	$\frac{Rh + Pd + Pt}{Ru + Os + Ir}$	Сумма ЭПГ	Au	Сумма ЭПГ + Au
1	–	–	< 10	–	–	80	–	–	80	< 10	80
2	–	–	< 10	–	–	< 10	–	–	< 10	< 10	< 10
3	–	–	< 10	–	–	40	–	–	40	< 10	40
4	–	–	< 10	–	–	< 10	–	–	< 10	< 10	< 10
5	–	–	< 10	–	–	30	–	–	30	< 10	30
6	–	–	< 10	–	–	10	–	–	10	< 10	10
7	–	–	< 10	–	–	< 10	–	–	< 10	< 10	< 10
8	–	–	< 10	–	–	310	–	–	310	< 10	310
Среднее	–	–	< 10	–	–	61	–	–	61	< 10	61
Среднее*	9	< 5	3	5	< 10	27	9	2,1	53	–	53

Примечание. Пробы 1-3 – Александровский лог, 4-5 – Крутой лог, 6 – Сырков лог, 7-8 – Новый Дунитовый карьер; среднее* – 39 проб [10], «–» – анализы не выполнялись.

Платинометалльная геохимическая специализация неплатиноносных, т.е. вмещающих платиновую минерализацию, дунитов Нижнетагильского массива резко отличается как от дунитовой светлоборского типа (рудопроявление Высоцкого), так и от хромит-платиновой нижнетагильского типа (месторождения Госшахта, Крутой лог, 4-й лог и др.). Содержания платиновых металлов в них доходит до первых килограммов на тонну, а их распределение, по нашим данным, выглядит следующим образом: Rh < Pd < Ir < Ru < Pt, что вполне со-

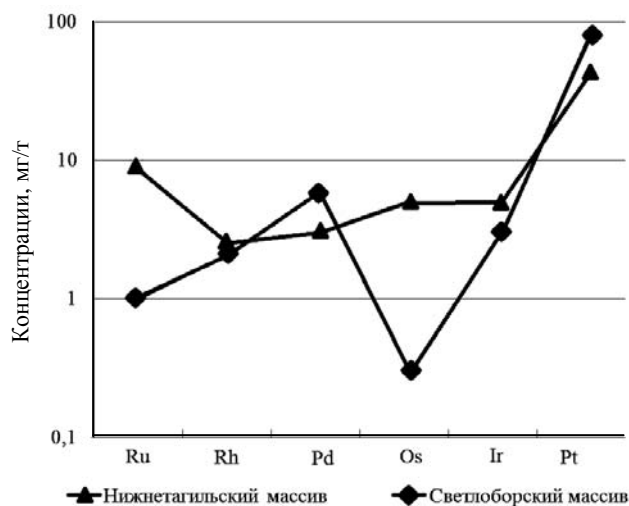


Рис.3. Распределение ЭПГ в дунитах Светлоборского и Нижнетагильского массивов

поставимо с данными по безрудным дунитам [10]. На рис.3 показаны особенности распределения платиновых металлов в дунитах Светлоборского и Нижнетагильского массивов.

Обращает на себя внимание преимущественно иридий-палладий-платиновая специфика платиноносных дунитов рудопроявления Высоцкого и Коробовского лога Светлоборского массива. Повышенное отношение Pt/Pd (59,6), равно как и значительное преобладание суммы легкоплавких платиноидов над тугоплавкими (83,7 мг/т), отличает платинометалльное оруденение дунитов Светлоборского массива от широкого известного нижнетагильского хромит-платинового типа коренного оруденения зональных мафит-

ультрамафитовых комплексов. Сравнение светлоборского дунитового типа платинометалльного оруденения и нижнетагильского хромититового выполнено на графике нормализованных к хондриту C1 содержаний элементов платиновой группы (рис.4).

Из графика следует, что платиновый геохимический тип платинометалльного оруденения дунитов Светлоборского массива, несмотря на очевидную схожесть с профилем «М-образного» распределения ЭПГ, свойственного породам зональных комплексов, характеризуется повышенными концентрациями палладия, пониженными иридия и резким преобладанием платины над всеми платиновыми металлами.

Изучение состава 57 зерен минералов платиновой группы (МПГ) дунитов Нижнетагильского массива показывает, что распределение платиновых металлов в платино-железистых и платино-железо-никель-медных сплавах соответствует схеме $Ru < Pd < Rh < Ir < Pt$ и не отличается от геохимической специфики хромит-платинового оруденения [13]. Исследования МПГ дунитов Светлоборского и Нижнетагильского массивов, проведенные Н.Д.Толстых [12], показывают, что платино-железистые и платино-железо-никель-медные

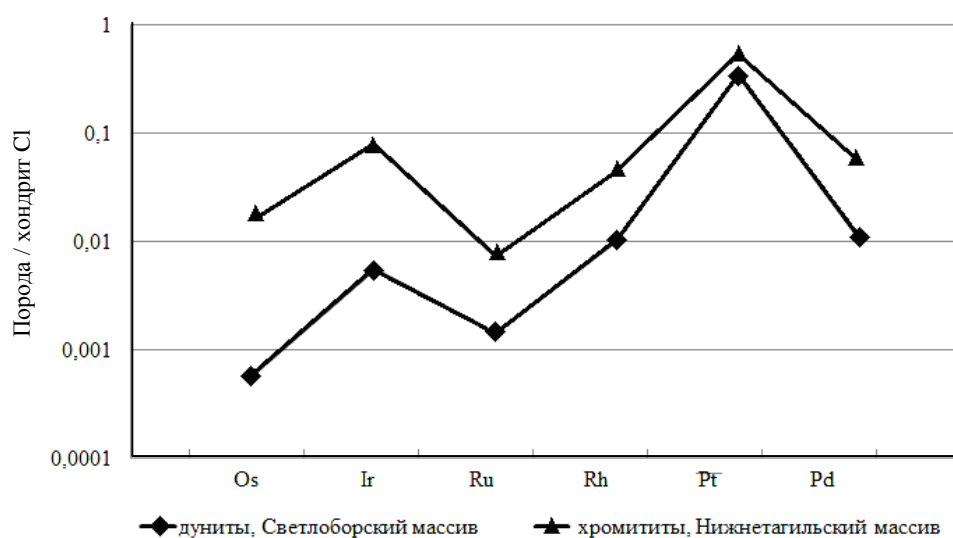


Рис.4. Распределение нормализованных к хондриту C1 содержаний ЭПГ в дунитах Светлоборского и хромититах Нижнетагильского [4] массивов

сплавы, доминирующие среди МПГ дунитов Светлоборского массива, содержат повышенные концентрации палладия и пониженные – иридия. Это вполне объясняет выявленные в валовых пробах дунитов геохимические особенности платинометалльного оруденения светлоборского типа.

Обсуждение. Данные о распределении элементов-примесей в породах обоих массивов свидетельствуют о стабильности геохимических характеристик пород зональных массивов. На это, в частности, указывает сравнительный анализ распределений элементов-примесей в дунитах изучаемых массивов с данными других авторов, а также с содержаниями малых элементов в дунитах Платиноносного пояса Урала и Дальнего Востока [1, 5, 14, 15]. Однако наблюдаются некоторые особенности. В частности, повышенные концентрации алюминия, щелочей в составе дунитов Светлоборского массива связаны, скорее всего, с широко проявленными процессами амфиболизации и флогопитизации. Кроме того, Светлоборский массив в целом характеризуется повышенными содержаниями редкоземельных элементов. Нижнетагильский и Светлоборский массивы, как и другие концентрически-зональные массивы Урала, имеют низкий уровень накопления РЗЭ и чуть большее относительное содержание тяжелых лантаноидов. В этом отношении дуниты зональных массивов практически полностью аналогичны альпинотипным дунитам [5]. Дуниты Светлоборского и Нижнетагильского массивов характеризуются мантийными содержаниями ЭГЖ (кроме никеля) и транзитных элементов. Они обеднены относительно мантии крупноионными литофилами и высокозарядными элементами, являющимися некогерентными для ультрамафитового расплава и, вероятно, указывающими на состав источника. Относительно Нижнетагильского массива Светлоборский обогащен большей частью элементов-примесей, за исключением Ba, Y, Ni и транзитных элементов, что может быть связано с их накоплением в глинистых минералах, обладающих повышенной сорбционной способностью. В обоих массивах наблюдается отрицательная цериевая аномалия, которая сильнее проявлена для Нижнетагильских дунитов. Это свидетельствует об избирательном выносе элемента вследствие его повышенной, по сравнению с другими лантаноидами, растворимости в гипергенных растворах в процессе выветривания и, следовательно, большей степени выветривания пород Нижнетагильского массива, которые также содержат большее количество летучих компонентов.

Выводы. Высокий уровень редких элементов в дунитах Светлоборского массива относительно Нижнетагильского, а также мантийный характер их распределения позволяют предполагать, что в процессе вторичных изменений они вели себя как довольно подвижные компоненты. Другими словами, микроэлементы в дунитах Светлоборского массива подвергались перераспределению в ходе наложенных процессов (внедрения пироксенитовых, горблендитовых и иситовых даек). Этот вывод подтверждается и данными И.А.Готтман с соавторами [2], у которых приведены повышенные почти на порядок относительно примитивной мантии содержания и аналогичный дунитам характер распределения микроэлементов в горблендитах Светлоборского массива, причем положительное влияние указанные процессы оказывали на накопление преимущественно редкоземельных элементов.

Необходимо сделать вывод о существенных различиях платинометалльной преимущественно платиновой геохимической специализации дунитов Светлоборского массива и иридий-рутений-платиновой специализации дунитов Нижнетагильского массива. Перераспределение платиновых металлов в дунитах в ходе образования богатых хромит-платиновых руд сопровождается появлением негативных платиновых аномалий (< 20 мг/т), геохимическая специфика которых в результате отличается от самих платиноносных хромититов.

Распределение платины в дунитах массивов крайне неравномерное и составляет от следов до десятков граммов на тонну в дунитах и даже килограммов на тонну локально в хромититах. Среднее же значение содержаний в неоруденелых участках находится в интервале 20-60 мг/т. Протяженные минерализованные платиноносные зоны в дунитах выделяются по повышенным фоновым значениям содержаний (более 0,1 г/т), внутри которых

находятся разрозненные участки с более высокими концентрациями платиновых металлов (от 0,2 до $n \cdot 10$ г/т) [11].

Открытие имеющих потенциальную промышленную значимость протяженных минерализованных рудных зон в дунитах Светлоборского массива [11], наряду с выявлением геохимических особенностей платинометалльного оруденения и спецификой составов самих МПГ, позволяют рассматривать недавно открытые рудопроявления как новый геолого-промышленный тип месторождений платины, изучение которого может значительно изменить представления о промышленных перспективах коренной платины уральского региона.

Авторы выражают благодарность Н.Д.Толстых, А.П.Козлову, Ю.М.Телегину за предоставленный каменный материал и помощь в интерпретации полученных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геохимия магматических серий Гальмознанского базит-гипербазитового массива, Корьякия / А.Б.Осипенко, Е.Г.Сидоров, А.П.Козлов, Э.А.Ланда, Г.В.Леднева, Б.А.Марковский // Тихоокеанская геология. 2002. Т.21. № 2. С.79-91.
2. Готтман И.А. Геологические данные о магматической природе горнблендитов в габбро-ультрамафитовых комплексах Урало-Аляскинского типа / И.А.Готтман, Е.В.Пушкарев // Литосфера. 2009. № 2. С. 78-86.
3. Иванов О.К. Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Екатеринбург: Изд-во Уральск. ун-та, 1997. 488 с.
4. Крупно-объемные рудные месторождения платины в зональных базит-ультрабазитовых комплексах урало-алаяскинского типа и перспективы их освоения / А.П.Козлов, В.А.Чантурия, Е.Г.Сидоров, Н.Д.Толстых, Ю.М.Телегин // Геология рудных месторождений. 2011. Т.53. № 5. С.419-437.
5. Ланда Э.А. Геохимические особенности Нижне-Тагильского зонального массива и вопросы его генезиса / Э.А.Ланда, В.Г.Лазаренков // Записки ВМО. 1990. Ч.127. № 4. С.38-50.
6. Малахов И.А. Нижнетагильский дунит-клинопироксенитовый массив и его вмещающие породы / И.А.Малахов, Л.В.Малахова // Труды Института геологии и геохимии УФАН СССР. Свердловск: Уральский рабочий, 1970. 157 с.
7. Малич К.Н. Платиноиды клинопироксенит-дунитовых массивов Восточной Сибири / ВСЕГЕИ. СПб, 1999. 296 с.
8. Новые данные по геохимии Платиноносного пояса Урала: вклад в понимание петрогенезиса / Г.Б.Ферштатер, Ф.Беа, Е.В.Пушкарев, Дж.Гарути, П.Монтеро, Ф.Заккарини // Геохимия. 1999. № 4. С.352-370.
9. Платинометалльное оруденение в геологических комплексах Урала / К.К.Золотов, Ю.А.Волченко, В.А.Коротеев, И.А.Малахов и др. Екатеринбург: Изд-во ИГиГ УрО РАН, 2001. 199 с.
10. Структурно-вещественная эволюция комплексов Платиноносного пояса Урала при формировании хромит-платиновых месторождений уральского типа. Часть 1 / Ю.А.Волченко, К.С.Иванов, В.А.Коротеев, Т.Оже // Литосфера. 2007. № 4. С.73-101.
11. Телегин Ю.М. Геологические особенности рудопроявлений платины Светлоборского и Каменушинского массивов Платиноносного пояса Урала / Ю.М.Телегин, Т.В.Телегина, Н.Д.Толстых // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. Екатеринбург: Изд-во ИГиГ УрО РАН, 2009. Т.2. С.212-215.
12. Толстых Н.Д. Коренная платина Светлоборского и Каменушинского массивов Платиноносного пояса Урала / Н.Д.Толстых, Ю.М.Телегин, А.П.Козлов // Геология и геофизика. 2011. Т.52. № 6. С.775-793.
13. Толстых Н.Д. Коренная платиновая минерализация Светлоборского и Нижнетагильского массивов, Платиноносный пояс Урала / Н.Д.Толстых, А.П.Козлов, Ю.М.Телегин // Платина России / Федеральное агентство по недропользованию. Красноярск, 2012. Т.7. С.297-312.
14. Чантурия В.А. Дунитовые руды – новый вид платиносодержащего сырья / В.А.Чантурия, А.П.Козлов, Н.Д.Толстых // Горный вестник Камчатки. 2011. № 16. С.66-75.
15. Шмелев В.Р. Нижнетагильский дунит-клинопироксенитовый массив и его платиновые месторождения / В.Р.Шмелев, Е.В.Пушкарев, Е.В.Аникина // Путеводитель геологических экскурсий к XI Всероссийскому петрографическому совещанию. Екатеринбург: Изд-во ИГиГ УрО РАН, 2010. С.38-58.
16. McDonough W.F. Constrains of the composition of continental lithospheric mantle // EPSL. 1990. Vol.101. N 1. P.1-18.
17. Rollinson H.R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Harlow: PEL. 1993. 352 p.

REFERENCES

1. Osipenko A.B., Sidorov E.G., Kozlov A.P., Landa E.A., Ledneva G.V., Markovsky B.A. Geohimiya magmaticeskikh serii Gal'mojenanskogo bazit-giperbazitovogo massiva, Korjakiya (*Geochemistry of magmatic series of the Galmoenansky mafic-ultramafic massif, Koryakiya*). Tihookeanskaya geologiya. 2002. Vol.21. N 2, p.79-91.
2. Gottman I.A., Pushkarev E.V. Geologicheskie dannye o magmaticeskoi prirode gornblenditov v gabbro-ultramafitovykh kompleksah Uralo-Alyaskinskogo tipa (*Geological data on the magma nature of hornblendites in gabbro-ultramafic complexes of the Ural-Alaskan type*). Litosfera. 2009. N 2, p.78-86.

3. Ivanov O.K. Koncentricheski-zonal'nye piroksenit-dunitovye massivy Urala (*Concentrically zoned pyroxenite-dunite massifs of the Urals*). Ekaterinburg: Izd-vo Uralsk. Universiteta. 1997, p.488.
4. Kozlov A.P., Chanturiya V.A., Sidorov E.G. et al. Krupno-ob'emnye rudnye mestorozhdeniya platiny v zonal'nykh bazit-ul'trabazitovykh kompleksakh uralo-alyaskinskogo tipa i perspektivy ih osvoeniya (*Platinum ore deposits of a large volume in zonal basic-ultrabasic complexes of the Ural-Alaskan type and prospects for their development*). Geologiya rudnykh mestorozhdenii. 2011. Vol.53. N 5, p.419-437.
5. Landa E.A., Lazarenkov V.G. Geohimicheskie osobennosti Nizhne-Tagil'skogo zonal'nogo massiva i voprosy ego genezisa (*Geochemical features of the Nizhny Tagil zonal massif and issues of its genesis*). Zapiski VMO. 1990. Vol.127. N 4, p.38-50.
6. Malakhov I.A., Malakhova L.V. Nizhnetagil'skiy dunit-klinopiroksenitovyj massiv i ego vmeshhajushhie porody (*The Nizhny Tagil dunite-clinopyroxenite massif and its host rocks*). Trudy Instituta geologii i geohimii UFAN SSSR. Sverdlovsk: Ural'skii rabochii. 1970, p.157.
7. Malitch K.N. Platinoidy klinopiroksenit-dunitovykh massivov Vostochnoi Sibiri (*Platinoids of clinopyroxene-dunite massifs of East Siberia*). VSEGEI, St Petersburg. 1999, p.296.
8. Fershtater G.B., Bea F., Pushkarev E.V. et al. Novye dannye po geohimii Platinonosnogo pojasa Urala: vklad v ponimanie petrogenezisa (*New data on geochemistry of the Ural Platinum Belt: a contribution to the understanding of petrogenesis*). Geohimiya. 1999. N 4, p.352-370.
9. Zolov K.K., Volchenko Yu.A., Koroteev V.A., Malakhov I.A. et al. Platinometal'noe orudenenie v geologicheskikh kompleksakh Urala (*PGE mineralization in geological complexes of the Urals*). Ekaterinburg: Izd-vo IGiG UrO RAN. 2001, p.199.
10. Volchenko Y.A., Ivanov K.S., Koroteev V.A. et al. Strukturno-veshhestvennaja evoljuciya kompleksov Platinonosnogo pojasa Urala pri formirovanii hromit-platinovykh mestorozhdenii ural'skogo tipa (*Structural-compositional evolution of the Ural Platinum Belt complexes during the formation of platinum-chromite deposits of the Ural type*). Part 1. Litosfera. 2007. N 4, p.73-101.
11. Telegin Y.M., Telegina T.V., Tolstykh N.D. Geologicheskie osobennosti rudoprojavenii platiny Svetloborskogo i Kamenushinskogo massivov Platinonosnogo pojasa Urala (*Geologic features of platinum occurrences of the Svetloborsky and Kamenushinsky massifs of the Ural Platinum Belt*). Ul'trabazit-bazitovye komplekсы skladchatykh oblastei i svyazannye s nimi mestorozhdeniya. Ekaterinburg: Izd-vo IGiG UrO RAN. 2009. Vol.2, p.212-215.
12. Tolstykh N.D., Telegin Y.M., Kozlov A.P. Korennaya platina Svetloborskogo i Kamenushinskogo massivov Platinonosnogo pojasa Urala (*Bedrock platinum mineralization of the Svetloborsky and Kamenushinsky massifs of the Ural Platinum Belt*). Geologiya i geofizika. 2011. Vol.52. N 6, p.775-793.
13. Tolstykh N.D., Kozlov A.P., Telegin Y.M. Korennaya platinovaya mineralizaciya Svetloborskogo i Nizhnetagil'skogo massivov, Platinonosnyi pojas Urala (*Bedrock platinum mineralization of the Svetloborsky and Nizhny Tagil massifs of the Ural Platinum Belt*). Platina Rossii. Federal'noe agentstvo po nedropol'zovaniyu. Krasnoyarsk, 2012. Vol.7, p.297-312.
14. Chanturiya V.A., Kozlov A.P., Tolstykh N.D. Dunitovye rudy – novyi vid platinosoderzhashhego syr'ya (*Dunite ores – a new kind of platinum source*). Gornyi vestnik Kamchatki. 2011. N 16, p.66-75.
15. Shmeliov V.R., Pushkarev E.V., Anikina E.V. Nizhnetagil'skii dunit-klinopiroksenitovyj massiv i ego platinovye mestorozhdeniya (*The Nizhny Tagil dunite-clinopyroxenite massif and its platinum deposits*). Putevoditel' geologicheskikh ekskursii k XI Vserossiiskomu petrograficheskomu soveshchaniyu. Ekaterinburg: Izd-vo IGiG UrO RAN, 2010, p.38-58.
16. McDonough W.F. Constrains of the composition of continental lithospheric mantle. EPSL. 1990. Vol.101. N 1, p.1-18.
17. Rollinson H.R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Harlow: PEL. 1993, p.352.

GEOCHEMICAL FEATURES OF PLATINIFEROUS DUNITES OF THE SVETLOBORSKY AND NIZHNETAGILSKY MASSIFS, THE PLATINUM BELT OF THE URALS

A.G.PILYUGIN, PhD in Geological and Mineral Sciences, Geologist, andrew_pilugin@mail.ru
JSC «Artel starateley «Amur», Khabarovsk, Russia

I.V.TALOVINA, Dr. of Geological and Mineral Sciences, Professor, i.talovina@gmail.com

A.M.DURYAGINA, Postgraduate student, gayfutdinova@yandex.ru

V.S.NIKIFOROVA, Postgraduate student, nikiforova.victoria@gmail.com

National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article encompasses new data on geochemistry of dunites forming the Svetloborsky and Nizhnetagilsky ultramafic massifs of the Ural Platinum Belt. Petrogenesis of both massifs is discussed based on their interpretation. The research establishes that both massifs are petrochemical equivalents of alpinotype complexes and zonal massifs, but at the same time they have their own particularities. Thus, dunites of the Svetloborsky massif are enriched in almost all rare elements compared to the Nizhnetagilsky massif that may be caused by their redistribution during subsequent processes due to intrusion of mafic dykes.

Key words: concentrically zoned massifs, geochemistry, dunites, the Svetloborsky massif, the Nizhnetagilsky massif, Platinum Belt of the Urals.

ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РИФОВОГО МАССИВА ОСТРОВА БЕРХА (АРХИПЕЛАГ НОВАЯ ЗЕМЛЯ)

А.Б.ТАРАСЕНКО, канд. геолог.-минерал. наук, ассистент, *etele1@ya.ru*

В.П.МАТВЕЕВ, канд. геолог.-минерал. наук, доцент, *wmatveev@mail.ru*

Д.А.СЛЯДНЕВА, студентка, *dominae.solis@gmail.com*

Д.В.КИРИЛЛОВА, студентка, *kdv-888@mail.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Приведена подробная характеристика 12 литолого-генетических типов пород, выделенных в составе парагенетической ассоциации фаций рифового массива острова Берха: зарифовой лагуны, рифового плато, ядра рифа, предрифового склона (контрфорса), предрифа и пинаклей. Изложена информация о структуре и текстуре, об особенностях минералого-петрографического и химического состава пород рифа и вмещающих отложений. Анализ строения фациальных зон и особенностей их латеральных изменений позволил создать модель строения рифового массива.

Ключевые слова: остров Берха, рифовый массив, литолого-генетический тип, аутигенные минералы, петрохимические модули.

Введение. Остров Берха находится в Баренцевом море у северо-западного берега острова Северный архипелага Новая Земля и входит в группу островов Горбовых. Этот район расположен в зоне сочленения двух структурно-формационных зон: Северно-Новоземельской и Западно-Новоземельской (рис.1). В строении органогенного массива острова Берха принимают участие породы нижне-среднекаменноугольного возраста.

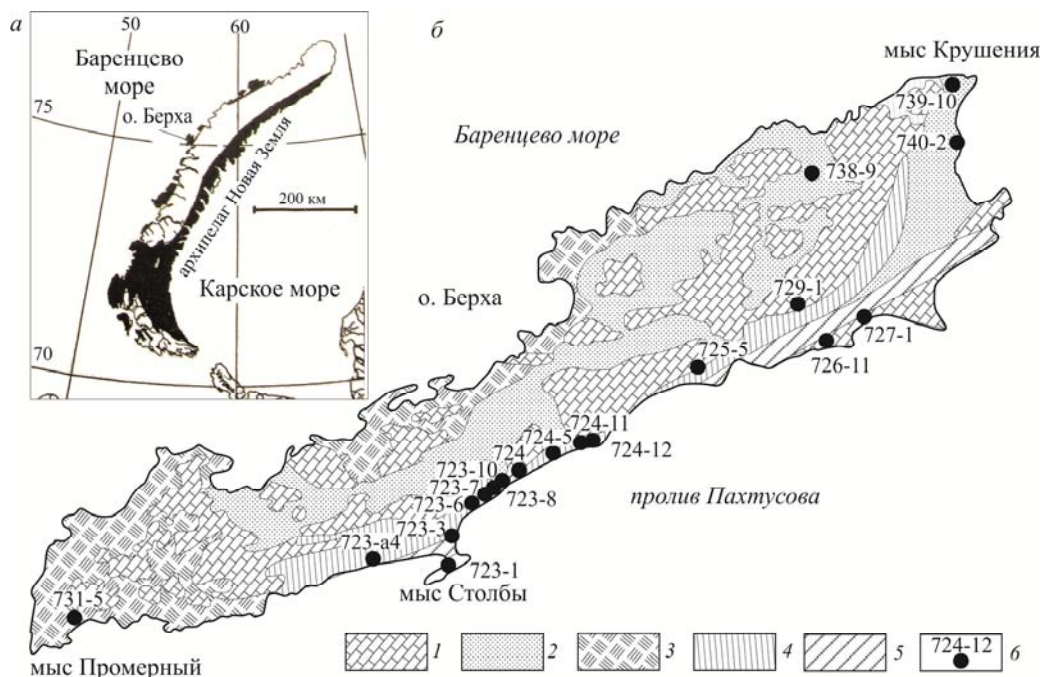


Рис. 1. Местоположение острова Берха в архипелаге Новая Земля: *а* – карта архипелага Новая Земля; черным отмечены площади развития карменноугольно-нижнепермских отложений; *б* – выкопировка из геологической карты Горбовского рифового массива масштаба 1:10 000 [3] с дополнениями авторов

1 – органогенные известняки; 2 – обломочные известняки; 3 – конгломерато-брекчии; 4 – органогенно-обломочные известняки; 5 – аргиллиты; 6 – номер точки наблюдений

Первые геологические наблюдения в районе острова Берха были проведены М.М.Кругловским и В.А.Русановым (1913), О.Хольтедалем (1921), Р.Л.Самойловичем (1925), М.В.Кленовой (1926). В 1936 г. А.А.Петренко было выполнено описание пород на острове Берха и определен их возраст. В 1984 г. в результате специализированных стратиграфических исследований на Горбовых островах сотрудниками ВНИИОкеангеологии Е.П.Карноушенко, Н.Н.Соболевым, Ю.П.Симоновым и сотрудником Палеонтологического института РАН С.В.Яцковым по полевому определению пород и морфологии карбонатных отложений был выделен Горбовский рифовый массив, приведен списочный состав фауны, по которому подтверждался его раннекаменноугольный возраст. В 1981-1985 годах Новоземельской партией ПМГРЭ на архипелаге осуществлялась геологическая съемка масштаба 1:200 000.

Образования Горбовского комплекса (C_{1-2gr}) обнажаются в центральной части острова Личутина и на острове Малый Заячий, но наиболее полно комплекс представлен на острове Берха (рис.1), где он слагает органогенный массив протяженностью 15 км, шириной 2-5 км и высотой около 300 м. Породы представлены органогенно-обломочными известняками, известняками массивными и карбонатными конгломерато-брекчиями. Главными рифостроящими организмами являлись филлоидные и сине-зеленые водоросли. Среди органических остатков наиболее характерны фрагменты криноидей, мшанок, брахиопод, гониатитов, водорослей, ругоз и гастропод. Выделены три фациальные зоны: рифовая равнина, рифовый уступ с каньонами, предрифовый склон и его подножие [3]. В южной части острова структура массива нарушена тектоническими разломами, по которым развиваются мощные (до нескольких метров) кальцитовые жилы.

Однако до настоящего времени информация о форме, особенностях состава и строения рифового массива является далеко не полной. Важность геологического изучения подобного объекта на архипелаге Новая Земля несомненна. Он имеет существенное значение как для геологического картирования в регионе, так и для уточнения прогнозной оценки нефтегазонасыщенности окружающей геологической площади. Ископаемые органогенные постройки и рифы являются индикаторами палеогеографической и палеотектонической обстановок, а значит, изучение рифового массива острова Берха позволит дополнить историю развития региона в ранне-среднекаменноугольное время.

В связи с этим целью работы являлась литолого-генетическая типизация пород рифового массива и вмещающих отложений, а также определение геохимической специализации палеобассейна на острове Берха.

Фактический материал и методика. Основой работы являются многочисленные маршрутные наблюдения В.П.Матвеева, выполненные на острове Берха (180 точек наблюдения) в процессе геологической съемки листов S-40, T-41 (1981-1985); каменный материал, в том числе около 100 шлифов и пришлифовок основных разновидностей пород. Изучение палеозойского рифового массива острова Берха базируется на методике Н.М.Задорожной [1], которая позволяет выявить тип и получить унифицированную характеристику каркасной органогенной постройки, проследить ее латеральные изменения и пространственные взаимоотношения с вмещающими отложениями.

Для достижения цели выполнен комплекс исследований:

1. Проведено оптико-микроскопическое изучение пород в шлифах и пришлифовках, выделены первичные признаки пород: вещественный состав, структура и текстура (в том числе биоморфная), микроскопические органические остатки, остатки рифостроителей, количество и состав примесей.

2. Выполнена диагностика аутигенных и акцессорных минералов методом комбинационного рассеяния света на спектрометре «Renishaw InVia Reflex» на кафедре минералогии, кристаллографии и петрографии Горного университета, а также компьютерная томография образцов на рентгеновском нанотомографе 2211 фирмы «SkyScan» на кафедре исторической и динамической геологии Горного университета.

3. Определены концентрации химических элементов в известняках методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (РСФА) в Центральной лаборатории ФГУП ВСЕГЕИ им. А.П.Карпинского. РСФА выполнялся из плавленных таблеток: проба смешивалась с флюсом (50 % метабората лития и 50 % тетрабората лития) в отношении 1:9; смесь плавилась в золото-платиновых тиглях на установке «Classe Fluxer-Bis» фирмы «Claisse Fluxer» (Канада). Анализ выполнил Б.А.Цимошенко.

4. Петрохимическая методика Я.Э.Юдовича и М.П.Кетрис [5] позволила перейти к количественной оценке процессов литогенеза.

5. Полученные результаты в сочетании с анализом смены фаций позволили создать модель строения рифового массива на острове Берха.

Литолого-генетические особенности пород рифового массива острова Берха. Комплексный анализ фактического материала показал, что остров Берха – органогенная структура высокого ранга, состоящая из разнообразных элементарных органогенных построек (калиптр, биогермов, биостромов), сложенных каркасными водорослевыми и кораллово-водорослевыми известняками, микросгустковыми известняками с многочисленными фенестрами и распространенных на значительной площади. Межрифовые пространства выполнены органогенными и органогенно-обломочными известняками. По периферии располагаются карбонатные конгломерато-брекчии, биокалькарениды, калькарениды. Мощность органогенного массива оценивается приблизительно в 700 м. Масштаб органогенной постройки, длительная история геологического развития и структурная позиция позволяют отнести ее к рифу. В его составе выделена парагенетическая ассоциация фаций: зарифовая лагуна, рифовое плато, ядро рифа, предрифовый склон (контрфорс), предриф и пинакли (рис.2). Породы, слагающие фации, представлены 12 литолого-генетическими типами.

Отнесение литотипов к различным ландшафтным зонам базируется на реконструкции таких характеристик, как динамика среды, скорость седиментации и соленость вод. При описании карбонатных пород использована классификация Р.Данхема [6], как наиболее полно отражающая не только литологический тип породы, но и способы ее образования.

Зарифовая лагуна выделена условно. Вероятно, на острове Берха существовали небольшие полузамкнутые водоемы с нарушенной соленостью в пределах рифовой платформы. Зарифовые отложения представлены микритовыми известняками с субгоризонтальной слоистостью, намечаемой плитчатым расколом.

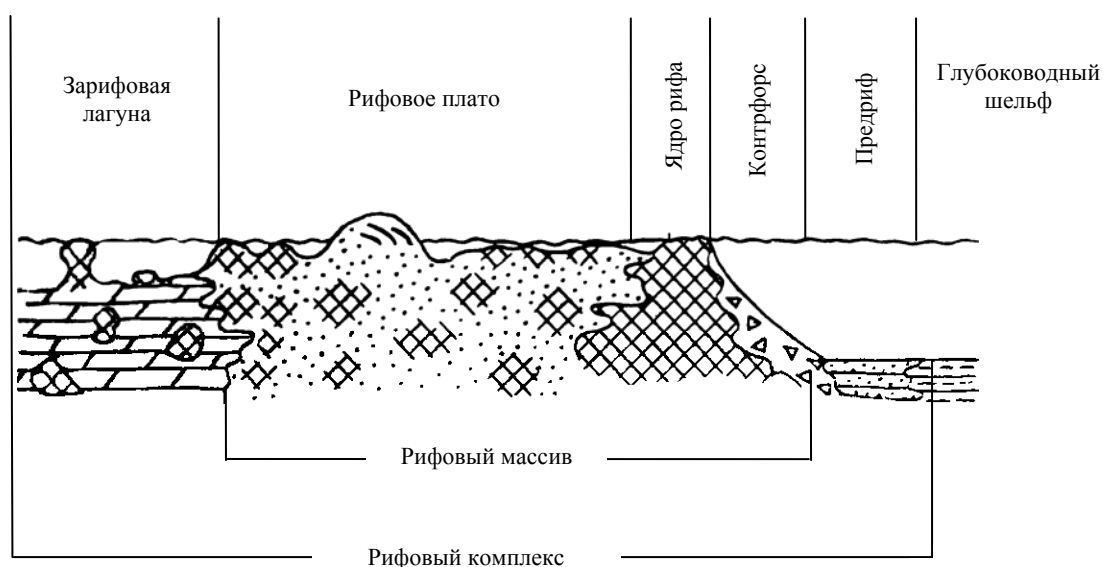


Рис. 2. Модель строения рифового массива острова Берха по Н.М. Задорожной [1] с дополнениями авторов

1-й литотип. Мадстоун – известняк темно-серый до черного, микритовый или тонкокристаллический, средне-крупноплитчатый, с пятнами и прожилками, выполненными ясно-крупнокристаллическим и параллельно-шестоватым кальцитом. Из органических остатков в известняке могут присутствовать единичные мелкие фораминиферы, остракоды, членики криноидей, обрывки мшанок и водорослей, темные микритовые сгустки и комочки. Радиально-лучистый кремень заполняет пустоты, образует желваки и стяжения, доломит ромбической формы рассеян в основной массе.

2-й литотип. Вакстоун – известняк темно-серый, серый микросгустковый, разнодетритовый до шламово-детритового. Присутствуют членики криноидей, створки остракод, фрагменты слоевищ водорослей, фораминиферы; пеллеты, редкие окатанные обломки пелитоморфного известняка. Характерна частичная перекристаллизация основной массы с укрупнением зерна, а также отчетливые инкрустации вокруг био- и литокластов.

Формирование плитчатых известняков происходило в низкодинамичной хорошо аэрируемой мелководной части морского бассейна. На это указывают микритовый состав пород и незначительное содержание терригенной примеси. Наличие субгоризонтальной слойчатости в известняках позволяет считать, что эпизоды относительно быстрого накопления микритового преимущественно карбонатного вещества многократно сменялись кратковременными седиментационными перерывами, во время которых под действием слабых волнений возникали относительно ровные межслойковые поверхности.

Рифовое плато располагается за рифовым ядром со стороны внутренней части бассейна и характеризуется устойчивым преобладанием сортированного скелетного и литокластового материала. Положение структуры указано на модели Д.К. Патрунова [3] вне площади острова и не подтверждено геологическими наблюдениями. Нами рифовое плато идентифицировано на острове Берха. Здесь широко развиты карбонатные псаммиты, гравелиты и агрегатные зерна. Литокласты, как правило, имеют микробиальную каемку, ширина которой колеблется от миллиметров до первых сантиметров. Сортировка литокластов по размеру неравномерная. Биогермные и биоморфные различия, а также слойчатость выражены в этой зоне слабо. Эти отложения формировались в условиях мелководья, на выровненной поверхности, а также в межрифовом пространстве, где накапливался органогенно-обломочный материал, забрасываемый туда интенсивными волнениями. Наиболее характерны следующие разновидности известняков: пакстоуны и флаутстоуны.

3-й литотип. Пакстоун – известняк серый водорослево-фораминиферово-детритовый, криноидный, мшанково-криноидно-водорослевый, бактериально-водорослевый, фораминиферо-микросгустковый. Многочисленны хаотично расположенные форменные элементы: микросгустки, пеллеты, фораминиферы, криноидеи, брахиоподы, гастроподы, обрывки мшанок, слоевища и трубочки водорослей, кальцисферы, обломки пелитоморфных известняков изометричной формы, окатанные и гранулированные. Наблюдается перекристаллизация в виде пятен неправильной формы и прожилков с нерезкими границами (размер кристаллов кальцита уменьшается постепенно), а также полости, заполненные крупнокристаллическим кальцитом.

4-й литотип. Флаутстоун – известняк серый, темно-серый органогенно-обломочный мшанково-брахиоподовый, криноидно-фораминиферово-мшанковый. Присутствуют многочисленные биокласты рудитовой размерности и мелкий детрит: обломки, разрозненные створки и целые раковины брахиопод, «веточки» мшанок, членики и стебли криноидей, створки остракод, фрагменты кораллов, фораминиферы, водоросли; пеллеты, а также литокласты микритового известняка изометричной формы (2-5 мм). Биокласты часто гранулированы. В полостях и цементе встречается ясно-гигантокристаллический и параллельно-шестоватый кальцит, антракосолит.

Ядро рифовой постройки распознается по гнездовым и банковым скоплениям представителей как колониальной, так и раковинной фауны среди мощных биогермных пород. Здесь рифостроители достигают наибольшего таксономического разнообразия и самых

крупных размеров. Преимущественно развиты массивные плотные водорослевые образования. При жизни рифа эта часть представляла собой рифовый край с уступами, системой желобов и рифовый гребень, расположенный в полосе волнового прибоя со стороны открытого моря. Ископаемая постройка острова Берха включает в качестве составной части своей структуры калиптры, небольшие биогермы и биостромы.

Калиптры – это мелкие постройки желвакообразной формы размером от нескольких сантиметров до первых десятков сантиметров, состоят из каркасообразующих организмов (водорослей, мшанок и кораллов). Калиптры обнаружены в точках наблюдений 723-6, 723-7, 724, 725-5, 727-1 (см. рис.1).

Биогермы – массивные ископаемые органогенные постройки, возвышающиеся над прилегающими синхронными отложениями, сложены преимущественно разнообразными водорослями, реже кораллами. Тела биогермов обнаружены в точках наблюдений 724-5, 724-11, 724-12, 723-а4.

Биостромы – массивные или слоистые ископаемые органогенные постройки, не выделяющиеся над прилегающими синхронными отложениями, состоят из водорослей, мшанок и строматолитов. Биостромы встречены в точках 723-8, 723-10, 726-11, 731-5. В точке 723-1 зафиксированы два биострома размерами 1-2 м с частыми перекристаллизованными водорослями шарообразной, эллипсоидальной формы.

Рифовое ядро острова Берха слагается каркасными известняками, для которых характерно отсутствие слоистости, пятнисто-неравномерное распределение скелетных органических остатков, кавернозность, крустификационные текстуры, гнезда и крупные полости, выполненные органогенно-обломочным материалом. Широко распространены инкрустационные корки синсидиментационного радиально-лучистого кальцита. Отчетливо выражена пятнистость массивных известняков – беспорядочное расположение светлых и темных участков.

5-й литотип. Фреймстоун – каркасный водорослевый, мшанковый, коралловый известняк. Вокруг жеод и прожилков яснокристаллического кальцита обнаружен лучистый, параллельно-шестоватый кальцит. Возможно, это инкрустация по слоевищам водорослей. Обломков мало, есть органогенный шлам, единичные криноидеи, фораминиферы, небольшие (<1 мм) стяжения кремней.

6-й литотип. Бафлстоун – известняк, первичные компоненты которого улавливались и осаждались водорослями *Calcifolium*. Микритовый матрикс частично перекристаллизован, наблюдаются ажурные спаритовые инкрустации полостей и вокруг водорослей. Присутствуют единичные фораминиферы и криноидеи, а также аллохемы эллипсоидальной формы.

7-й литотип. Байндстоун – темно-серый криноидно-водорослевый известняк. Водоросли *Suaenophyta coactilum* нередко стелются и обволакивают органические остатки, нарастают на членики криноидей. Присутствуют сомкнутые створки брахиопод, единичные фораминиферы и хорошо окатанные обломки пелитоморфного известняка.

Предрифовый склон (контрфорс) ограничивает ядро со стороны открытого моря. Фация сложена грубообломочными несортированными карбонатными конгломерато-брекчиями, образовавшимися в результате разрушения каркасных образований рифового края. Обломки представлены фрагментами черных микритовых пород и фрагментами мелководно-морских карбонатных песков. Присутствие сингенетичных карбонатных конгломерато-брекчий фиксируется юго-восточнее острова Берха на острове Личутина. Здесь они перекрыты зернистыми известняками, что указывает на распространение обломков постройки на значительное расстояние в область глубокого моря. Однако вопрос о генезисе карбонатных конгломерато-брекчий пока остается открытым. По мнению Н.Н.Соболева [3], все конгломерато-брекчии являются сингенетичными, В.П. Матвеев считает, что большая их часть имеет тектоническое происхождение [2]. В частности, по южному (мористому) краю органогенного массива проходит зона тектонического дробления, сложенная конгломерато-брекчиями (с гнездовыми вкраплениями флюорита).

Грубообломочные породы переходят в отложения с градационной сортировкой материала: органогенно-обломочные пакстоуны, грейнстоуны, рудстоуны и флаутстоуны. Фаунистические остатки представлены фрагментами мшанок, члениками криноидей, обломками раковин брахиопод, гониатитов, трубчатых водорослей, ругоз, гастропод и остракод.

8-й литотип. Пакстоун-рудстоун – известняк серый или слабо пестроцветный с зеленовато-розовым оттенком, фораминиферо-микросгустковый, водорослево-пеллетовый. В известняке встречаются многочисленные органические остатки: створки брахиопод, членики криноидей, обрывки мшанок, фораминиферы, единичные гастроподы, кораллы, нитчатые водоросли, обволакивающие пленочки, комочки и слоевища, мелкий детрит; пеллеты и сгустки (темные микритовые комочки), а также пеллетоиды пелитоморфного известняка. Форменные элементы имеют неотчетливую ориентировку вдоль длинных осей и размещаются субпараллельно. Может наблюдаться градационная слоистость от недонасыщенного биомикрита к дисмикриту. Присутствуют изометричные полости с крупнокристаллическим кальцитом.

9-й литотип. Флаутстоун-рудстоун – известняк пятнистый темно-серый, серый криноидно-мшанково-пеллоидный. Характерны четкие крупные пластины мшанок и их обломки, ругозы, водоросли (нити, трубочки и слоевища), микросгустки, пеллеты и пеллоиды, остракоды, членики криноидей, фораминиферы, фрагменты известняков: пелитоморфного микросгусткового, кластогенного микросгусткового. Нередко биокласты гранулированы. Изометричной формы полости выполнены кальцитом. Многочисленные форменные элементы рудитовой размерности, пеллеты и детрит сортированы и ориентированы субпараллельно.

Разнообразные остатки морских организмов снесены течениями с рифа и рифовой платформы. Повышенные концентрации остатков морской фауны в нижней части слоя и окатанные обрывки уплотненных донных илов указывают на механическое переотложение и гидродинамическую сортировку материала [4]. Градационная текстура и тонкая ламинационная слойчатость свидетельствуют о том, что часть материала отлагалась из взвеси во время снижения гидродинамической активности придонных вод.

Предрифовая фация на острове проявлена не выразительно. Глубоководные отложения шельфа представлены аргиллитами.

10-й литотип. Черный массивный аргиллит с неотчетливой горизонтальной слойчатостью, с единичными тонкостенными раковинами двустворок и тонкими прожилками кварца.

Пинакли – отпрепарированные карбонатные башни, которые образовались в заключительную стадию развития рифа. Это отдельные биогермы, расположенные на песчано-карбонатном морском мелководье. Сложены они фораминиферо-криноидными, преимущественно спаритовыми известняками – грейнстоунами и рудстоунами (криноидные биокалькрениты), характеризуются наличием карбонатных интракластов и незначительной доломитизацией.

11-й литотип. Грейнстоун – известняк серый массивный плотный мелко-среднекристаллический (мраморизованный) мшанково-водорослево-криноидный, фораминиферо-водорослевый, микросгустковый (слабо отмытый биоспарит, органогенный песчаник). Цемент микросгустковый и спаритовый с несортированными и неокатанными биокластами: обилие криноидей, водоросли *Calcifolium okensi*, *Girvanella*, мшанки, фораминиферы, разновеликие обломки раковин брахиопод, гастроподы, остракоды, ооиды. Спаритового цемента и илистой известковой массы примерно поровну. Встречаются окатанные обломки пелитоморфных известняков.

12-й литотип. Рудстоун – известняк инкрустированный с перекристаллизованными пеллетами, пеллоидами и редкими биокластами. Форменные элементы представлены члениками криноидей (особенно многочисленны в образце 729-1 и образуют энкринитовый известняк), створками спириферид, кустиками нитевидных водорослей, крупными гранулированными обломками известняков, близких к грейнстоуну и сгустково-комковатому известняку.

Минералого-петрографическая характеристика рифогенных известняков и вмещающих пород. С помощью рамановской спектроскопии выполнена диагностика минералов путем сравнения полученного рамановского спектра со спектрами стандартных образцов. Были изучены новообразования в наиболее распространенных на территории острова Берха литолого-генетических типах пород.

Так, в черных аргиллитах с горизонтальной слоистостью, с единичными отпечатками двустворок (образец 723-3) присутствуют тонкие (< 1 мм) короткие (1-2 см) прожилки, выполненные скрытокристаллическим веществом белого цвета. Установлена их кварцевая диагенетическая природа. В образце 738-9 – сером органогенно-обломочном пеллетово-криноидном известняке (пакстоуне), выявлены разветвленные прожилки соломенно-желтого цвета с металлическим блеском, рамановский спектр которых сопоставлен со спектром пирита. В образце 739-10 – пакстоуне-грейнстоуне детритово-водорослевым установлены диагенетические кальцитовые прожилки. В образце пакстоуна-флаутстоуна криноидно-фораминиферового 740-2 была выполнена диагностика состава раковины брахиоподы, ее перекристаллизованного мягкого тела и окружающей основной массы. По полосе построена рамановская карта и выполнено ее сравнение с оптическим изображением агрегата. Выявленная полоса соотнесена с «морским» кальцитом, что подтвердило аутигенное происхождение как цемента, так и инкрустации внутри раковины.

Компьютерная микротомография позволила визуализировать структуру образцов пород. Программное обеспечение DataViewer было использовано для визуализации пакета изображений в ортогональных сечениях с сохранением их оригинального объема и разрешения. Снимки в 3D-формате дали возможность исследовать аутигенную прожилково-вкрапленную минерализацию в известняках и аргиллитах, а также органические остатки, их ориентировку и распределение в объеме породы. Так, в структуре рифовых известняков более темные участки соответствуют менее плотной – пористой части образца. Более светлые участки отвечают плотной, непористой составляющей. Терригенная примесь отсутствует. Структура аргиллитов массивная, поровое пространство отсутствует, на снимках видны тонкие разноориентированные кварцевые прожилки.

Для проведения точного детального анализа морфометрических и плотностных характеристик компьютерных томографических моделей использован программный пакет STan. Набор эффективных, настраиваемых и программируемых инструментов позволил провести сегментацию изучаемого объекта – криноидно-фораминиферово-мшанкового водорослевого пак-флаутстоуна. На отдельных ортогональных сечениях и по всему объему образца видна система прожилков, выполненных антраксолитом. Твердый битум антраксолит внешне представляет собой черное хрупкое блестящее вещество с раковистым изломом, характеризующееся отсутствием признаков растительных тканей. Твердость колеблется от 2-3 до 4-5. Плотность 1,3-2,0 г/см³. Содержание углерода до 93 %. Антраксолит на острове Берха встречается в органогенно-обломочных известняках контрфорса и пинаклей в виде мелких включений и гнезд в пустотах и внутри раковин, выполняет прожилки в сочетании с минералами гидротермального происхождения – кальцитом и флюоритом. Антраксолит мог образоваться при контактовом воздействии гидротерм на осадочные породы, богатые органическим веществом (углистые аргиллиты), или при региональном метаморфизме битумсодержащих толщ.

Постседиментационные преобразования пород из разных фациальных зон рифового комплекса изучались в шлифах под оптическим поляризационным микроскопом. Изменение карбонатных остатков фауны в породах обычно ограничивается перекристаллизацией кальцита и частично доломитизацией.

Кальцит развивается по микротрещинам в виде прожилков, иногда в сростании с антраксолитом. Вторичный кальцит встречается в виде пятнистых включений и зон в перекристаллизованных известняках. Особенно интенсивная перекристаллизация развивается в переотложенных органогенно-обломочных известняках – грейнстоунах и рудстоунах предрифового

склона и пинаклей. Выявлен кальцит трех генераций: 1) раннедиагенетический изопакитовый цемент представляет собой параллельно-шестоватый, лапчатый агрегат по периферии полос-тей, с внутренней стороны раковин брахиопод и двустворок; 2) к центральным частям полос-тей он постепенно замещается блочно-мозаичным кальцитом; 3) цемент перекристаллизации представлен ясно кристаллическим кальцитом. В южной части острова Берха рифовый массив разрушен тектоническими трещинами, с которыми ассоциируют мощные (до нескольких мет-ров) жилы молочно-белого высокотемпературного кальцита.

Доломитовая минерализация является синхронной с образованием кальцита третьей генерации. Ромбические кристаллы доломита распределены равномерно, реже присутст-вуют в виде скоплений в карбонатном тонкозернистом матриксе мадстоунов и вакстоунов зарифовой лагуны. Средний размер зерен доломита 0,1 мм. Образование доломита связано с жизнедеятельностью микробных сообществ, которые в процессе своей жизнедея-тельности усваивали растворенный в воде углекислый газ, что вело к повышению рН мор-ской воды (> 9,5) и осаждению магниезальных соединений.

Особенности геохимической специализации палеобассейна на острове Берха в ранне-среднекаменноугольное время. По данным РСФА получена информация о содер-жаниях химических элементов (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO и др.) в 29 порошковых про-бах известняков. Поскольку карбонатное вещество осадочных пород является аутигенным, известняки хорошо отражают специфику условий осадконакопления в палеобассейне. Ли-тохимические данные обработаны по геохимическому стандарту ЮК [5] с использованием петрохимических модулей. Их средние значения приведены в таблице.

Химический состав карбонатолитов рифового массива острова Берха

Компоненты и модули	Фация				
	Платформа, n = 8	Рифовое ядро, n = 7	Контрфорс, n = 2	Пинакли, n = 5	Предриф, n = 7
SiO_2	0,19	0,02	0,02	4,08	0,04
Al_2O_3	0,43	0,21	0,19	0,59	0,14
TiO_2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$	0,64	0,61	0,61	1,25	0,61
MnO	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04
MgO	0,50	0,47	0,49	1,16	0,64
CaO	54,73	55,10	55,05	51,42	54,89
Na_2O	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
K_2O	0,03	0,01	0,01	0,06	0,01
P_2O_5	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
П.п.п	43,68	43,85	43,85	41,68	43,91
Сумма	100,39	100,46	100,41	100,45	100,44
ГМ	5,89	43,10	42,05	0,47	22,55
АМ	2,27	10,50	9,25	0,15	4,06
ТМ	0,02	0,05	0,05	0,02	0,07
ЖМ	1,54	2,92	3,31	2,16	4,20
ФМ	6,23	55,60	56,55	0,60	36,13
НКМ	0,29	0,53	0,62	0,27	0,78
ЩМ	3,81	8,712	6,90	1,75	7,69

Примечание. n – количество проб; петрохимические модули: гидролизатный модуль ГМ = $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO})/\text{SiO}_2$, алюмокремниевый модуль АМ = $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, титановый модуль ТМ = $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, железный модуль ЖМ = $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO})/(\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$, фемический модуль ФМ = $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$, нормированная щелоч-ность НКМ = $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$, щелочной модуль ЩМ = $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$.

Гидролизатный модуль использован для оценки процессов выщелачивания и гидролиза. Наибольшее значение модуля (43,10) характерно для рифового ядра – фациальной зоны, близко расположенной к суше, а следовательно, более подверженной субаэральному выветриванию. Алюмокремниевый модуль указывает на присутствие пелитовой и алевропсаммитовой фракции терригенного происхождения, поскольку глинозем и кремнезем являются некарбонатными компонентами. Высокие значения модуля (10,50) также установлены в пределах рифовой платформы, что говорит о накоплении известково-глинистых отложений в небольших полуизолированных водоемах. Повышенное содержание SiO_2 свидетельствует о поступлении кварца из области суши. Наоборот, предрифовые отложения имеют значения SiO_2 , Al_2O_3 ниже, чем в проксимальных тихоходных фациальных зонах, так как они накапливаются дальше всего от источника сноса терригенного материала. Породы рифового ядра характеризуются низкими значениями SiO_2 , Al_2O_3 и высокими показателями нормированной щелочности (0,53). Высокое значение щелочного модуля указывает на недостаток глинистого вещества в карбонатных породах. Это связано с гидродинамической активностью придонных вод, вымывавших илистый материал из межрифового пространства в предрифовую часть бассейна. Кроме того, рифовое ядро характеризуется максимальными значениями CaO (55,1), что обусловлено высокой биопродуктивностью в этой зоне.

Для предрифовой зоны характерны наиболее высокие значения железного и титанового модулей. Их пониженные значения установлены для фации контрфорса. Здесь же зафиксированы минимальные показатели нормированной щелочности. Для отпрепарированных карбонатных башенок – пинаклей характерны высокие содержания SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 и низкие показатели ГМ (0,47), АМ (0,15) и ЩМ (1,75).

Выводы

1. Рифовый массив острова Берха состоит из парагенетической ассоциации фаций, выделенных 12 литолого-генетическими типами пород.

2. Использование минералого-петрографических характеристик рифогенных известняков и вмещающих пород помогло уточнить местоположение фаций в рифовом комплексе.

3. Геохимические модули позволили перейти к количественной оценке процессов литогенеза, дать дополнительную характеристику фациальных зон и выявить обстановки субаэральной экспозиции.

4. Вторичное минералообразование: формирование кальцитовых, флюоритовых, кварцевых жил и прожилков – наиболее интенсивно проявлено в фациях контрфорса и пинаклей. Здесь же в виде прожилков, мелких включений и гнезд внутри раковин развит антраксолит. Его зональное расположение в фациях и связь с гидротермальными минералами указывает на образование при контактовом воздействии растворов на осадочные породы, богатые органическим веществом.

5. Рифовый массив развивался вблизи уреза воды и представлял собой седиментационный барьер. Вследствие разрушения известковых скелетов рифостроящих и рифолюбивых организмов формировался органогенно-обломочный материал. Его обилие в строении рифа позволяет полагать развитие донных осадков в виде шлейфов у подножия рифа. Выявление пространственно-временных закономерностей размещения обломочных шлейфов рифа может быть использовано для прогноза ловушек углеводородов.

6. Расположение органогенной постройки на бровке карбонатной платформы, латеральное замещение ее черносланцевой толщей и перекрытие карбонатно-глинистыми отложениями является признаком потенциальной нефтегазоносности данной геологической площади.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геологическая съемка в районах развития отложений с органогенными постройками: Метод. пособие по геологической съемке масштаба 1 : 50 000: Вып. 2 / ВСЕГЕИ; Н.М.Задорожная, В.В.Лавров (научн. ред.). Л.: Недра, 1982. 328 с.
2. *Матвеев В.П.* Стратиграфия и брахиоподы карбонатных отложений острова Северный архипелага Новая Земля: Автореф. дис... канд. геол.-минерал. наук / Санкт-Петербург. горный ин-т. СПб, 1998. 19 с.
3. Путеводитель экспедиции на Баренцевоморское побережье архипелага Новая земля. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2014. 82 с.
4. Циклическая и событийная седиментация / Пер. с англ.; под ред. Г.Эйнзеле, А.Зейлахера. М.: Мир, 1985. 504 с.
5. *Юдович Я.Э.* Основы литохимии / Я.Э.Юдович, М.П.Кетрис. СПб: Наука, 2000. 479 с.
6. *Dunham R.J.* Classification of Carbonate Rocks // Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull. 1962. P.8-13.

REFERENCES

1. Geologicheskaja s'emka v rajonah razvitiya otlozhenij s organogennymi postrojkami: Metod. posobie po geologicheskoj s'emke masshtaba 1:50 000 (*Geological survey in areas of sediments with organogenic structures: Teaching materials on geological survey, scale 1:50000*): Iss.2. VSEGEI; Ed. N.M.Zadorozhnaja, V.V.Lavro. Leningrad: Nedra, 1982, p.328.
2. *Matveev V.P.* Stratigrafija i brahiopody kamennougol'nyh otlozhenij ostrova Severnyj arhipelaga Novaja Zemlja (*Stratigraphy and brachiopods of carboniferous deposits of Severny Island of the Novaya Zemlya Archipelago*): Author's abstract ... PhD in Geological and Mineral Sciences. Sankt-Peterburg. gornyj in-t. St Petersburg, 1998, p.19.
3. Putevoditel' jekspedicii na Barencevomorskoe poberez'h'e arhipelaga Novaja zemlja (*Guide of the expedition to the coast of the Novaya Zemlya Archipelago in the Barents Sea*). St Petersburg: Izd-vo VSEGEI, 2014, p.82.
4. Ciklicheskaja i sobytijnaja sedimentacija (*Cyclic and event sedimentation*). Translated from English; edited by G.Einzele, A.Zeylaher. Moscow: Mir, 1985, p.504.
5. *Judovich Ja.Je, Ketris M.P.* Osnovy litohimii (*Fundamentals of lithochemistry*). St Petersburg: Nauka, 2000, p.479.
6. *Dunham R.J.* Classification of Carbonate Rocks. Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull. 1962, p.8-13.

LITHOLOGICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE REEF MASS OF OSTROV BERKHA (THE NOVAYA ZEMLYA ARCHIPELAGO)

A.B.TARASENKO, PhD in Geological and Mineral Sciences, Assistant Lecturer, etele1@ya.ru
V.P.MATVEEV, PhD in Geological and Mineral Sciences, Associate Professor, wmatveev@mail.ru
D.A.SLYADNEVA, Student, dominae.solis@gmail.com
D.V.KIRILLOVA, Student, kdv-888@mail.ru
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article contains a detailed description of twelve lithogenetic types of rocks identified in the composition of the paragenetic association of the Ostrov Berkha reef mass facies: back-reef lagoon, reef flat, reef core, fore reef slope (buttress), fore reef and pinnacles. The article provides information on the structure and texture, mineralogical-petrographic and chemical features of the reef composition and surrounding sediments.

The analysis of the structure of facies zones and features of their lateral changes allowed creating a model of the reef mass structure.

Key words: Ostrov Berkha (the island of Berkha), reef mass, lithogenetic type, authigenic minerals, petrochemical modules.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ КОМПЛЕКСА *ORTHAMBONITES PANDER* – *ORTHIS DALMAN* (БРАХИОПОДЫ) ИЗ УТРАЧЕННЫХ ОБНАЖЕНИЙ СРЕДНЕОРДОВИКСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ НА р. ПУЛКОВКЕ (ЛЕНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

М.Г.ЦИНКОБУРОВА, канд. геол.-минерал. наук, доцент, maschek@mail.ru
Д.В.БЕЗГОДОВА, младший научный сотрудник, bezgodovadaria@yandex.ru
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Авторами рассмотрен комплекс среднеордовикских ортид (брахиоподы) из утраченного обнажения на р.Пулковке (Ленинградская область).

Исходным материалом для написания статьи была крупная коллекция брахиопод из фондов Горного музея, собранная в XIX в. из серии разрезов на р.Пулковке. Разрезы представляли собой уникальные обнажения по вскрытому в них стратиграфическому интервалу в объеме от нижнего кембрия до среднего ордовика. Из описываемых отложений была собрана обширная коллекция раннепалеозойских морских беспозвоночных: брахиопод, цистоидей, больбопоритосов, пелелипод, гастропод. В середине XX в. обнажения р.Пулковки оказались утраченными в результате оползневых процессов.

Авторами был определен комплекс ортид из указанной коллекции, включающий 12 видов. Состав комплекса указывает на то, что стратиграфический интервал, из которого собраны брахиоподы, может быть определен как волховский, кундский и азериский горизонты среднего ордовика.

Ключевые слова: ортиды ордовика, брахиоподы ордовика, ордовикские отложения, Ленинградская область.

Долгое время род *Orthambonites* Pander рассматривался как молодой синоним *Orthis* Dalman [1]. Утрата типового материала не позволяла четко разобраться и полностью отождествить или разграничить первоначальные описания. В 1941 г. Г.Купер провел ревизию рода *Orthambonites* Pander и отнес к нему двояковыпуклых груборебристых ортацей. В настоящее время эти два рода различают [1], в первую очередь, по форме раковин: двояковыпуклая у *Orthambonites* Pander и от плосковыпуклой до слабо вогнуто-выпуклой у *Orthis* Dalman и по положению брахиофор: менее и широко расходящиеся брахиофоры соответственно.

Позднее В.Януссон и М.Бассет [6] провели ревизию рода *Orthambonites* и родственных ему родов, в ходе которой пересмотрели систематическое положение и значение ряда видов, в том числе *Orthambonites transversa*, рассматривающегося ранее как типовой вид рода *Orthambonites* Pander. Согласно предложению В.Януссона и М.Бассета, в качестве типового вида рода *Orthambonites* Pander следует рассматривать *Orthambonites rotunda*, а вышеупомянутый *Orthambonites transversa* считать его синонимом. Кроме того, для этой группы было выделено три новых рода (*Sulevorthis*, *Sivorthis*, *Shohonorthis*), а род *Krattorthis* был пересмотрен как родственной группе видов.

При этом род *Orthis* Dalman (волховско-кундского возраста) на территории Балтоскандии представлен типовым видом *Orthis callactis*, а для рода *Orthambonites* Pander (кундского возраста) в пределах Балтоскандии насчитывается до шести видов, рассматривающихся как местные [2] (табл.1).

В Горном музее хранится обширная коллекция органических остатков, собранных неизвестным экскурсантом в 1866 г. из одного из утраченных разрезов ордовикских отложений:

обнажения на р.Пулковке, юг Санкт-Петербурга. Образцы коллекции сопровождаются этикетками XIX в. (датировка возможна благодаря характерному для того времени бланку этикетки и ее орфографии), в которых значится их происхождение из деревни Пулково, находившейся вблизи р.Пулковки, на некоторых этикетках указан год сборов. Кроме того, к коллекции прилагается записка, дореволюционная, судя по орфографии, в которой значится: «Окаменелости, собранные неизвестным экскурсантом (вероятно, Г.П.Гельмерсеном – прим. авторов) в Санкт-Петербургской губернии из местечка Пулково». К сожалению, никакой другой сопроводительной документации к коллекции не прилагается, связать ее с какими-либо документами из архива музея на сегодняшний день не удалось, поэтому более точная атрибуция этих материалов пока невозможна [5].

Таблица 1

Характерные для территории Балтоскандии представители группы *Orthambonites* и их стратиграфическое распространение по материалам М.П.Рубеля, В.Януссона и М.Бассета [2, 6]

Род	Вид	Распространение
<i>Orthis</i> Dalman	<i>Orthis callactis</i> Dalman	Верхний волхов – нижний кунд
<i>Orthambonites</i> Pander	<i>Orthambonites calligramma</i> (Dalman)	Кунд
	<i>Orthambonites majuscula</i> Rubel	Кунд
	<i>Orthambonites fundata</i> Rubel	Кунд
	<i>Orthambonites inaequalis</i> Rubel	Кунд
	<i>Orthambonites kreklingensis</i> (Opik)	Кунд
	<i>Orthambonites novitas</i> Opik	Кунд
<i>Paralenorthis</i> Havlíček et Branisa	<i>Paralenorthis orbicularis</i> (Rubel)	Верхний волхов – нижний кунд
<i>Shoshonorthis</i> Jaanusson and Bassett	<i>Schoschonorthis? ovata</i> (Pander)	Кунд
<i>Krattorthis</i> Jaanusson and Bassett	<i>Krattorthis verneuili</i> (Rubel)	Кунд – азера

Обнажения на р.Пулковке были одним из популярнейших мест для сбора коллекций органических остатков на протяжении всего XIX в. В собраниях Горного музея хранятся коллекции Х.И.Пандера, С.С.Куторги, И.Бока, в которых имеются образцы, найденные в окрестностях Пулково. Из этой местности (и, что весьма вероятно, непосредственно из утраченных обнажений на р.Пулковке) происходит и часть голотипов, выделенных Х.И.Пандером видов брахиопод. В настоящее время многие из них утрачены.

Первые упоминания этих обнажений появляются уже в 1821 г. в работе У.Странгвейса (работа вышла на английском в 1821 г. и переведена на русский в 1830 г.), посвятившего разрезу «по реке Пулковке, вблизи деревни Большой Пулковой» отдельную статью. По словам автора, «берега реки Пулковки представляют местами весьма достопримечательные разрезы...», на участке от «верхней дороги (дорога Санкт-Петербург – Псков – прим. авторов) вниз по течению» наблюдаются «явственные разрезы известняков» [4, с.97] (рис.1, 2). Эти известняки У.Странгвейс отнес к третьей из четырех выделенных им формаций [3]. При этом он отмечал, что в карбонатной толще в береговых обрывах р.Пулковки наблюдались «неправильности», судя по описанию, под ними можно понимать гляциодислокации, аналогичные и поныне наблюдаемым в области.

В 1830 г. обнажения были описаны другим первооткрывателем геологии окрестностей Петербурга – Х.И.Пандером. В своей работе, посвященной геогнозии Российской империи [7], Х.И.Пандер приводит подробные зарисовки обнажений на р.Пулковки, по которым можно судить, что часть обнажений представляла собой ледниковые отторженцы (рис.3). На валунных суглинках верхней формации (плейстоценовой морене) Х.И.Пандер показывает залегание известняков ордовика. Подобные отторженцы есть в Ленинградской области.

Полоса выходов ордовикских отложений расположена к югу от Санкт-Петербурга, с севера она ограничивается Балтийско-Ладожским глинтом.

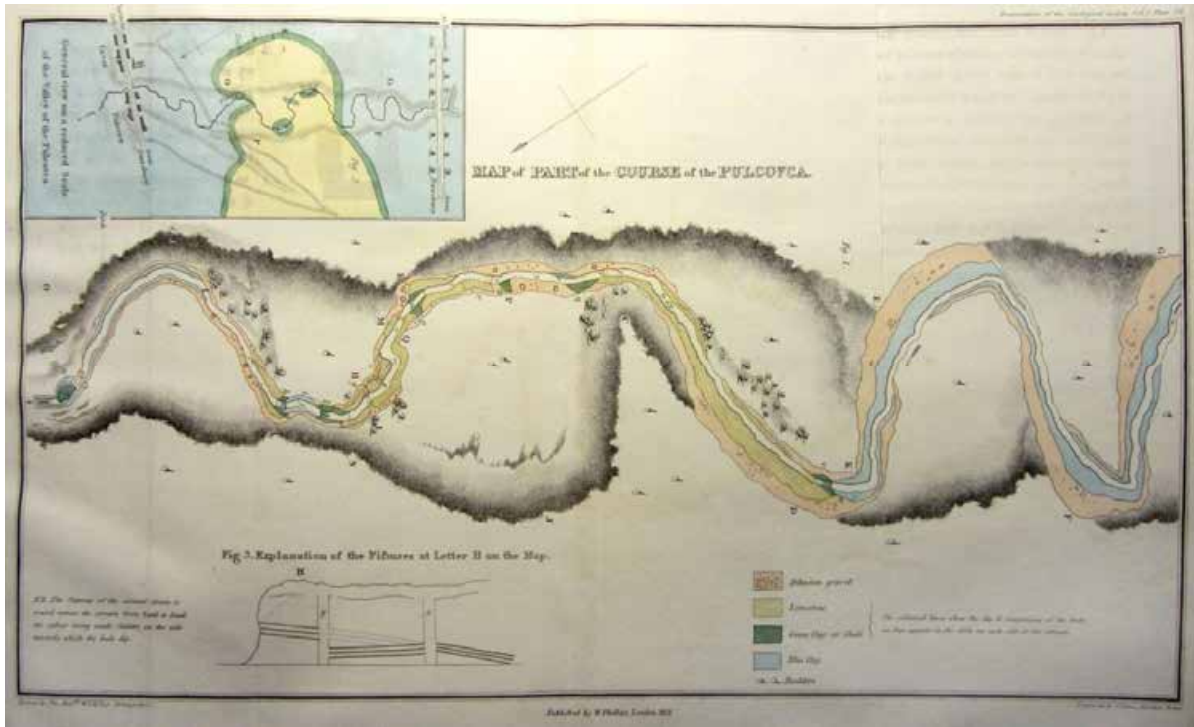


Рис.1. Карта участка долины р.Пулковки в районе дер. Пулково из работы У.Странгвейса, 1830 г. [4]



Рис.2. Зарисовка обнажений в обрывах берегов р.Пулковки из работы У.Странгвейса, 1830 г. [4]

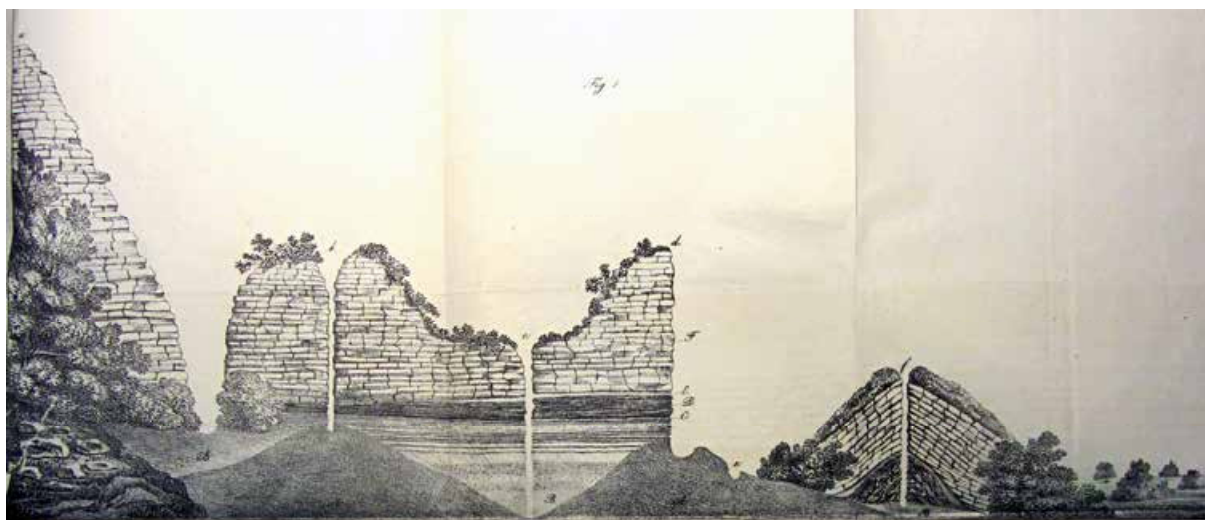


Рис.3. Зарисовка обнажений в обрывах берегов р.Пулковки из работы Х.И.Пандера, 1830 г. [7]

Нижнеордовикские отложения, распространенные в области, представлены преимущественно терригенными породами. Средняя и верхняя часть разреза – карбонатная. Вблизи предглинтовой полосы (где и располагаются Пулковские высоты) развиты отложения среднего ордовика. В них выделяются волховский, кундский, азериский, ласнамягский и ухакусский горизонты.

В коллекции органических остатков из окрестностей Пулково [8] представлены раковины и разрозненные створки брахиопод, теки цистоидеи и эокриноидеи, единичные панцири трилобитов, ядра цефалопод и гастропод. Преобладание среди фауны брахиопод следующих видов: *Orthambonites calligramma*, *Lycophoria nucella*, *Productorthis obtusa*, *Platystrophia dentate*, *Christiania oblonga*, – указывает на волховско-азериский возраст отложений, вскрывавшихся в долине р.Пулковки (табл.2).


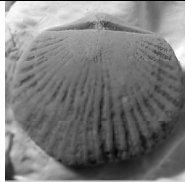









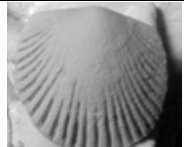


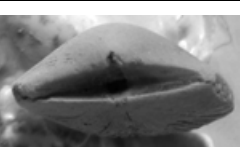
Таблица 2

Данные по стратиграфическому распространению видов ортид, определенных авторами в коллекции Горного музея из обнажений на р.Пулковке [2, 6]

Вид брахиопод	Волховский	Кундский	Азериский	Ласнамягский
<i>Orthambonites calligramma</i> (Dalman)		+	+	
<i>Orthis callactis</i> Dalman		+		
<i>Glossorthis ? tetragona</i> (Pander)			+	
<i>Schoschonorthis ? ovata</i> (Pander)		+		
<i>Productorthis obtuse</i> (Pander)	+			
<i>Lycophoria nucella</i> Dalman	+	+		
<i>Platystrophia dentata</i> (Pander)		+		
<i>Porambonites trigonus</i> Pander	+			
<i>Porambonites planus</i> Pander	+			
<i>Porambonites intercedens</i> Pander	+			
<i>Clitambonites adscendens</i> Pander		+	+	
<i>Christiania oblonga</i> Pander			?	+

При этом группа *Orthambonites* Pander – *Orthis* Dalman представлена следующими видами (табл.3): *Orthambonites calligramma*, *Orthis callactis*, *Glossorthis? tetragona*, *Schoschonorthis? ovata*. В то время как два первых вида являются типичными представителями сообществ среднеордовикских ортацей Ингрии, стратиграфическое распространение видов *Glossorthis? tetragona*, *Schoschonorthis? ovata* на данный момент так и не изучено.

Группа *Orthambonites* Pander – *Orthis* Dalman

<i>Orthambonites calligramma</i> (Dalman)				
<i>Orthis callactis</i> Dalman				
<i>Glossorthis? tetragona</i> (Pander)				
<i>Schoschonorthis? ovata</i> (Pander)				

Систематическое положение вида *Glossorthis? tetragona* является спорным, в том числе из-за крайней недостаточности материала и отсутствия работ по изучению внутреннего строения этой формы. Вид впервые был описан Х.И.Пандером (1830 г.) как *Orthambonites tetragona*. Согласно очень краткому диагнозу автора, представители вида характеризовались «субпараллельными боковыми краями, слабо выпуклой нижней створкой и 22 ребрами».

А.А.Опик в работе 1939 г. и Т.Н.Алихова в монографии 1953 г. [1] рассматривали этот вид как синоним *Orthambonites rotundata*. Позднее М.П.Рубель [2] трактовал *Glossorthis tetragona* как самостоятельный вид.

Вид *Schoschonorthis? ovata* ранее рассматривался в составе рода *Gonambonites* (Pander, 1830). В.Януссон и М.Бассет, проанализировав имеющиеся в изучаемых у них коллекциях два экземпляра из утраченных обнажений р.Пулковки с изображениями Х.И.Пандера, пересмотрели систематическое положение этого вида. К сожалению, в работе Х.И.Пандера приводились только краткие диагнозы выделяемых им видов и в реви-зионной работе В.Януссона и М.Бассета переописания вида сделано также не было. Однако при сравнении изображений формы, описанной В.Януссоном и М.Бассетом как *Schoschonorthis? ovata* (табл.6, фиг.4-5), с *Gonambonites? ovata* Пандера (табл.XVI, фиг.7) видны некоторые отличия:

– формы, описанные В.Януссоном и М.Бассетом, слабо двояковыпуклые с менее выпуклой спинной створкой, в то время как на изображениях, приведенных Х.И.Пандером, видна раковина со значительно выпуклыми обеими створками, причем спинная створка более выпуклая;

– арча брюшной створки *Schoschonorthis? ovata*, по В.Януссону и М.Бассету, хорошо выраженная треугольная, умеренно высокая, в то время как на иллюстрациях Х.И.Пандера арча очень низкая и, скорее всего (иллюстрации Х.И.Пандера для этих форм не позволяют однозначно судить о форме их арчи), линейная.

Формы, определенные авторами по внешнему облику, ближе к формам, диагностируемым В.Януссоном и М.Бассетом как *Schoschonorthis? ovata*, однако авторам кажется достаточно спорным утверждение об их тождественности *Gonambonites? ovata* Х.И.Пандера.

Изучение рассмотренной здесь коллекции беспозвоночных может дать дополнительный материал и расширить наши представления о стратиграфическом интервале и фаунистической охарактеризованности ордовикских отложений приглинтовой полосы Ленинградской области, большая часть которых на данный момент утрачена.

Кроме того, описываемую коллекцию в силу ее достаточно большой полноты можно рассматривать как ценнейший источник для выбора возможных неотипов тех видов, голотипы которых не сохранились.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алихова Т.Н. Руководящая фауна брахиопод ордовикских отложений северо-западной части Русской платформы. М.: Госгеолгиздат. 1953. 164 с.
2. Рубель М.П. Нижнеордовикские брахиоподы надсемейств Orthacea, Dalmanellacea и Syntrophiacea Восточной Балтики // Тр. Геол. ин-та Таллина. 1961. № 6. С.141-226.
3. Странгвейс У. Геогностическое описание Санктпетербургских окрестностей // Тр. Минералогического общества. СПб, 1830. Т.1. С.1-96.
4. Странгвейс У. Описание стланей, видимых по речке Пулковке, вблизи деревни Большой Пулковой, находящейся в окрестностях Санктпетербурга // Тр. Минералогического общества. 1830. Т.1. С.97-110.
5. Цинкобурова М.Г. О палеонтологической коллекции из утраченных обнажений среднего ордовика окрестностей Пулково (Ленинградская область) в собрании Горного музея / М.Г.Цинкобурова, Д.В.Безгодова // Объекты палеонтологического и геологического наследия. Кунгур. 2013. С.127-128.
6. Jaanusson V. Orthambonites and related Ordovician brachiopod genera / V.Jaanusson, M.Basset // Palaeontology. 1993. Vol.36. № 1. P.21-63.
7. Pander Ch. Beitrage zur Geognosie d. Russischen Reichs / Gedruckt bei K.Krav. St Petersburg, 1830. P.165.
8. Tsinkoburova M. About peculiarities of the complex of *Orthambonites* Pander – *Orthis* Dalman of lost outcrops on the Pulkovka river (Leningrad region) / M.Tsinkoburova, D.Bezgodova // Geologija. 2014. Vol.56, 1(85). P.40.

REFERENCES

1. Alikhova T.N. Rukovodjashhaja fauna brahiopod ordovikskih otlozhenij severo-zapadnoj chasti Russkoj platformy. (The typical Ordovician brachiopod fauna of the Ordovician of the NW Russian plate). Moscow: Gosgeolizdat. 1953, p.164.
2. Rubel M.P. Nizhneordovikskie brahiopody nadsemejstv Orthacea, Dalmanellacea i Syntrophiacea Vostochnoj Baltiki (The Lower Ordovician brachiopods of the superfamilies Orthacea, Dalmanellacea and Syntrophiacea of the Eastern Baltic region). Tr. Geol. in-ta Tallina. 1961. N 6, p.141-226.
3. Strangways W. Geognosticheskoe opisanie Sanktpeterburgskih okrestnostej (The geological description of the St Petersburg area). Tr. Mineralogicheskogo obshhestva. St Petersburg. 1830. Vol.1, p.1-96.
4. Strangways W. Opisanie stlanej, vidimyh po rechke Pulkovke, vblizi derevni Bol'shoj Pulkovoj, nahodjashhejsja v okrestnostjakh Sanktpeterburga (Description of strata in the Brook Pulcovca near the Village of Great Pulcovca, in the neighbourhood of St Petersburg). Tr. Mineralogicheskogo obshhestva. St Petersburg. 1830. Vol.1, p.97-110.
5. Tsinkoburova M., Bezgodova D. O paleontologicheskoi kollekcii iz utrachennykh obnazhenij srednego ordovika okrestnostej Pulkovo (Leningradskaja oblast') v sobranii Gornogo muzeja (The paleontological collection from the lost outcrops of the Middle Ordovician of Pulkovo area (Leningrad region) in the Mining Museum). Ob"ekty paleontologicheskogo i geologicheskogo nasledija. Kungur. 2013, p.127-128.
6. Jaanusson V. & Bassett M. Orthambonites and related Ordovician brachiopod genera. Palaeontology. 1993. Vol.36, N 1, p.21-63.
7. Pander Ch. Beitrage zur Geognosie d. Russischen Reichs (On the geology of the Russian Empire). St Petersburg. 1830, p.165.
8. Tsinkoburova M., Bezgodova D. About peculiarities of the complex of *Orthambonites* Pander – *Orthis* Dalman of lost outcrops on the Pulkovka river (Leningrad region). Geologija. 2014. Vol.56, 1 (85), p.40.

ON THE FEATURES OF THE COMPLEX *ORTHAMBONITES* PANDER – *ORTHIS* DALMAN (BRACHIOPODA) OF THE LOST OUTCROPS ORDOVICIAN SEDIMENTS ON THE RIVER PULKOVKA (LENINGRAD REGION)

M.G.TSINKOBUROVA, *PhD in Geological and Mineral Sciences, Associate Professor, maschek@mail.ru*

D.V.BEZGODOVA, *Junior Research Scientist, bezgodovadaria@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article analyses a complex of the Ordovician's orthida (brachiopoda) of the lost outcrops on the river Pulkovka in Leningrad region.

Some samples from a large collection of brachiopods in the holdings of the Mining Museum are analysed. These samples were collected in the XIX century from some outcrops on the river Pulkovka. The geological sections there were unique outcrops due to a stratigraphic interval from the Lower Cambrian to Middle Ordovician found in them. Many early Palaeozoic marine invertebrates, such as brachiopods, cystoideas, bolboporits, pelecypods, gastropods, were collected from these sediments. In the middle of the XX century the outcrops on the river Pulkovka were lost as a result of landsliding processes.

The authors have identified an orthida's complex in the collection, comprising 12 species. The structure of the complex indicates that the stratigraphic interval, from which brachiopods were collected, can be defined as Volkhov, Kund, Azery horizons of the Middle Ordovician.

Key words: Ordovician orthida, Ordovician brachiopods, Ordovician sediments, Leningrad Region.

РОЛЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ОБРАЗОВАНИИ МЕТАНА НА УГОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ МАОХЕ (СЕВЕРНЫЙ ВЬЕТНАМ)

С.М.СУДАРИКОВ, *д-р геол.-минерал. наук, профессор, sergei_sudarikov@mail.ru*

НГУЕН ТАТ ТХАНГ, *аспирант, sergei_sudarikov@mail.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена роль подземных вод в формировании метана угольных месторождений Северо-Востока Вьетнама на примере месторождения Маохе. Определены основные геохимические процессы, происходящие при фильтрации подземных вод в угольном пласте.

Ключевые слова: уголь, подземные воды, геохимический процесс, образование метана.

Введение. Рост добычи угля сопровождается не только повышением масштабов воздействия на окружающую среду, но и появлением новых факторов, влияющих на наше представление об использовании природных ресурсов. Процесс добычи угля сопровождается резким увеличением взаимодействия в системе природная вода – уголь – вмещающие породы. Химические реакции в водной среде образуют новые вещества, в том числе метан, тесно связанный с подземными водами [1-5]. Пока остаются недостаточно изученными процессы кинетики образования, выделения и выброса метана из угольного пласта. Выброшенный метан и уголь распространяются по шахтным выработкам, нарушают вентиляцию, разрушают выработки и часто являются причиной взрывов, обрушений пород и пожаров в шахтах.

С другой стороны, с углем как нетрадиционным резервуаром связаны огромные ресурсы газа, однако технологии добычи такого газа пока отработаны мало. Ряд стран уже ведут добычу метана из угольных пластов. Так, Китай в 2013 г. планировал добывать 10 млрд м³ этого газа. Ведется работа в США, Австралии и ряде других стран. В настоящее время на Талдинской площади ООО «Газпром добыча Кузнецк» начата опытно-промышленная добыча метана. Наряду с экономическим эффектом от использования метана, добыча газа из угольных пластов также позволяет обезопасить будущую разработку углей – снижение природной газоносности углей позволяет впоследствии вести их добычу без применения шахтной дегазации, что, в свою очередь, ведет к экономии затрат.

На основании исследований по геохимии подземных вод угольных месторождений установлено, что одним из факторов, определяющих интенсивность воздействия, является геохимия угольной толщи, которая в зависимости от условий образования месторождения имеет существенные различия. В данной работе рассматриваются основные геохимические процессы при фильтрации воды в угольном пласте, приводящие к генерации метана на примере месторождения Маохе, типичного для Северного Вьетнама. Построение гидрогеохимической модели является необходимым этапом для проведения математического термодинамического моделирования.

Некоторые особенности геологического строения месторождения. Угленосная толща месторождения Маохе, как и большинства других месторождений данного района, имеет ритмичное строение. Между угольными пластами обычно последовательно залегают карбонатные породы (известняки, реже – доломиты, мергели), обломочные (аргиллиты, сланцы, глины, суглинки), алевролиты (супеси), песчаники (пески) и далее в обратной последовательности.

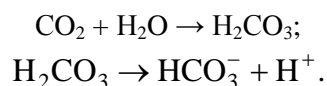
Ритмы могут быть неполными, размытыми. Пески и песчаники составляют 20-80 % объема угленосной толщи, глинистые породы занимают второе место. Известняки имеют подчиненное значение и, как правило, составляют незначительную часть разреза, сопоставимую с углями.

В углях и вмещающих породах отмечены следующие элементы, содержание которых превышает 1 %: углерод, водород, кислород, азот, связанные в основном с органическим веществом; кремний, алюминий, железо, кальций, магний, калий, натрий, составляющие, главным образом, минеральную часть, и сера, занимающая промежуточное положение.

Гидрогеохимическая модель формирования состава подземных вод угольного месторождения. Схема метаморфизации природных вод в серии последовательных процессов, начиная с поступления атмосферных осадков на поверхность Земли и далее при фильтрации в погружающемся угольном пласте месторождения, приведена на рисунке. Основные гидрогеохимические процессы в угольном пласте и на контакте с ним были перечислены нами ранее [1]. Здесь приводится их более подробная характеристика с учетом гипотетического влияния на метанообразование.

Растворение солей, минералов. Подземные воды месторождения Маохе богаты растворенным гидрокарбонат-ионом (до 360 мг/л), появление которого прежде всего связано с растворением карбонатов насыщенными кислородом инфильтрующимися водами, содержащими до 80 мг/л CO_2 биогенного происхождения.

1. *Поступление CO_2 из почвы и понижение pH.* Из почвы в подземные воды поступает CO_2 биогенного происхождения и растворяется в воде, формируя слабую кислоту H_2CO_3 . Диссоциация H_2CO_3 приводит к появлению катиона H^+ и повышению кислотности:



2. *Растворение карбонатов (кальцита, доломита).* Катионы H^+ в подземной воде реагируют с карбонатами с образованием гидрокарбонат-иона. Биогенный CO_2 также участвует в растворении карбонатов:

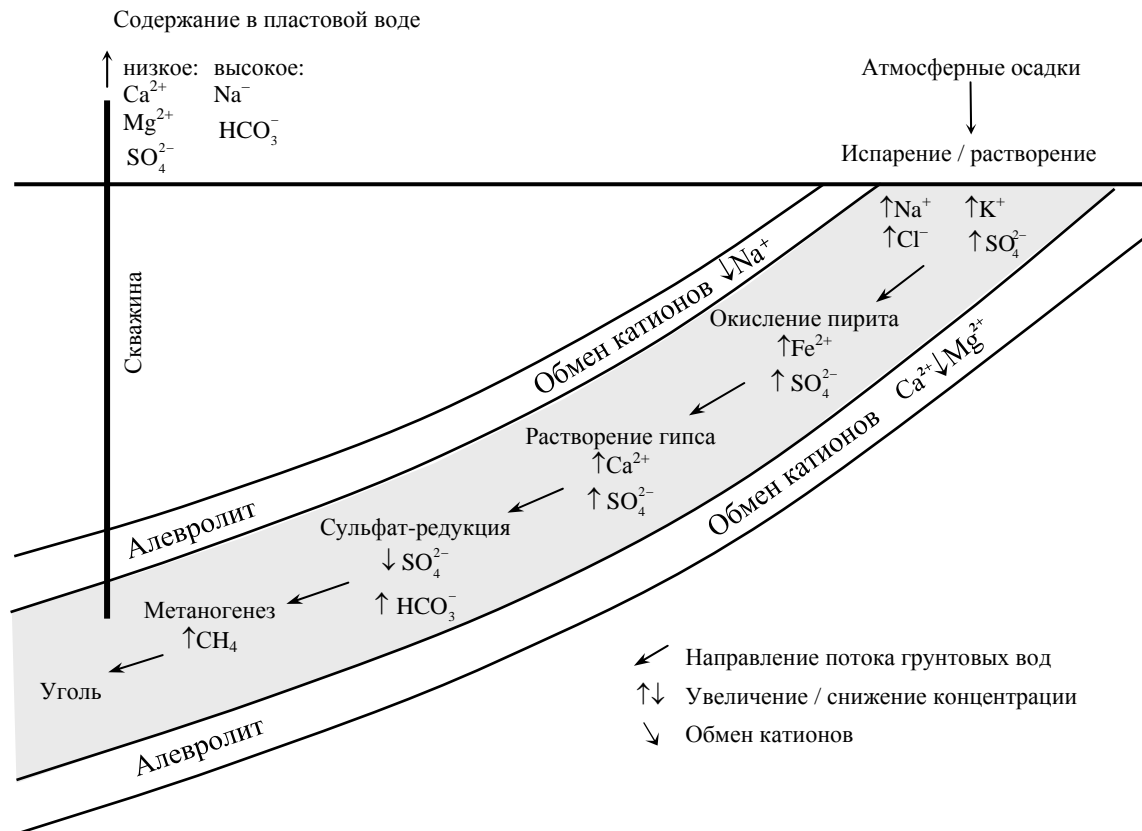
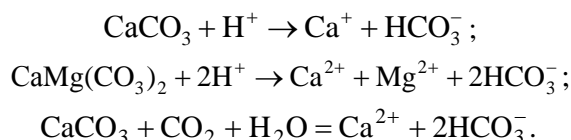
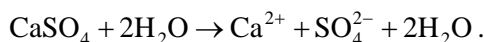


Схема протекания геохимических процессов при фильтрации воды в угольном пласте [1]



3. *Растворение сульфатов.* На втором месте среди анионов в водах угольного месторождения находится сульфат-ион. Наиболее характерными минералами, образующимися в зоне аэрации месторождения при испарительном концентрировании в климатических условиях Вьетнама, являются гипс и галит. Растворение этих минералов может приводить к поступлению ионов хлора и сульфатов:

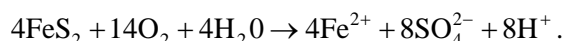


Растворение гипса теоретически могло бы привести к концентрациям сульфат-иона в воде до 500 мг/л и более, однако наблюдаются гораздо меньшие концентрации в водах месторождения (до 20 мг/л) как в сезон дождей, так и в сухой период года, что может быть связано с ничтожными концентрациями гипса в углях и вмещающих породах. Происхождение сульфат-иона скорее всего в большей степени связано с окислением сульфидов.

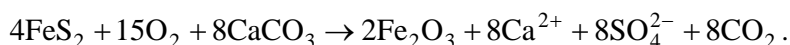
Окисление сульфидов. Железо содержится в углях в количестве 0,6-3,8 % при среднем значении 1,5 %. Оно играет значительную роль в окислительно-восстановительных процессах, влияет на миграцию ряда элементов, является катализатором процессов преобразования органических веществ.

На долю сульфидной серы приходится около половины валового ее содержания. Наиболее распространены в углях сульфиды (железа пирит, реже марказит) и тонкодисперсная метакolloидная разновидность этих минералов мельниковит ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}\text{S}_4$). Содержание сульфидов в углях составляет 0,02-6,5 %. Происхождение сульфидной серы может быть связано с деятельностью сульфатвосстанавливающих бактерий. Щелочная среда способствует переработке сульфат-иона в сероводород и образованию пирита. Кислая среда тормозит деятельность бактерий.

При окислении пирита образуются сульфаты двухвалентного железа и серная кислота. При отсутствии минералов, способных нейтрализовать серную кислоту (например, карбонатов), водородный показатель формирующихся сульфатных вод снижается:

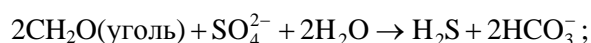


В присутствии кальцита двухвалентное железо окисляется до трехвалентного, которое, в свою очередь, является сильным окислителем сульфидов:

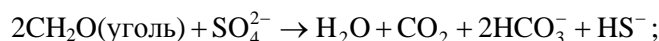


Сульфат-редукция. Появление в воде сульфат-иона в результате процессов окисления сульфидов и наличие органического вещества, связанного с углями, создает условия для протекания сульфат-редукции. Следует отметить, что метан не образуется в водах угольных пластов со значительными концентрациями сульфат-иона [5]. Обычно воды угольного пласта при отсутствии метана характеризуются высокими концентрациями сульфат-иона и различными концентрациями кальция и магния. Особенно очевидно это для концентраций сульфат-иона более 10 мг-экв/л (~500 мг/л).

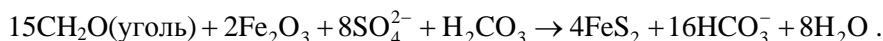
Анаэробные условия глубоких частей разреза приводят к восстановлению сульфатов. Этот процесс уменьшает концентрацию сульфатов и увеличивает содержание гидрокарбонат-иона. Источником органического углерода можно представить суббитуминозные разности угля в виде CH_2O . При $\text{pH} < 7$



при $\text{pH} > 7$

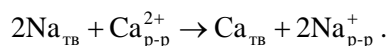


в присутствии железа



Как и в других бассейнах, где угли стратиграфически ассоциируют с морскими отложениями, хлорид и натрий являются постоянными компонентами в подземных водах. Однако в эквивалентных концентрациях натрий заметно превосходит хлорид-ион. Это говорит о том, что растворение галита не является ведущим процессом накопления натрия в подземных водах. Поступление натрия в наблюдаемых количествах может быть связано с обменными процессами.

Ионный обмен. Процессы катионного обмена приводят к поступлению в подземные воды натрия из глинистых пород вмещающей толщи при взаимодействии с кальциевыми водами и выносу кальция, который переходит в поглощенное состояние:

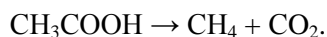


Окислительно-восстановительные процессы и образование метана. В условиях бескислородной среды, низких концентраций сульфат-иона, органического вещества (в данном случае угля), метаногенных бактерий, оптимальных условий температуры, а также наличия пространства *in situ* [4] образуется биогенный метан. Некоторые исследования показывают, что генерация метана происходит одновременно с сульфат-редукцией, в зависимости от присутствия метаногенных видов [3].

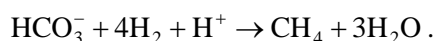
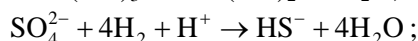
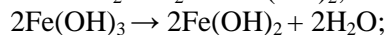
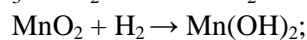
Анаэробное окисление углей с помощью бактерий является сложным многоступенчатым процессом [1, 2]. На первой стадии бактерии переводят твердое органическое вещество в органические кислоты с низкой молекулярной массой и водород. Схема процесса на примере этана:



Далее другие микроорганизмы окисляют органические кислоты до CO_2 , а водород становится добычей значительной группы окисляющих бактерий. Таким образом, важным направлением образования метана является расщепление ацетатов:



Кроме того, в результате серии процессов, последовательность которых определяется потенциальной энергией, извлекаемой бактериями [2], происходит образование метана. Очередность процессов с участием бактерий: восстановление нитратов и оксидов марганца, восстановление оксидов железа, затем сульфатов и, наконец, гидрокарбонат-иона.



Заключение. В результате проведенного исследования определены основные геохимические процессы при фильтрации воды в угольном пласте, в различной степени влияющие на образование метана, на примере месторождения Маохе, типичного для Северного Вьетнама: растворение карбонатов с участием биогенного диоксида углерода; растворение солей, образующихся при испарительном концентрировании; окисление сульфидов; катионный обмен; сульфат-редукция. При этом основными механизмами образования метана, по-видимому, являются окислительно-восстановительные процессы с участием бактерий.

Предлагаемая модель может служить также ориентиром при рассмотрении процессов, происходящих на угольных месторождениях при добыче метана угольных пластов. Рассмотренные природные процессы должны многократно усилиться при искусственном заводнении месторождений. Поскольку установлено, что метан не образуется в водах угольных пластов со значительными концентрациями сульфат-иона (более 10 мг-экв/л или ~500 мг/л), этот показатель, наряду с низкими концентрациями кальция и магния, может служить в будущем поисковым ориентиром при оценке площадей, перспективных для организации промышленной добычи угольного метана. Обычно воды угольного пласта при отсутствии метана характеризуются высокими концентрациями сульфат-иона и заметными концентрациями кальция и магния.

Разработанная гидрогеохимическая модель является необходимой основой для проведения математического термодинамического моделирования. Результаты моделирования могут быть использованы как при решении геоэкологических задач, так и при проектировании и организации добычи угольного метана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Судариков С.М. Гидрогеохимические процессы при фильтрации воды в угольных пластах месторождений северо-востока Вьетнама / С.М.Судариков, Нгуен Тат Тханг // Известия Юго-Западного гос. ун-та. Серия Техника и технологии. 2013. № 1. С.234-237.
2. Brinck E.L. The Geochemical Evolution of Water Coproduced with Coalbed Natural Gas / E.L.Brinck, J.I.Drever, C.D.Frost // Environmental Geosciences. 2008. Vol.15. N 4. P.153-171.
3. Oremland R.S. Methane production and simultaneous sulfate reduction in anoxic, salt marsh sediments / R.S.Oremland, L.M.March, S.Polcim // Nature. 1982. Vol.296. P.143-145.
- 4 Rice D.D. Generation, accumulation, and resource potential of biogenic gas / D.D.Rice, G.E.Claypool // AAPG Bulletin. 1981. Vol.65. P.5-25.
5. Van Voast Wayne A. Geochemical signature of formation waters associated with coalbed methane // AAPG Bulletin. 2003. Vol.87. N 4. P.667-676.

REFERENCES

1. Sudarikov S.M., Nguen Tat Tkhang. Gidrogeokhimicheskie protsessy pri fil'tratsii vody v ugol'nykh plastakh mestorozhdenii severo-vostoka V'etnama (*Hydrogeochemical processes during water filtration in coalfields of the North-East Vietnam*). Izvestia Yugo-Zapadnogo gos. un-ta. Seriya Tekhnika i tekhnologii. 2013. N 1, p.234-237.
2. Brinck E.L., Drever J.I., Frost C.D. The Geochemical Evolution of Water Coproduced with Coalbed Natural Gas. Environmental Geosciences. 2008. Vol.15. N 4, p.153-171.
3. Oremland R.S., March L.M., Polcim S. Methane production and simultaneous sulfate reduction in anoxic, salt marsh sediments. Nature. 1982. Vol.296, p.143-145.
- 4 Rice D.D., Claypool G.E. Generation, accumulation, and resource potential of biogenic gas. AAPG Bulletin. 1981. Vol.65, p.5-25.
5. Van Voast Wayne A. Geochemical signature of formation waters associated with coalbed methane. AAPG Bulletin. 2003. Vol.87. N 4, p.667-676.

THE ROLE OF GROUNDWATER IN METHANE FORMATION IN THE COAL FIELD OF MAOHE (NORTH VIETNAM)

S.M.SUDARIKOV, *Dr. of Geological and Mineral Sciences, Professor, sergei_sudarikov@mail.ru*
NGUEN TAT THANG, *Postgraduate student, sergei_sudarikov@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article deals with the role of groundwater in methane formation in coal fields of North-East Vietnam using the example of Maohe deposit. Main geochemical processes during groundwater filtration in a coal bed are determined.

Key words: coal, groundwater, geochemical process, methane formation.

ЭКСПРЕСС-ОТКАЧКИ КАК СПОСОБ ВЫЯВЛЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБВОДНЕННОЙ ТОЛЩИ С ВНЕШНЕЙ СРЕДОЙ

Д.Л.УСТЮГОВ, канд. геол.-минерал. наук, доцент, *ustiugov@mail.ru*

Д.П.МИРОНЧУК, аспирант, *dpmironchuk@gmail.com*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Для районов с высокой степенью освоённости ресурсов подземных вод, множеством мелких и средних водозаборов с переменным дебитом удобным методом подсчета запасов является численное моделирование. Применение численного моделирования требует наличия достоверных сведений о фильтрационных параметрах целевого водоносного горизонта, а также о его граничных условиях, т.е. о характере связи с внешней средой. Методы определения фильтрационных параметров хорошо разработаны, включая графоаналитический метод, обязательный для применения, однако установление граничных условий связано с определенными сложностями. В работе показано, что достоверные сведения о характере взаимодействия водоносных горизонтов с вмещающей средой в определенных условиях могут быть получены при интерпретации экспресс-откачек.

Ключевые слова: гидрогеология, подсчет запасов, численное моделирование, граничные условия, откачка воды, графоаналитический метод.

В течение последних 20 лет характер разработки запасов подземных вод в некоторых районах Ленинградской области значительно изменился. До конца 80-х годов XX в. весь водоотбор был сосредоточен на ряде крупных водозаборов, к настоящему же времени многие из этих водозаборов были выведены из эксплуатации (что привело к снятию с государственного учета запасов на нескольких участках Рощинского месторождения). Их место было занято большим количеством мелких водозаборов (преимущественно для индивидуального водоснабжения), рассредоточенных по территории. Кроме того, был практически свернут отбор вод вендского водоносного комплекса на территории Санкт-Петербурга, где они ранее использовались для систем охлаждения на промышленных предприятиях. Данные процессы привели к перераспределению напоров вендского водоносного комплекса, формированию уклона пьезометрической поверхности на север и постепенной миграции депрессионной воронки также в северном направлении. В сложившихся обстоятельствах применение традиционных методов подсчета запасов (гидродинамического в сочетании с гидравлическим) резко затрудняется, поскольку требуется учет взаимодействия всех вновь введенных в строй водозаборов, а также изменения в распределении напоров.

В таких условиях оптимальным решением представляется создание постояннодействующей модели вендского водоносного комплекса при условии ее регулярной актуализации с использованием данных Территориальной службы мониторинга о водоотборе на всех эксплуатируемых водозаборах. Данная модель должна иметь региональный масштаб и включать центральный и южный районы Карельского перешейка – область распространения вендского водоносного комплекса, где изменились водоотборы. Предполагается, что в 2016 г. создание данной модели будет включено в перечень объектов, финансируемых за счет средств федерального бюджета.

Необходимым условием создания геофильтрационных моделей является получение достоверных сведений о распределении фильтрационных параметров в пределах области фильтрации, а также условий ее взаимодействия с внешней средой, т.е. определение типа граничных условий*. Выполнение данного условия в рамках вышеупомянутого

* Yang X.-Sh. Mathematical modelling for Earth sciences. Edinburgh: Dunedin Academic Press Ltd, 2008, p.310.

объекта реализуется посредством изучения архивных материалов и проведения ряда опытно-фильтрационных работ на скважинах, расположенных в зонах выклинивания вендского водоносного комплекса.

Опытно-фильтрационные работы на водозаборе, приближенном к зоне выклинивания вендского водоносного комплекса, проводились ОАО «ПКГЭ» в 2011 г. в рамках поисково-оценочных работ для водоснабжения дачного некоммерческого партнерства (ДНП) «Старорусское». Данный водозабор по сведениям, полученным в ходе геологического доизучения площади листов Р-35-XXIX, XXX, XXXIII-XXXVI, Р-36-XXV, XXXI, приурочен к линзе вендских образований мощностью до 50 м и размерами в плане $8 \times 1,2$ км, простирающейся параллельно длинной оси оз. Красавица с востока от него. Линза была закартирована и заверена наземными геофизическими работами, а также бурением, выполненными М.Н.Афанасовым в 2002 г.

Вендские песчаники на границе линзы латерально сменяются относительно водоупорными московскими и осташковскими отложениями, преимущественно сложенными валунными суглинками с прослоями песков и супесей.

Водозабор ДНП «Старорусское» состоит из одиночной скважины № 1743/07 (регистрационный номер 1251 (Р-35-Г)), пробуренной в 2006 г. ООО «Балтийская буровая компания». Скважина пробурена на глубину 71 м и вскрывает вендский водоносный комплекс на глубине 40 м.

В интервале +0,2-7,0 м в скважину опущена обсадная колонна диаметром 274 мм, а в интервале +0,5-40,0 м – диаметром 168 мм. В целях изоляции водоносного горизонта обе колонны зацементированы на всю длину.

Фильтровая колонна диаметром 127 мм установлена в интервале 37,5-71,0 м. Рабочие части фильтра перфорированные, приурочены к интервалам залегания наиболее водообильных песчаных прослоев, выделенных посредством резистивиметрии, а именно: 49,2-52,4; 56,9-59,8 и 64,3-67,3 м. Сальник (на глубине 40,0 м) представляет собой цилиндр древесины высотой 30 см с внутренним диаметром 127,0 мм и наружным 153 мм. Перемещения сальника ограничены приваренными к трубе металлическими кольцами с резиновыми уплотнителями.

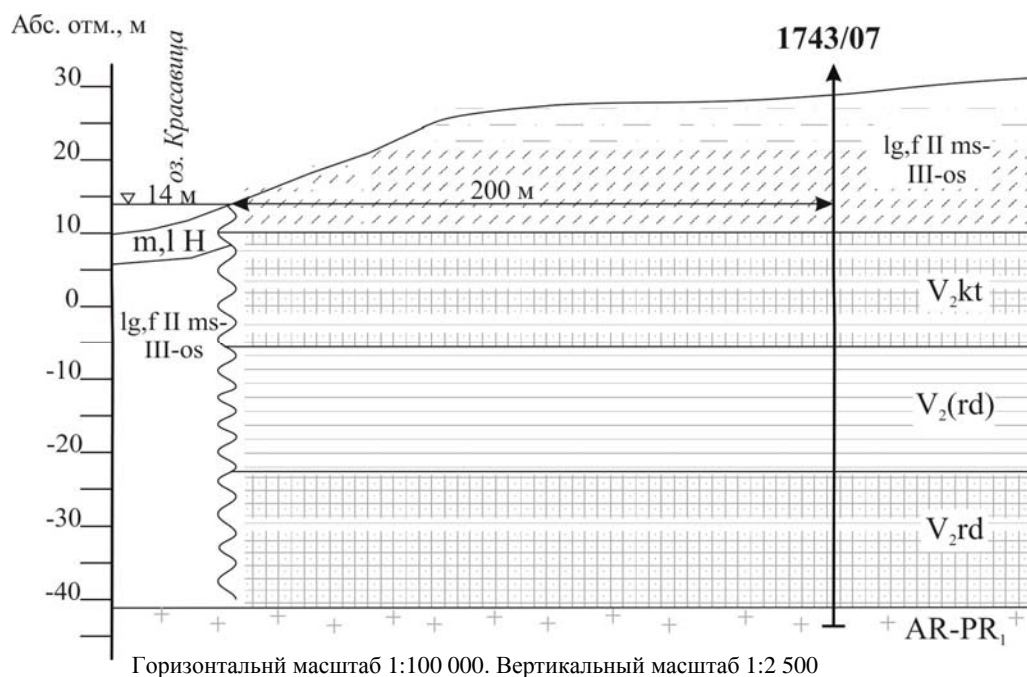


Рис.1. Схематический гидрогеологический разрез

Водоподъемное оборудование представлено насосом ЭЦВ-6, опущенным на глубину 37,0 м и достаточным для обеспечения потребного дебита.

Латеральная смена вендских образований четвертичными отложениями проиллюстрирована разрезом вкрест простирания линзы (рис.1).

Опытно-фильтрационные работы на водозаборе ДНП «Старорусское» включали откачку с дебитом 96 м³/сут (что дает превышение потребного дебита практически в полтора раза), продолжительность которой составляла 10 ч. Невысокая продолжительность откачки, с одной стороны, объяснялась быстрым достижением квазистационарного режима, а с другой – необходимостью отключения потребителей от водоснабжения на время откачки, поскольку последняя проводилась на выброс. Радиус влияния откачки такой продолжительности

$$R = 1,5\sqrt{at} = 1,5\sqrt{10^5 \cdot 0,417} = 306 \text{ м,}$$

где a – коэффициент пьезопроводности, м²/сут; t – время откачки, сут.

Расчитанный радиус влияния откачки превышает расстояние от водозабора до латерального контакта вендских песчаников с моренными суглинками, и потому следовало ожидать, что влияние данной границы скажется на ходе откачки. График временного прослеживания (в полулогарифмических координатах) приведен на рис.2.

Как видно из графика, резкое выполаживание индикаторной кривой началось не более чем через 15 мин после включения насоса, а в период от 6 до 10 ч после включения насоса динамический уровень претерпел лишь незначительные колебания. Расчет по вышеприведенной формуле показывает, что зона влияния откачки должна была достигнуть границы линзы чуть более чем за 4 ч, и таким образом устойчивый квазистационарный режим во второй половине откачки позволяет сделать вывод о том, что рассматриваемая граница характеризуется постоянным напором, т.е. является границей I рода.

Таким образом, запасы подземных вод, эксплуатируемые водозабором ДНП «Старорусское», в определенной степени обеспечиваются привлекаемыми ресурсами, что говорит о поступлении вод оз.Красавица в образования венда. Косвенным подтверждением данной концепции является тот факт, что радиологический анализ пробы воды, отобранной в конце откачки, не показал характерных для Карельского перешейка превышений ПДУ альфа-активности и Rn-222. Более того, в отобранных пробах воды не было обнаружено превышений ни по одному показателю, определяемому при полном химическом и микробиологическом анализах, чем косвенно подтверждается факт длительной фильтрации поступающих к водозабору вод оз.Красавица через толщу четвертичных песков и супесей.

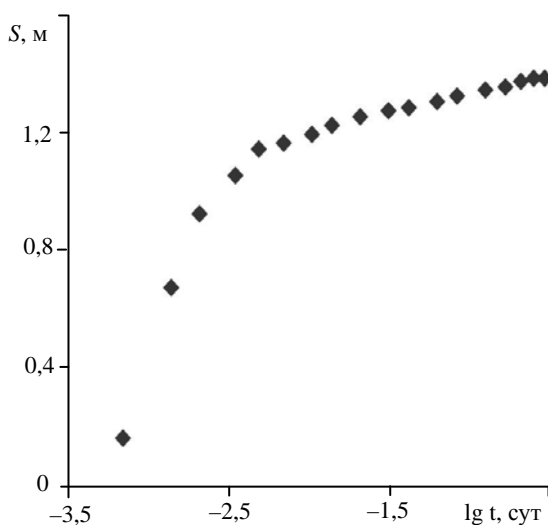


Рис.2. График временного прослеживания

Теснота гидравлической связи образований венда с четвертичными отложениями, подстилающими дно озера, подтверждается и длительным рядом химических и радиологических анализов. Так, при мониторинге качества вод с 2006 по 2013 г. с периодичностью не реже одного раза в два года не было обнаружено ни одного превышения нормативных значений контролируемых показателей. Также не было обнаружено убедительной динамики изменения каких-либо показателей на протяжении всего рассматриваемого семи-летнего срока.

Данная граница с постоянным напором, однако, не учитывалась при подсчете запасов, что было сделано для ужесточения расчетной схемы. В ходе камеральной обработки полевых материалов с применением формулы из методических рекомендаций ГИДЭК* был проведен расчет радиуса области формирования запасов:

$$R_{\phi} = \sqrt{\frac{Q}{\pi M_{\text{пр}}}} = \sqrt{\frac{69,2}{\pi \cdot 0,73}} = 0,59 \text{ км},$$

где Q – проектируемый дебит одиночного водозабора, равный 69,2 м³/сут или 0,8 л/с; $M_{\text{пр}}$ – модуль прогнозных ресурсов подземных вод; по данным работ Е.А.Шебесты, завершенных в 2007 г., в рассматриваемом районе $M_{\text{пр}} = 0,73$ л/(с·км²).

Область формирования запасов, таким образом, выходила за пределы линзы вендских образований только с одной стороны, а именно с запада. Однако влиянием данной границы по указанной выше причине было решено пренебречь, и вендский водоносный комплекс был схематизирован как неограниченный в плане и изолированный в разрезе напорный пласт.

Подсчет запасов проводился гидродинамическим методом (схема Тейса – Джейкоба), и расчетное понижение на конец 27-летнего срока эксплуатации должно было составлять 1,62 м при допустимом понижении 32,6 м.

В июле 2013 г. (через 2 года после завершения описанных выше опытно-фильтрационных работ) было проведено обследование водозабора ДНП «Старорусское», в ходе которого среди прочего было определен динамический уровень. Расчетное понижение на двухлетний срок по формуле Тейса – Джейкоба должно было составить 1,46 м, однако фактически оно не превысило 1 м. При этом следует отметить, что при схематизации вендского водоносного комплекса как полуограниченного пласта с границей I рода и при применении метода зеркальных отражений (введение в расчетную схему фиктивной скважины с отрицательным дебитом) расчетное понижение через 2 года должно было составить 1,06 м.

Водоотбор на водозаборе ДНП «Старорусское» в течение данного двухлетнего периода оказался исключительно постоянным, так, по данным журналов водоотбора, он изменялся в пределах 56-68 м³/сут, причем его сезонность практически не была выражена. Кроме того, как опытно-фильтрационные работы, так и обследование скважины проводились в летнюю межень, что позволяет исключить влияние сезонных колебаний уровня на полученные результаты. На этом основании может быть сделан вывод об избыточности ужесточения расчетной схемы, вызванной отказом от учета влияния границы с постоянным напором, что также подтверждает ранее изложенные выводы, сделанные на основании интерпретации откачки 2011 г.

Можно заключить, что определение характера взаимодействия обводненной толщи с внешней средой в определенных условиях возможно по данным интерпретации даже весьма краткосрочных (продолжительностью до одних суток) откачек: в случае проведения опытно-фильтрационных работ на скважинах, близко прилегающих к изучаемым границам области фильтрации. При этом дополнительным источником информации может являться контроль радиологических показателей откачиваемых вод с учетом их возможного изменения в ходе опытно-фильтрационных работ (путем проведения радиологического анализа проб, отобранных в начале и конце откачки), а также, по возможности, изучение ретроспективных химических и радиологических анализов. Следует отметить, что для уточнения возможности достоверного разделения границ I и II рода по данным краткосрочных откачек необходима калибровка метода путем изучения характера кривых временного прослеживания при откачках из скважин, расположенных в различных областях фильтрации, в том числе вблизи от заведомо непроницаемых контуров.

* *Боревский Б.В.* Оценка эксплуатационных запасов питьевых и технических подземных вод по участкам недр, эксплуатируемым одиночными водозаборами: Метод. рекомендации / Б.В.Боревский, Л.С.Язвин, В.П.Закутин. М.: ГИДЭК, 2002. 61 с.

Borevskii B.V., Yazvin L.S., Zakutin V.P. Otsenka ekspluatatsionnykh zapasov pit'evykh i tekhnicheskikh podzemnykh vod po uchastkam neдр, ekspluatiruemykh odinochnymi vodozaborami (*Estimation of operational resources of underground water from single intakes subsoil plots*). Moscow: GID EK, 2002, p.61.

SHORT-TERM PUMPING TESTS AS AN IDENTIFICATION METHOD OF AQUIFER-SURFACE INTERACTION

D.L.USTYUGOV, *PhD in Geological and Mineral Sciences, Associate Professor, ustiugov@mail.ru*

D.P.MIRONCHUK, *Postgraduate student, dpmironchuk@gmail.com*

National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

Computational modeling is a convenient method of estimating underground water resources for regions with highly developed underground water resources, with a large number of variable production water supply systems. The use of computational modelling requires reliable information about a target aquifer's filtering parameters, as well as its boundary conditions, or features of its interaction with the surface. Methods of determination of filtering parameters, including nodal analysis, which is obligatory, are well-developed, but determination of boundary conditions has some difficulties. The paper shows that reliable information about features of aquifer-surface interaction can be obtained by interpreting pumping tests.

Key words: hydrogeology, estimation of resources, computational modeling, boundary conditions, pumping test, nodal analysis.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОДОПРИТОКОВ В ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОМБИНИРОВАННЫМ ОТКРЫТО-ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ

Ю.А.НОРВАТОВ, *д-р геол.-минерал. наук, профессор, norvatov@mail.ru*

М.В.СЕРГУТИН, *аспирант, msergutin@mail.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Выполнен анализ условий формирования водопритоков в горные выработки при разработке рудных месторождений комбинированным открыто-подземным способом. Определены характеристики природно-техногенной гидрогеологической структуры, сформированной на Ждановском месторождении медно-никелевых руд. На примере Ждановского месторождения рассмотрена методика прогнозирования водопритоков в подземные горные выработки с использованием численных геофильтрационных моделей.

Ключевые слова: рудные месторождения, карьер, рудник, открыто-подземный способ отработки, зона водопротокающих трещин, подработанная территория, прогноз водопритоков, численное моделирование.

В настоящее время при разработке месторождений комбинированным способом подземные горные работы выполняют преимущественно с применением систем управления кровлей выработок полным ее обрушением. Переход к такой технологии, как правило, приводит к тому, что значительная часть водопритоков в рудники формируется за счет атмосферных осадков. При этом достоверность прогноза определяется надежностью оценки параметров процессов сдвижения породных массивов и интенсивности инфильтрации атмосферных вод на подработанных территориях.

При разработке месторождений открыто-подземным способом в результате развития геомеханических процессов формируется сложная природно-техногенная гидрогеологическая структура, характер которой определяет условия формирования притоков подземных и атмосферных вод в горные выработки.

При отработке месторождений открытым способом водопритоки в карьер формируются в основном за счет вскрываемых водоносных горизонтов, а также атмосферных осадков. При этом на величину водопритока, поступающего в карьер за счет атмосферных осадков, влияет не только площадь карьера, но и геоморфология сопредельной территории. Для примера можно рассмотреть два месторождения, расположенных в Мурманской области: медно-никелевое месторождение Ждановское и фосфоритовое месторождение Коашва. На месторождении Ждановское водоприток в карьер «Центральный» за счет атмосферных вод составляет порядка 500 м³/ч в период весеннего паводка, а на месторождении Коашва, находящемся всего в 250 км от Ждановского, водоприток за счет атмосферных вод достигает 9000 м³/ч. Причиной такого различия в притоках атмосферных вод является геоморфология районов расположения этих месторождений. Если карьер «Центральный» находится на относительно равнинной местности и приток атмосферных вод в его выработки определяется ограниченной водосборной площадью, то для карьера Коашва характерна совершенно иная ситуация. Он расположен в долине, куда атмосферные воды поступают с возвышенностей, находящихся на прилегающих к карьере территориях. Соответственно водосборная площадь вокруг Коашвинского карьера в несколько раз больше, чем вокруг Ждановского. Этот пример наглядно показывает влияние геоморфологии района месторождения на суммарный водоприток в горные выработки за счет атмосферных осадков.

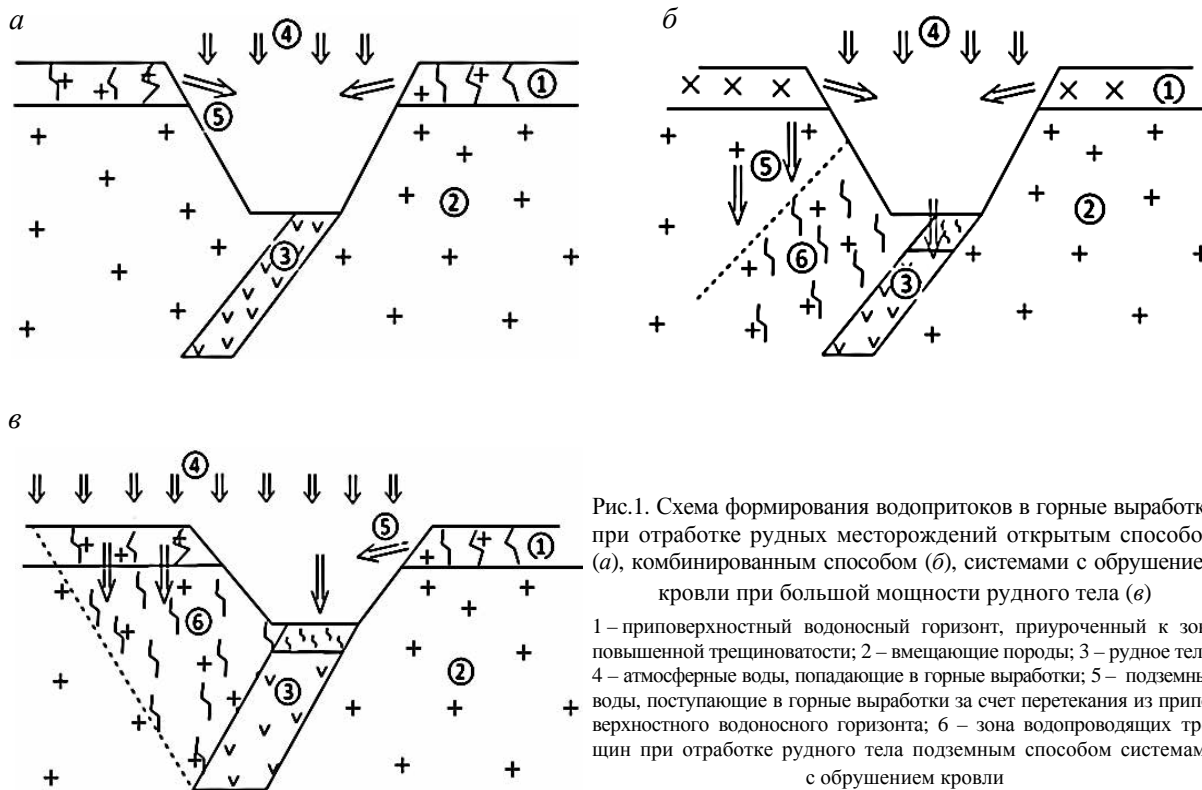


Рис.1. Схема формирования водопритоков в горные выработки при отработке рудных месторождений открытым способом (а), комбинированным способом (б), системами с обрушением кровли при большой мощности рудного тела (в)

1 – приповерхностный водоносный горизонт, приуроченный к зоне повышенной трещиноватости; 2 – вмещающие породы; 3 – рудное тело; 4 – атмосферные воды, попадающие в горные выработки; 5 – подземные воды, поступающие в горные выработки за счет перетекания из приповерхностного водоносного горизонта; 6 – зона водопродвижающих трещин при отработке рудного тела подземным способом системами с обрушением кровли

В наиболее распространенном случае, когда месторождение расположено в районе развития скальных пород, основным водоносным горизонтом, принимающим участие в формировании притоков в карьер, будет приповерхностный водоносный горизонт, приуроченный к зоне повышенной трещиноватости скальных пород, затухающей с глубиной*. На разных месторождениях мощность зоны повышенной трещиноватости может изменяться от первых метров до 50-100 м. На рис.1, а представлены типичные для многих рудных месторождений природно-техногенные структуры.

Основным фактором, определяющим приток подземных вод в карьеры на рудных месторождениях, является проводимость приповерхностной зоны повышенной трещиноватости. При прогнозировании водопритоков в карьеры на месторождениях основной задачей гидрогеологических исследований на стадиях разведки и доразведки месторождения будет определение мощности и фильтрационных параметров этой зоны.

Однако задача прогнозирования водопритоков в горные выработки значительно усложняется при погашении карьера и переходе на подземный способ отработки месторождения. В этом случае на месторождении формируется сложная природно-техногенная гидрогеологическая структура, при которой карьер и рудник следует рассматривать как единую гидравлически связанную систему. При этом водоприток в подземные выработки будет складываться из перетекания карьерных вод через оставленный под карьером целик, а также поступления подземных вод из приповерхностного водоносного горизонта в зону водопродвижающих трещин (ЗВТ) по подработанной территории (рис.1, б).

* Норватов Ю.А. Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод. Л.: Недра, 1988. 261 с.
Norvatov Yu.A. Izuchenie i prognoz tekhnogennogo rezhima podzemnykh vod (The study and prediction of anthropogenic groundwater regime). Leningrad: Nedra, 1988, p.261.

При отработке рудных месторождений с большой мощностью рудного тела (50 м и более) системами с обрушением кровли существует опасность выхода ЗВТ на поверхность и связанных с этим проблем. В этом случае дополнительные водопритоки в подземные горные выработки будут формироваться за счет дренирования приповерхностного горизонта зоной водопроводящих трещин, а также за счет атмосферных осадков, выпадающих на подработанной территории и поступающих через ЗВТ на добычные горизонты рудника (рис.1, в).

При такой схеме отработки месторождений возможны дополнительные проблемы, связанные с подработкой поверхностных водотоков и последующим резким увеличением водопритоков в подземные горные выработки. Такую ситуацию следует считать аварийной, и при планировании горных работ следует предусматривать инженерные мероприятия по ее предотвращению*.

В последнее время подобные проблемы являются актуальными в связи с тем, что многие предприятия по завершении открытых горных работ перешли или планируют переход на подземный способ отработки, что влечет за собой определенные сложности при прогнозировании водопритоков в рудники. Подобная ситуация сложилась на Ждановском месторождении медно-никелевых руд, расположенном в Печенгском районе Мурманской области.

Ждановское месторождение медно-никелевых руд было открыто в 1946 г. и активно разрабатывалось в прошлом столетии. Месторождение представлено семью основными рудными телами: Западное, Юго-Западное, Центральное, Северное, Восточное, Юго-Восточное и Южное. До 2010 г. добыча руды велась открытым способом на карьерах «Центральный», «Западный» и «Южный». Начиная с 1980 г. под карьерами «Центральный» и «Западный» проводились подземные горные работы рудником «Северный-Глубокий». Таким образом, на месторождении проявились сложные условия формирования водопритоков в открытые и подземные выработки.

Существенная роль атмосферных осадков в общем объеме воды, поступающей в горные выработки месторождения, предопределила необходимость отдельного рассмотрения и сопоставления режима формирования водопритоков в карьеры и в рудник в период зимней межени и в теплый период года.

Для анализа условий формирования меженных притоков подземных вод в карьеры и в рудник «Северный-Глубокий» были использованы данные о среднемесячной производительности водоотливов с 1984 по 2010 г. (рис.2). Из рис.2 видно, что снижение производительности карьерных водоотливов приводит к практически эквивалентному повышению водопритоков в рудник. Это свидетельствует о перетекании подземных вод из карьеров в рудник. Следует отметить, что в период с 2004 по 2011 г. роль перетекания явно повышалась в связи с интенсивным развитием подземных горных работ.

По результатам анализа данных о производительности водоотливов были построены схемы водного баланса системы карьер – рудник на зимнюю межень и на теплый период года (рис.3). При этом интенсивность поступления атмосферных вод (приток в карьер) оценивалась как разница между суммарными производительностями водоотливов в теплый период года и в период зимней межени.

* *Норватов Ю.А.* Численное моделирование геофильтрации при планировании мероприятий по обеспечению эффективности и безопасности горных работ / Ю.А.Норватов, И.Б.Петрова // Проблемы геодинамической безопасности / ВНИМИ. СПб, 1997. С.35-38.

Norvatov Yu.A., Petrova I.B. Chislennoe modelirovanie geofil'tratsii pri planirovanii meropriyatii po obespecheniyu effektivnosti i bezopasnosti gornykh работ (*Numerical simulation geofiltration for planning measures to ensure effectiveness and safety of mining operations*). Problemy geodinamicheskoi bezopasnosti. VNIMI. St Petersburg, 1997, p.35-38.

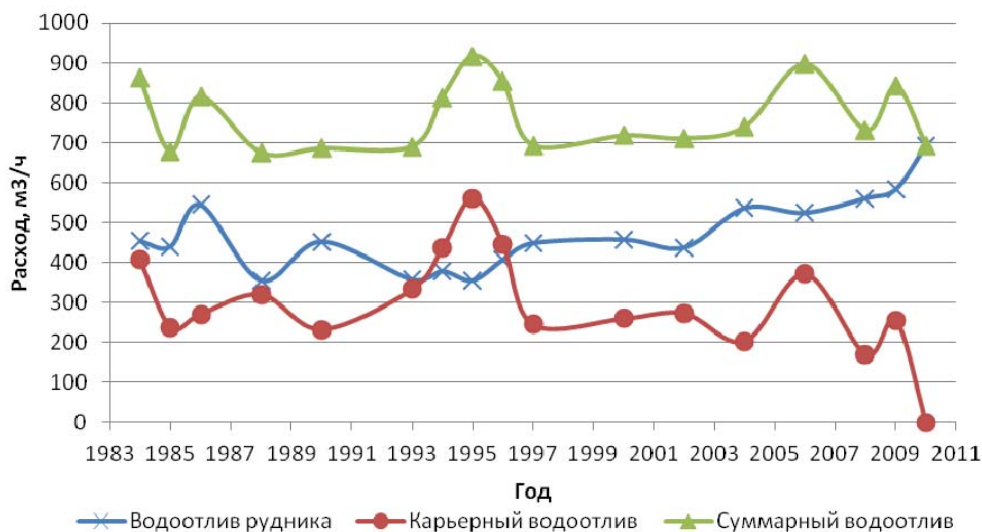


Рис.2. Графики изменения среднемесячной производительности водоотливов в период зимней межени

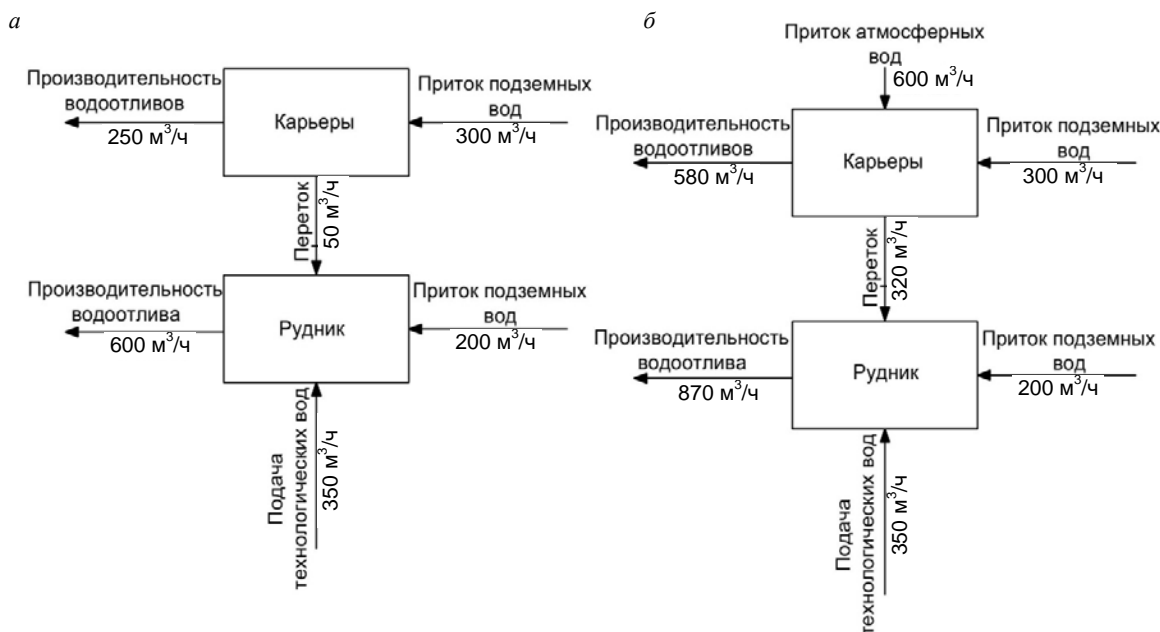


Рис.3. Схема водного баланса на 2009 г.: а – зимняя межень; б – теплый период

По результатам гидрогеологической съемки в подземных выработках получена информация о характере и количестве водопроявлений, выявлены основные зоны, приуроченные к тектоническим нарушениям, по которым водоприток поступает в горные выработки. Эта информация наряду с характеристиками приповерхностного водоносного горизонта (проводимость $50 \text{ м}^2/\text{сут}$, интенсивность инфильтрационного питания $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}/\text{сут}$) и данными о притоках подземных вод в выработки использована при построении численной геофильтрационной модели месторождения.

Сложившаяся на месторождении гидрогеологическая ситуация осложнена тем, что Юго-Восточное рудное тело находится в непосредственной близости от водохранилища «Селиакка-Ярви», что определяет опасность его подработки при ведении подземных горных работ системами с обрушением кровли. В связи с этим были установлены границы охранного целика по углам сдвигения $\beta = 50^\circ$ и $\delta = 75^\circ$, определенным для слоистой толщи

пород. Отстроенный целик охватывает восточную часть Юго-Восточного рудного тела с незначительными запасами.

По результатам ранее выполненных гидрогеологических работ и проведенных натуральных наблюдений составлена численная геофильтрационная модель Ждановского месторождения. Основной целью численного моделирования являлась оценка водопритоков в проектируемые горные выработки.

Модель создавалась на основе программы MODFLOW и охватывала территорию площадью 50 км², ограниченную долинами рек Селиаккайоки, Быстрая, Пильгуйоки и Хауки, а также озерами Селиакка-Ярви, Арвалдемломполо и Хаукилампи; эти объекты задавались на модели граничным условием I рода (постоянный напор). С учетом особенностей геологического строения и техногенной структуры месторождения, в разрезе модель представлена 15 слоями, мощности которых изменяются от 30 до 100 м. Оценка гидрогеологических характеристик модели проводилась в два этапа.

В первую очередь решалась задача по имитации естественного режима подземных вод. При этом фильтрационные параметры слоев и интенсивность инфильтрационного питания приповерхностного водоносного горизонта изменялись таким образом, чтобы полученные на модели уровни подземных вод соответствовали их естественному положению. На втором этапе имитировался техногенный режим подземных вод (решение эпигнозной задачи). При этом контролем достоверности определенных ранее фильтрационных параметров является интенсивность притоков подземных вод в существующие горные выработки. На этом этапе на модели учитывалось положение горных выработок и зон сдвижения, а также были воспроизведены тектонические зоны повышенной проницаемости.

Созданная и откалиброванная таким образом численная модель использовалась для решения прогнозной задачи. В соответствии с данными об углах сдвижения, от планируемых к отработке горизонтов рудных тел отстраивалась зона сдвижения горных пород, в пределах которой принимался повышенный коэффициент фильтрации техногенно-нарушенного массива. На внешних границах зоны сдвижения задавались условия разгрузки подземных потоков с использованием модуля «дрена» (аналогично заданию условий высачивания на бортах карьеров). На участке разработки Юго-Восточного рудного тела зоны сдвижения приняты с учетом оставления целиков около озера Селиакка-Ярви и отводного канала р.Быстрой.

Прогнозирование притоков подземных вод проводилось в соответствии с планами отработки месторождения до отметки минус 440 м. По результатам численного моделирования были получены прогнозные притоки подземных вод в рудник, а также аналитически определен приток атмосферных вод, формируемый по площади подработанной территории (см.таблицу).

Прогнозные водопритоки в рудник «Северный-Глубокий» при развитии горных работ до горизонта минус 440 м с оставлением целиков для охраны водохранилища и отводного канала

Составляющая суммарного водопритока в рудник	Притоки по периодам года, м ³ /ч		
	Зимняя межень	Теплый период (май-октябрь)	Весенний паводок (май)
Подземные воды	1200	1200	1200
Атмосферные воды	–	600	1250
Инфильтрация по подработанной территории	–	100	150
Технологические воды	500-600	500-600	500-600
Суммарный приток	1700-1800	2400-2500	3100-3200

Разработанная методика прогнозирования водопритоков в горные выработки использована также при оценке гидрогеологических условий разработки золото-медного месторождения Нурказган (центральный район Казахстана). Субвертикальное рудное тело мощностью до 700 м, залегающее под погашенным карьером, планируют отработать системой с самовыпуском руды. Площадь территории, в пределах которой возможны существенные деформации земной поверхности и активная аккумуляция атмосферных осадков, достигает 2 км².

С использованием численной геофильтрационной модели выполнен анализ техногенного режима, сформированного в период эксплуатации карьера, установлена проводимость приповерхностного водоносного горизонта (5 м²/сут), интенсивность инфильтрационного питания подземных вод (5·10⁻⁴ м/сут). При прогнозе водопритоков в проектируемые подземные выработки установлено, что приток подземных вод будет составлять 200-250 м³/ч, а максимальный приток атмосферных вод может достигать 3000-5000 м³/ч (при норме атмосферных осадков 30 мм/сут, типичной для районов с ливневым характером дождей).

Таким образом, система водоотлива на рудниках, на которых планируется отработка полезного ископаемого открыто-подземным способом с системой с полным обрушением кровли рудных тел, должна обеспечивать безопасность горных работ с учетом максимальных водопритоков, зачастую формируемых преимущественно за счет атмосферных вод.

PREDICTION OF WATER INFLOWS INTO MINE WORKINGS IN THE PROCESS OF COMBINED OPEN-UNDERGROUND ORE MINING OPERATIONS

Yu.A.NORVATOV, *Dr. of Geological and Mineral Sciences, Professor, norvatov@mail.ru*

M.V.SERGUTIN, *Postgraduate student, msergutin@mail.ru*

National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

An analysis of formation conditions of water inflows into mine workings during combined open-underground development of ore deposits was carried out. Characteristics of both natural and man-made hydro-geological structures in a copper-nickel ores «Zhdanov» deposit were identified. A method of prediction of water inflows into underground mine workings using numerical simulations was studied under complex hydrogeological conditions of «Zhdanov» deposit.

Key words: ore deposits, quarry, mine, an open-underground mining method, water in fractured zones, underworked area, prediction of water flows, numerical modeling.

Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых

Application of up-to-date electric exploration technologies in mineral deposits prospecting

УДК 550.370

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ В МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОМ МЕТОДЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ АНОМАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В СТОРОНЕ ОТ ПРОФИЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Е.Ю.ЕРМОЛИН, канд. геол.-минерал. наук, ассистент, ermolin_stud@list.ru

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

А.И.ИНГЕРОВ, канд. геол.-минерал. наук, вице-президент, oingerov@phoenix-geophysics.com
«Phoenix Geophysics Ltd», Канада, Торонто, Онтарио

Х.М.ШААБАН, аспирант, hshaaban001@yahoo.com

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

При интерпретации профильных магнитотеллурических данных часто возникает необходимость учета аномального эффекта неоднородностей, расположенных в стороне от профиля измерений. В этом случае важным инструментом является анализ данных магнитовариационного профилирования (МВП). Магнитовариационное профилирование может проводиться одновременно с магнитотеллурическим зондированием (МТЗ). Это реализуется путем включения в измерительную систему дополнительного канала для измерения вертикальной компоненты магнитного поля (Hz). Благодаря появлению прецизионных треног, позволяющих без труда устанавливать три ортогональных индукционных датчика (Hx, Hy, Hz) на любом рельефе в любое время года, съемки МТЗ и МВП могут выполняться совместно без существенных дополнительных финансовых затрат. Комбинация МТЗ и МВП значительно повышает возможности учета аномального влияния объектов, расположенных в стороне от профиля. Представлено решение задачи определения параметров двухмерного (2D) проводника, параллельного профилю наблюдений, но расположенного в стороне от него. Предложенная методика поможет избежать грубых ошибок в интерпретации, а также составить обоснованную модель для 3D-моделирования.

Ключевые слова: электромагнитные методы, типпер, двухмерный проводник, определение глубины.

Введение. В последнее десятилетие благодаря усовершенствованию аппаратной базы, методики полевых работ и технологий обработки данных возросли возможности использования магнитотеллурических функций отклика (МТЗ) при проведении профильных региональных исследований и рекогносцировочных работ для решения рудных и нефтяных задач. В то же время при интерпретации профильных магнитотеллурических данных возникает проблема учета неоднородностей, расположенных за пределами профиля. В этом

случае важным инструментом является анализ данных магнитовариационного профилирования (МВП) [4]. Измерения методом МВП легко реализуются одновременно с измерениями МТЗ. Это делается путем добавления одного канала для измерения вертикальной компоненты магнитного поля (Hz). В магнитотеллурических исследованиях измеряются четыре горизонтальные компоненты естественного переменного электромагнитного поля Земли (две магнитные H_x , H_y и две электрические E_x , E_y) [5]. В методе МВП измеряются три ортогональные магнитные компоненты (H_x , H_y , H_z) [4]. Благодаря появлению прецизионных треног [7, 8], позволяющих без труда устанавливать три ортогональных индукционных датчика на любом рельефе в любое время года, методы МТЗ и МВП реализуются совместно без существенных финансовых затрат. Пятикомпонентная установка для измерения методами МТЗ и МВП приведена в предыдущей работе авторов [3].

Значительный вклад в развитие метода МВП внесли В.Паркинсон, Х.Визе, У.Шмукер, И.И.Рокитянский, М.Н.Бердичевский и В.И.Дмитриев, К.Возофф, А.Джонс и др. Функциями отклика среды в этом методе являются реальный и мнимый индукционные векторы, а также амплитуда и фаза типпера. Авторы исследовали связь характерных точек на вертикальных разрезах типпера с параметрами двумерных проводящих тел различной формы сечения [1, 2, 6]. В настоящей работе приводится обоснование приема определения глубины двумерного (2D) аномального проводящего объекта, находящегося в стороне от точек наблюдения, по частотной характеристике типпера (при условии, что положение оси проводника в плане известно).

Методика исследований. Рассмотрим случай, когда профиль исследований расположен в стороне от крупного проводника с изометрическим сечением (рис.1). В этом случае практически все магнитотеллурические параметры (на больших периодах) на профиле измерений будут свидетельствовать о том, что геоэлектрическая среда является двумерной. Магнитотеллурические полярные диаграммы будут иметь соответствующий 2D-моделям вид: диаграммы основных компонент – форму овала, а диаграммы дополнительных компонент – четырехлепестковую форму. Несмотря на очевидное доказательство применимости двумерной интерпретации, решение обратной двумерной задачи для указанного на рис.1 случая будет некорректным.

Авторы полагают, что одним из способов корректной интерпретации в данном случае будет использование магнитовариационных данных. В первую очередь следует выполнить анализ карт индукционных векторов, так как индукционный вектор в конвенции Паркинсона ориентирован в направлении на проводник [5]. На рис.1 это хорошо видно, так как векторы ориентированы в сторону оси проводника (перпендикулярно профилю измерений). Далее следует выполнить анализ кривых и разрезов типпера. В работе [6] показано, что для аномальных проводящих объектов по значению частоты максимума типпера однозначно определяется суммарная продольная проводимость сечения:

$$G = 2 \cdot 10^5 T,$$

где T – значение периода в особых точках на разрезе типпера.

На рис.2 приведены вертикальные разрезы типпера по профилю, проложенному в крест простирания аномального тела. При этом тело с изометрическим сечением было помещено на три различные глубины: 125 м (рис.2, а), 325 м (рис.2, б) и 725 м (рис.2, в). Очевидно, что при изменении глубины залегания тела значение периода максимальных значений амплитуды типпера на всех трех разрезах остается постоянным. Кроме того, из рис.2 видно, что значение экстремального периода одинаково на всех точках профиля. Таким образом, на кривых типпера для каждого пикета будет наблюдаться максимум, и значение периода этого максимума будет одинаковым для всех кривых профиля. Этот факт делает возможным определение значения G аномального двумерного объекта с изометрическим сечением по любой одной точке, расположенной в стороне от исследуемого аномального

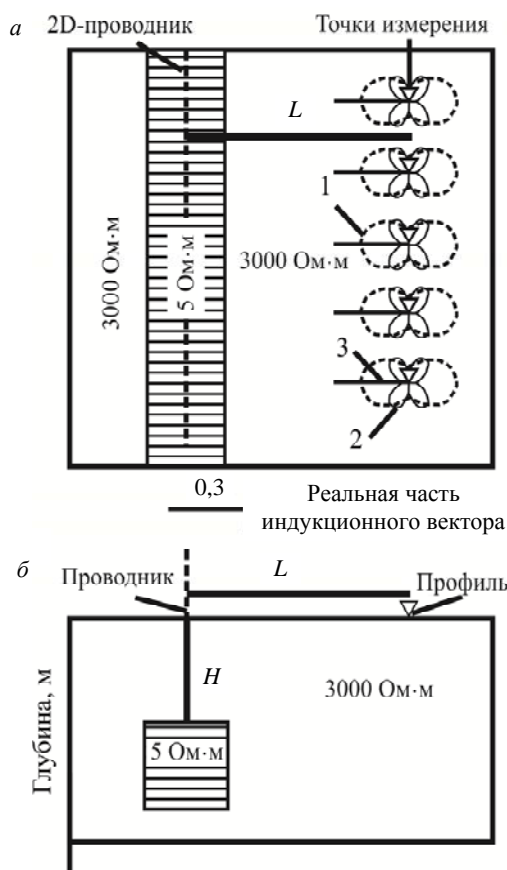


Рис.1. Геоэлектрическая 2D-модель (сечение проводящего тела 10×10 км): а – вид в плане, б – разрез вдоль линии L

L – расстояние от линии профиля до эпицентра проводника; H – глубина до верхней кромки проводника; 1, 2 – амплитудные магнитотеллурические диаграммы (для периода 100 с) основных (1) и дополнительных (2) импедансов; 3 – реальные индукционные векторы (для периода 100 с) в конвенции Паркинсона (указывают на проводник)

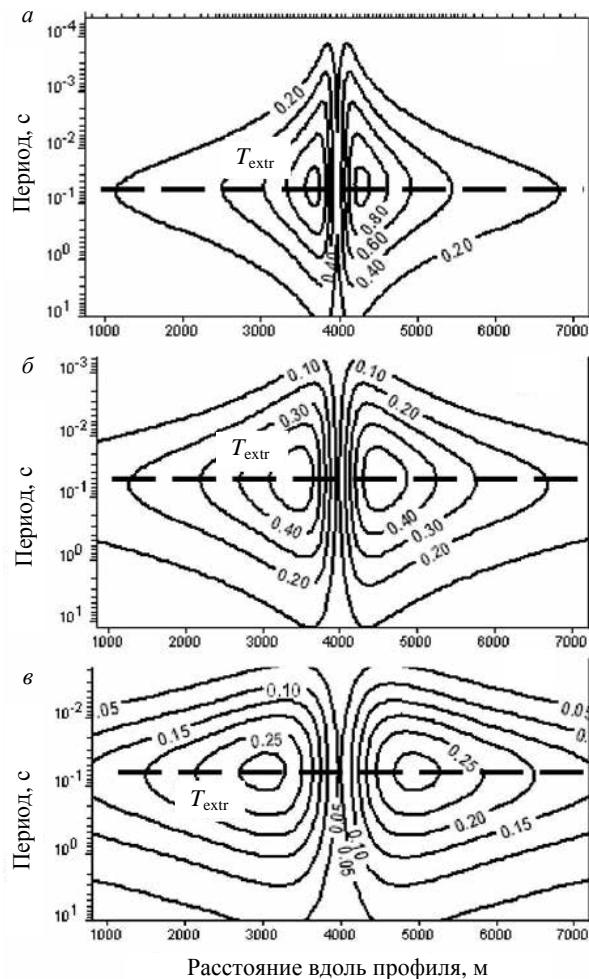


Рис.2. Вертикальные разрезы типпера, построенные для трех 2D-моделей [6] с одинаковым значением суммарной продольной проводимости (G) и различными значениями глубины залегания верхней кромки аномального проводника. Значения на изолиниях – амплитуда типпера, у.е. Пунктирной линией показано экстремальное значение типпера

объекта. Следовательно, мы можем однозначно определить значение G аномального объекта, указанного на рис.1, по периоду максимума в точках наблюдения.

В работе [6] показано, что максимальная амплитуда аномалии типпера A_{max} , наблюдаемая в точках измерения, зависит от глубины залегания объекта H и расстояния до объекта L . В этом случае при фиксации какого-либо из параметров (L или H) представляется возможным определение второго.

Авторы поставили перед собой задачу разработать методику определения глубины верхней кромки проводника по данным МВЗ (при условии, что расстояние до оси проводника в плане известно по каким-либо априорным геолого-геофизическим данным). Для разработки методики авторами было выполнено двухмерное математическое моделирование магнитовариационных функций отклика для аномального тела с фиксированным значением $G = 2 \cdot 10^7$ См·м (сечение 10×10 км, удельное электрическое сопротивление 5 Ом·м) и различной глубиной залегания верхней кромки H . По модельным данным стоились псевдоразрезы и кривые типпера. Определялось максимальное значение типпера A_{max}

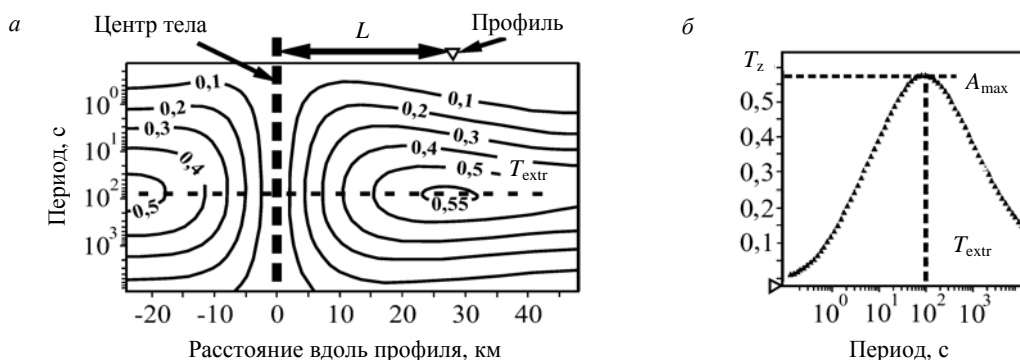


Рис.3. Пример определения A_{\max} на кривой типпера, расположенной на расстоянии 28 км от оси аномального двухмерного объекта с $G = 2 \cdot 10^7$ См·м и с глубиной до верхней кромки 10 км: а – псевдоразрез типпера вдоль линии L (см. рис. 1); б – кривая типпера в точке профиля, расположенного в 28 км от оси проводника

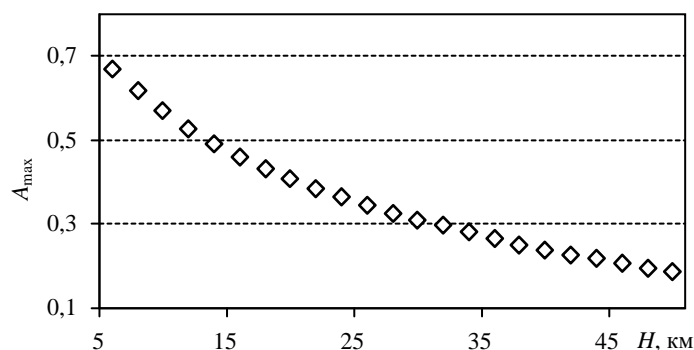


Рис.4. График зависимости максимальной амплитуды типпера (A_{\max}) от глубины до верхней кромки (H) аномального объекта ($G = 2 \cdot 10^7$ См·м), находящегося на расстоянии 28 км от точек измерения

на расстоянии $L = 28$ км для глубин верхней кромки аномального тела от 5 до 50 км. Пример расчета A_{\max} для глубины, равной 10 км, показан на рис.3. Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса WinGLink.

Результаты. В результате обобщения модельных данных была построена зависимость максимальной амплитуды типпера в точке измерения от глубины залегания верхней кромки аномального объекта (рис.4).

Зависимость, представленная на рис.4, имеет монотонно убывающий характер, что позволяет определить глубину геометрического центра проводника, находящегося в стороне от точек наблюдения, по значению амплитуды и периоду в точке измерения (при условии, если расстояние до оси аномального объекта известно).

Выводы. Полученные результаты исследований позволяют нам предложить методику определения верхней кромки аномальных двухмерных объектов с сечением, близким к изометрическому, расположенных в стороне от профиля наблюдений.

1. Анализируются карты индукционных векторов. Определяется, в какой стороне от профиля находится проводник.

2. По экстремальному значению типпера T_{extr} в точках измерения определяется относительная проводимость сечения аномального объекта G по формуле, предложенной в работе [6].

3. Расстояние от оси проводника до профиля наблюдений L определяется по априорным геолого-геофизическим данным.

4. Выполняется двухмерное моделирование для аномального объекта с фиксированным значением G и различной глубиной залегания H . Строится зависимость максимальной амплитуды типпера A_{\max} на расстоянии L от глубины залегания проводника.

5. С использованием полученной зависимости (рис.4) и максимального значения типпера на полевых кривых определяется глубина до проводника.

Предложенная в данной работе методика может быть использована для определения стартовой модели трехмерной инверсии и как самостоятельный инструмент при решении поисковых задач и региональных исследованиях. Очевидно, что совместный анализ данных МТЗ и МВП позволяет избежать грубых ошибок при интерпретации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолин Е.Ю. Оценка глубины залегания двумерных рудных объектов изометрического сечения по особым точкам частотных характеристик типпера / Е.Ю.Ермолин, О.Ингеров // Записки Горного института. 2011. Т.189. С.27-29.
2. Ермолин Е.Ю. Картирование субвертикальных проводящих объектов по данным МВЗ / Е.Ю.Ермолин, О.Ингеров, И.Ингеров // 5-я Всероссийская школа-семинар имени М.Е.Бердичевского и Л.Л.Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли. СПб: Изд-во СПбГУ, 2011. Кн.2. С.252-255.
3. Предварительные результаты электроразведочных работ АМТ-МВЗ экспедиции «Патомский кратер-2010» / С.М.Миронов, О.Ингеров, А.С.Егоров, Е.Ю.Ермолин, Р.А.Суханов // Геофизика. 2011. 2. С.35-41.
4. Рокитянский И.И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наукова думка, 1975. 276 с.
5. Berdichevsky M.N. Models and methods of magnetotellurics / M.N.Berdichevsky, V.I. Dmitriev. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 563 p.
6. Ingerov O. The parameter estimation of 2D conductive isometric bodies by singular points at the tipper frequency characteristic / O.Ingerov, E.Ermolin // Proceedings of 20th Induction Workshop IAGA, Giza, Egypt-2010, September 18-24. 303-306 p.
7. High sensitivity EM prospecting technique based on measurement of three magnetic components of natural EM field / O.Ingerov, L.Fox, A.Golyashov, I.Ingerov, A.Colin // 19th IAGA WG Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. Beijing, 2008. P.965-970.
8. Non-grounded Surface Electroprospecting Technique / O.Ingerov, L.Fox, A.Golyashov, I.Ingerov, A.Colin // 70th EAGE annual Conference. Amsterdam, 2009. N 6149. Extended abstract.

REFERENCES

1. Ermolin E.Yu., Ingerov O. Otsenka glubiny zaleganiya dvumernykh rudnykh ob"ektov izometricheskogo secheniya po osobym tochkam chastotnykh kharakteristik tippera (*The parameter estimation of 2D conductive isometric bodies by singular points of tipper frequency responses*). Zapiski Gornogo instituta. 2011. Vol.189, p.27-29.
2. Ermolin E.Yu., Ingerov O., Ingerov I. Kartirovanie subvertikal'nykh provodyashchikh ob"ektov po dannym MVZ (*Mapping of vertical conductivity bodies by MVZ*). 5-ya Vserossiiskaya shkola-seminar imeni M.E.Berdichevskogo i L.L.Van'yana po elektromag-nitnym zondirovaniyam Zemli. St Petersburg: Izd-vo SPbGU, 2011. Book 2, p.252-255.
3. Mironov S.M., Ingerov O., Egorov A.S., Ermolin E.Yu., Sukhanov R.A. Predvaritel'nye rezul'taty elektrorazvedochnykh rabot AMT-MVZ ekspeditsii «Patomskii krater-2010» (*Preliminary Results of Electrical Exploration by AMT MVZ Expedition «Patom Crater-2010»*). Geofizika. 2011. 2, p.35-41.
4. Rokityanskii I.I. Issledovanie anomalii elektroprovodnosti metodom magnetovariatsionnogo profilirovaniya (*Investigation of electrical conductivity anomalies by magnetic-variation profiling*). Kiev: Naukova dumka, 1975, p.276.
5. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and methods of magnetotellurics. Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, p.563.
6. Ingerov O., Ermolin E. The parameter estimation of 2D conductive isometric bodies by singular points at the tipper frequency characteristic. Proceedings of 20th Induction Workshop IAGA, Giza, Egypt-2010, September 18-24, p.303-306.
7. Ingerov O., Fox L., Golyashov A., Ingerov I., Colin A. High sensitivity EM prospecting technique based on measurement of three magnetic components of natural EM field. 19th IAGA WG Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. Beijing, 2008, p.965-970.
8. Ingerov O., Fox L., Golyashov A., Ingerov I., Colin A. Non-grounded Surface Electroprospecting Technique. 70th EAGE annual Conference. Amsterdam, 2009. N 6149. Extended abstract.

APPLICATION OF VERTICAL MAGNETIC COMPONENT IN MAGNETOTELLURIC METHOD TO ESTIMATE PARAMETERS OF ANOMALOUS OBJECTS AWAY FROM THE PROFILE LINE

E.J.ERMOLIN, *PhD in Geological and Mineral Sciences, Assistant Lecturer, ermolin_stud@list.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

A.I.INGEROV, *PhD in Geological and Mineral Sciences, Vice President,*
oingerov@phoenix-geophysics.com

«Phoenix Geophysics Ltd», Toronto, Canada, Ontario

H.M.SHAABAN, *Postgraduate student, hshaaban001@yahoo.com*

National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The problem of estimating the effect of anomalous bodies situated away from the profile line occurs in magnetotelluric data interpretation, as well as in other geophysical methods. In this case using of magnetic-variation profiling (MVP) data is important. MVP method can be used together with magnetotelluric sounding (MTS) method. It is done by adding a channel for measuring a vertical magnetic component (Hz). MTS and MVP methods can be applied together due to the use of precise tripods. MTS and MVP methods together increase the possibility of estimating the effect of anomalous bodies situated away from the profile line. The research target is to determine parameters of an anomalous conductive body situated away from and parallel to the profile line. This work shows how the depth of a 2D conductive body situated away from the station can be determined by tipper frequency responses (on condition the distance between the station and the body is specified). The step-by-step method for determining the depth of an anomalous body has been used in this work. The introduced method allows avoiding gross mistakes in interpretation, as well as constructing a valid 3D model.

Key words: EM-methods, a tipper, induction arrows, 2D conductive bodies, depth determination.

ОПЫТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ПОЛЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЛЭП «УРЕНГОЙ – ПАНГОДЫ» В КОМПЛЕКСЕ С АМТ-МТ-ЗОНДИРОВАНИЯМИ

А.А.ЖАМАЛЕТДИНОВ, д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, *abd.zham@mail.ru*
Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Россия

А.Н.ШЕВЦОВ, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, *anshev2009-01@rambler.ru*
Геологический институт КНЦ РАН, Анапты, Россия

В.В.КОЛОБОВ, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, *kolobov@adm.kolasc.net.ru*
Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, Анапты, Россия

М.С.ПЕТРИЦЕВ, канд. техн. наук, заведующий сектором, *ms_petr@mail.ru*
Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Россия

На территории Ямало-Ненецкого национального округа (ЯНАО) в 2011 и 2012 годах выполнены электромагнитные зондирования в поле промышленной ЛЭП «Уренгой – Пангоды», в поле антенны сверхнизкочастотного излучения «Зевс», расположенной на Кольском полуострове, и в полях естественных источников (АМТ-МТЗ). В разрезе установлены проводящие слои на глубинах в первые сотни метров и свыше 1 км, связываемые с изменениями литологического состава, пористости и флюидонасыщенности горных пород. Результаты исследований показали перспективность применения комплексных электромагнитных зондирований с естественными и мощными контролируруемыми источниками для прослеживания на глубине газонефтеперспективных горизонтов в осадочном чехле Западно-Сибирской платформы на территории ЯНАО.

Ключевые слова: электромагнитное зондирование, естественные и контролируемые источники, промышленные линии электропередачи.

Введение. Эффективность электромагнитных зондирований определяется, прежде всего, возможностью проведения исследований с максимально высоким соотношением «сигнал – шум» и на максимально больших глубинах. Повышение глубинности электроразведки с контролируемым источником достигается за счет больших разносов между питающими и приемными линиями и максимально низкого (с соблюдением условий дальней зоны) частотного диапазона, а также повышения мощности излучающих устройств. Мощность излучающих устройств, или сила источника [5], определяется размерами питающих линий и силой тока. Для заземленных линий сила источника определяется как электрический момент P , равный произведению силы тока на длину линии; для магнитных петель – это магнитный момент M , равный произведению силы тока на площадь петли. Электрический P и магнитный M моменты линейно входят в выражения для электрических и магнитных компонент полей дипольных источников. Это означает, например, что для увеличения вдвое глубины зондирования с электрическим диполем фиксированной длины, учитывая, что поле изменяется обратно пропорционально кубу расстояния, необходимо увеличить силу тока в 8 раз. При использовании магнитного диполя в этих же условиях необходимо увеличить силу тока в 16 раз. В приведенных оценках речь идет о формальном понятии глубинности, основанном на расчетах изменения горизонтальной составляющей плотности тока с глубиной в однородном нижнем полупространстве. В реальных условиях неоднородных сред понятие глубинности имеет существенно более сложный характер [4].

Увеличение силы сигнала при неизменных размерах питающих линий может быть достигнуто либо путем увеличения мощности генераторного устройства, либо за счет накопления повторяющихся посылок однотипных сигналов с заданной строго контролируемой частотой. Однако и тот и другой подходы имеют свои ограничения. Увеличение мощности генераторных устройств ведет к резкому удорожанию работ, поскольку, как уже отмечалось, для увеличения глубины зондирования вдвое требуется увеличение силы тока в 8 раз, а мощность генератора ($W = UI$) при этом должна быть увеличена в 64 раза. Более легким путем является простое накопление в приемнике многократно повторяющихся сигналов слабого источника. Соотношение «сигнал – шум» при этом увеличивается пропорционально корню квадратному от числа посылок.

Электромагнитные зондирования с мощными контролируруемыми источниками, обозначим их CSEMS (Control Source ElectroMagnetic Sounding), обладают, в сравнении с магнитотеллурическим зондированием (МТЗ), тем преимуществом, что положение и конфигурация источника точно известны, может быть выбран оптимальный частотный диапазон зондирования и, что самое главное, может быть задана высокая точность генерируемых частот, например, с точностью до 3-го или 4-го знака после запятой. Это существенно повышает надежность выделения полезного сигнала на фоне шумов. Современные мощные генераторные устройства [3, 8] позволяют создавать электромагнитные поля высокой интенсивности, а компьютеризированные цифровые измерительные системы [6, 7, 14] – накапливать большие массивы данных в широком динамическом диапазоне (24 дБ и более) и оперативно оценивать соотношение «сигнал – шум» непосредственно в поле.

Несмотря на отмеченные достоинства, глубинные зондирования CSEMS широко не применяются из-за высокой стоимости работ, связанной с необходимостью использования дорогостоящих генераторных устройств и питающих линий.

Отмеченные недостатки CSEMS существенно снижаются при использовании промышленных ЛЭП и заземлений подстанций в качестве элементов излучающих антенн. В мировой практике известно большое число работ такого рода. Их рассмотрение с соответствующими литературными ссылками можно найти в работах [4, 12]. Заметим, что большинство экспериментов по глубинному зондированию с промышленными ЛЭП не вышли за рамки уникальных исследовательских проектов, нацеленных на решение задач фундаментальной геоэлектрики. В настоящей работе представлен первый опыт проведения исследований с промышленными ЛЭП в комплексе с аудимагнитотеллурическим и магнитотеллурическим зондированиями (АМТ-МТЗ) для задач структурной электроразведки в пределах газонефтеперспективных территорий Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО).

В 2011 г. на территории ЯНАО проводились исследования с применением сверхнизкочастотного (СНЧ) источника «Зевс» в комплексе с МТ-АМТ-зондированиями [10]. В 2012 г. были проведены экспериментальные исследования с промышленной ЛЭП «Уренгой – Пангоды» путем подключения к ней генератора «Энергия-2» мощностью 200 кВт в июне месяце и портативного генератора «Энергия-3» мощностью 2 кВт в сентябре месяце. В настоящей работе представлены результаты сентябрьских исследований 2012 г. с портативным генератором «Энергия-3».

Описание района исследований. Район исследований показан на рис.1. Контуром 1 (рис.1, а) ограничена предполагаемая область зондирований с генератором «Энергия-2» мощностью 200 кВт (порядка 200 тыс.км²). Контуром 2 (рис.1, б) отмечена практически достигнутая площадь исследований с портативным генератором «Энергия-3» мощностью 2 кВт (порядка 40 тыс.км²). Основное внимание было обращено на проведение исследований в районах сверхглубоких скважин СГ-6 (Тюменская) и СГ-7 (Ен-Яхинская). Скважина СГ-6 (забой на глубине 7502 м) находится в 60 км к востоку от гигантского Нижне-Уренгойского месторождения газа, в районе положительной гравитационной аномалии, протянувшейся в меридиональном направлении вдоль Уренгойско-Колтозерского грабен-

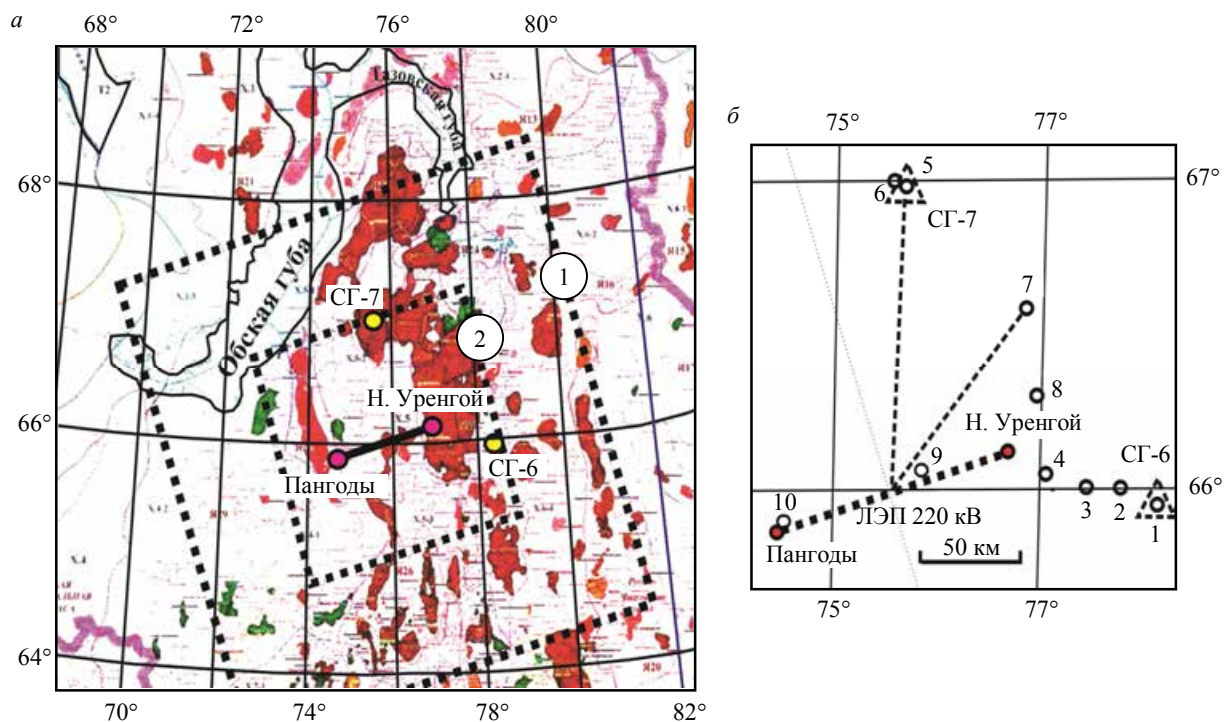


Рис.1. Схема района работ: *а* – расчетные контуры районов, доступных для глубинного зондирования при подключении к ЛЭП «Уренгой – Пангоды» генератора «Энергия-2» (1) и генератора «Энергия-3» (2); темными пятнами обозначены области нефтегазоносности; *б* – положение пунктов зондирования в поле ЛЭП «Уренгой – Пангоды»

рифта [2]. Непосредственно Нижнеуренгойское месторождение приурочено к Уренгойскому валу, установленному по данным электроразведки методом магнитовариационного профилирования в начале 60-х годов [1]. Скважина СГ-7 забурена в 2000 г. на месторождении Большой Уренгой, на Песцовом валу, в 160 км к северо-западу от СГ-6 в области отрицательной гравитационной аномалии [2]. К настоящему времени на ней достигнута рекордная для осадочных бассейнов России глубина 8250 м.

Регистрация сигналов осуществлялась с применением двух пятиканальных широкополосных станций VMTU-10 (ООО «ВЕГА», Россия) [14]. Сигнал в питающую линию ВЛ «Уренгой – Пангоды» подавался от портативного генератора «Энергия-3» мощностью

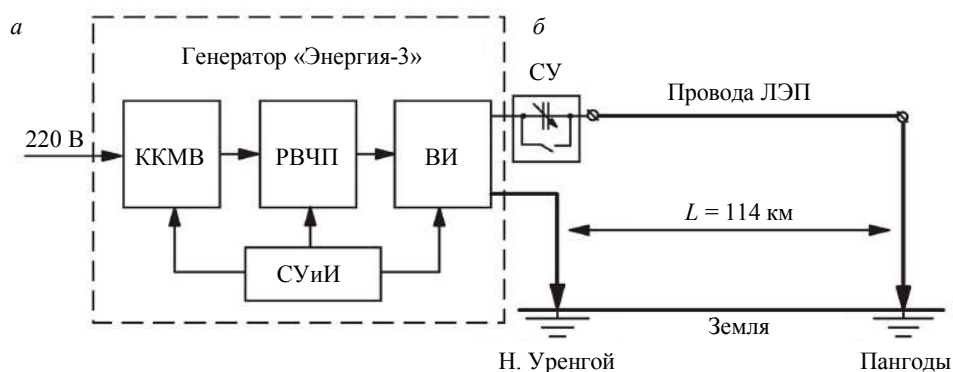


Рис.2. Структурная схема портативного КНЧ-СНЧ генератора «Энергия-3» (*а*) и схема его подключения к ВЛ 220 кВ «Уренгой – Пангоды» (*б*)

ККМВ – корректор коэффициента мощности – выпрямитель; РВЧП – развязывающий высокочастотный преобразователь; ВИ – выходной инвертор; СУиИ – схема управления и индикации; СУ – согласующее устройство

2 кВт в диапазоне частот 0,2-175 Гц. Сила тока в линии изменялась в пределах от 5-7 А на высоких частотах (100 Гц и выше) до 12-15 А на частотах 1 Гц и ниже.

Принципиальная схема подключения портативного генератора к промышленной ЛЭП «Уренгой – Пангоды» показана на рис.2.

Конкретной задачей работ явилось проведение тестовых наблюдений электромагнитного поля по двум профилям – субширотному, проходящему на трассе сверхглубокой

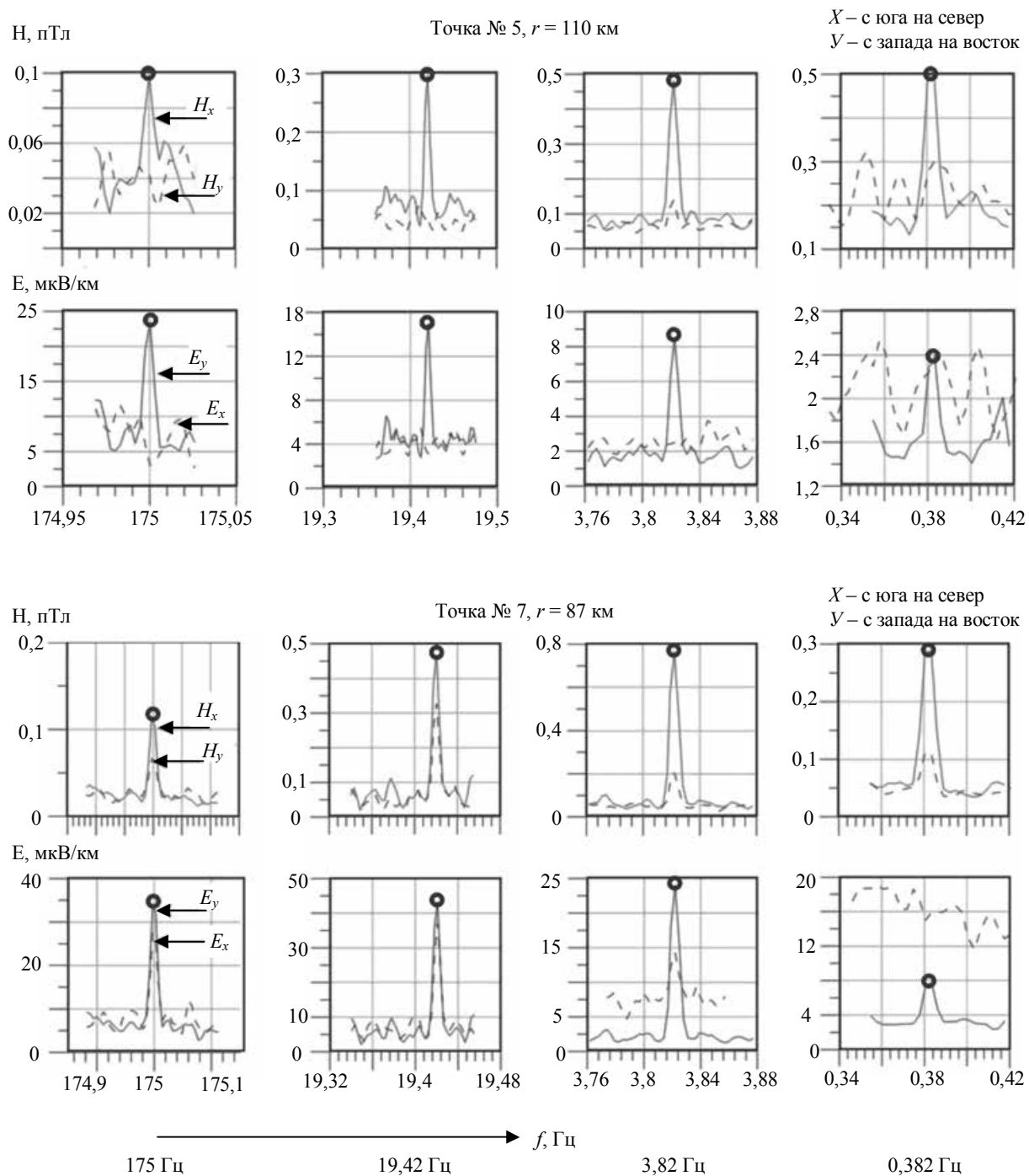


Рис.3. Спектры амплитуды электрических и магнитных компонент поля по результатам измерения сигналов портативного генератора мощностью 2 кВт, который подключен к ВЛ 220 кВ «Уренгой – Пангоды» в точках 5 и 7, удаленных от центра ЛЭП соответственно на 110 и 87 км. Положение точек зондирования показано на рис.1, б

скважины СГ-6 (Тюменской), и субмеридиональному, проходящему на траверсе сверхглубокой скважины СГ-7 (Ен-Яхинской). Измерения поля портативного генератора «Энергия-3», подключенного к промышленной ЛЭП «Уренгой – Пангоды», выполнены в восьми пунктах, расположенных вдоль дорожных магистралей примерно в широтном и в меридиональном направлениях (рис.1, б). В каждой точке зондирования проводились суточные записи МТ-АМТ-поля. Все записи АМТ-МТЗ выполнялись с применением синхронных наблюдений на удаленной точке (reference point) для устранения помех. Кроме того, в районе приемных линий АМТ-МТЗ проводились вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) на постоянном токе с разносами до 500 м.

Анализ всех результатов АМТ-МТЗ в комплексе с ВЭЗ и с зондированиями в поле промышленной ЛЭП будет представлен в следующей публикации. Отметим только, что данные АМТ-МТЗ (за исключением точки 5) оказались сильно подверженными влиянию помех из-за большого количества трубопроводов и промышленных энергоустановок, расположенных вдоль дорожной сети. Данные ВЭЗ тоже оказались разнородными из-за влияния островной мерзлоты. Разбросы между значениями кажущегося сопротивления по данным ВЭЗ на соседних точках достигали 2-3 порядков. В то же время результаты измерений поля, создаваемого промышленной ЛЭП «Уренгой – Пангоды» с подключенным к ней генератором «Энергия-3», несмотря на отмеченную по данным ВЭЗ неоднородность разреза, оказались весьма стабильными по форме и уровню значений кажущегося сопротивления. Разброс значений кажущегося сопротивления в пересчете из спектральных амплитуд между соседними точками на одних и тех же частотах не превышал 0,5 порядка (рис.3).

Точка 5 (рис.3) расположена близко к экваториальной зоне, на удалении 110 км от центра линии. Точка 7 расположена под углом, близким к 45° от оси питающей линии, на удалении 87 км. Можно видеть, что сигналы ЛЭП уверенно регистрируются на обеих точках как по электрической, так и по магнитной компонентам – вплоть до частоты 3,8 Гц. Примечательно, что амплитуда поля слабо изменяется с увеличением расстояния между источником и приемником. Выполненные расчеты показывают, что частично такое поведение поля объясняется за счет разной геометрии установки и частично за счет ионосферного влияния, усиливающегося с удалением от источника. В районах скважин СГ-6 и СГ-7 была осуществлена также регистрация сигналов антенны сверхнизкочастотного (СНЧ) излучения «Зевс», расположенной на Кольском полуострове [8]. Пример регистрации сигналов показан на рис.4.

Источник «Зевс» работал попеременно на пяти частотах: 188, 144, 82, 62 и 44 Гц. Сигналы уверенно зарегистрированы в районе обеих скважин (СГ-6 и СГ-7). При этом можно видеть, что в районе скважины СГ-6 шумы значительно выше в сравнении с СГ-7, особенно по электрическому полю. Преобладание электрических помех указывает на их гальваническую природу и на близкое расположение источника. Можно отметить также, что, несмотря на значительное (160 км) расстояние между скважинами, интенсивность сигнала по магнитному полю практически не изменяется с удалением от источника, а по электрическому полю сигнал в районе более удаленной от источника скважины СГ-6 даже сильнее, чем в скважине СГ-7. Такое поведение поля хорошо объясняется более высоким сопротивлением верхней части разреза в районе СГ-6.

Результаты совместной интерпретации зондирований с естественными и контролируемыми источниками приведены на рис.5 на примере измерений вблизи сверхглубокой скважины СГ-7 (Ен-Яхинской). Интерпретация выполнена на основе данных зондирования с портативным генератором «Энергия-3» и высоковольтной ЛЭП «Уренгой – Пангоды» в диапазоне высоких частот 175-3,82 Гц и с учетом данных МТ-зондирования в диапазоне периодов 0,25-1000 с.

Были также выполнены зондирования с источником «Зевс» (рис.5). Полученные отклики соединены с откликами регионального магнитовариационного зондирования (периоды

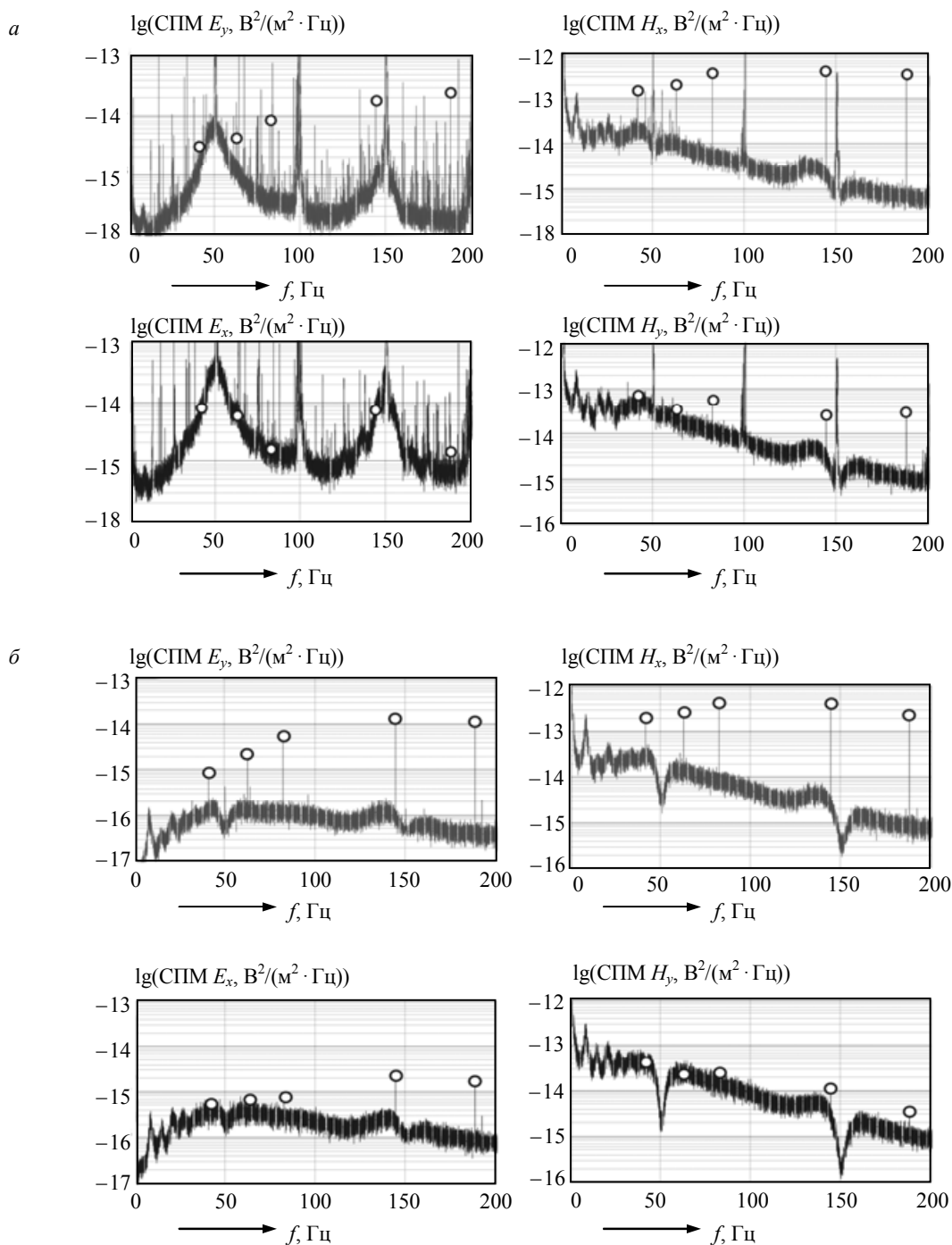


Рис.4. Диаграммы спектров плотности мощности (СПМ) электрического (E_y) и магнитного (H_x) поля по результатам регистрации сигналов СНЧ-антенны «Зевс» в районе скважин СГ-6 (а) и СГ-7 (б).

Положение пунктов приема показано на рис.1, б

более 10^4 с). Промежуток между ними (интервал периодов $0,25-10^3$ с) был заполнен результатами магнитотеллурического зондирования. По полученному набору оценок комплексного кажущегося сопротивления (модуля и фазы), включая их доверительные интервалы, которые определяют коридор возможных решений, выполнена инверсия ОССАМ [13], где выбирается вариант с максимально плоской моделью среды для экспериментальных данных. При таком варианте решения подбирается кривая, максимально точно соответствующая

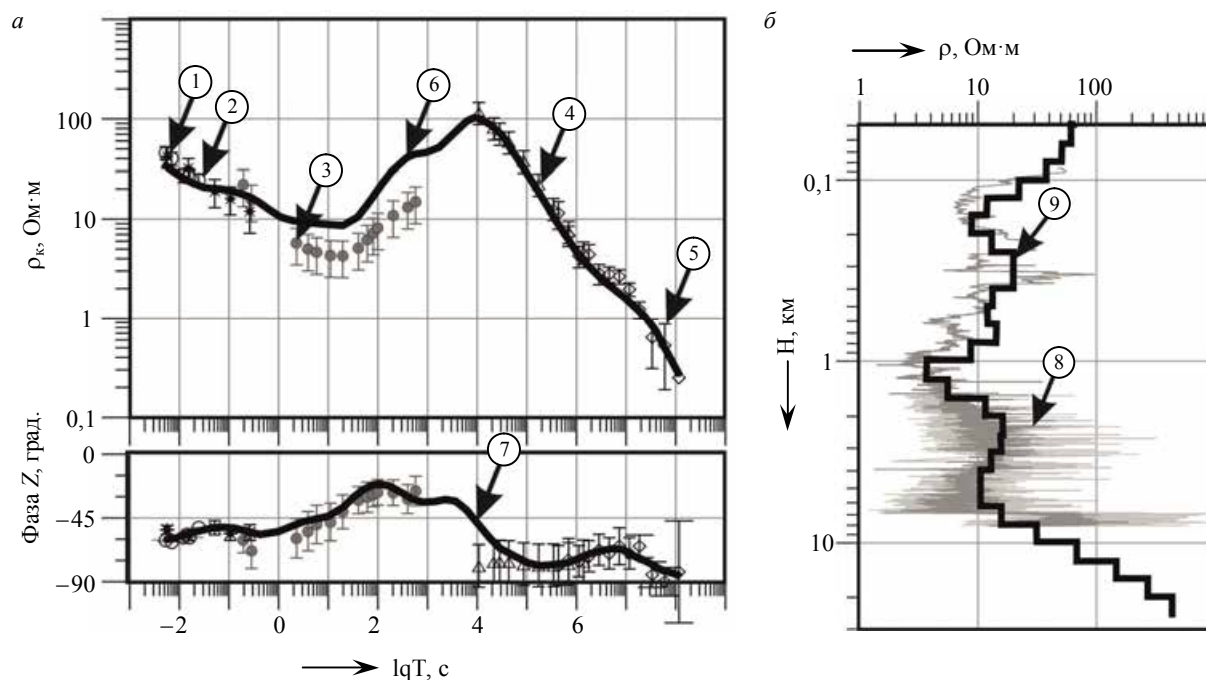


Рис.5. Результаты глубинного зондирования в поле естественных и контролируемых источников в районе сверхглубокой скважины СГ-7:

a – кривые кажущегося сопротивления и фазы: 1 – по измерениям поля СНЧ-антенны «Зевс» (звездочки); 2 – то же, ЛЭП «Уренгой – Пангоды» (кружки); 3 – АМТ-МТ-зондирования; 4 – данные МВЗ обсерватории «Новосибирск», обработанные по методике [15] с использованием программы [11] (треугольники); 5 – данные глобального зондирования [9] (ромбы); 6 – модельная кривая по результатам решения обратной задачи по модулю кажущегося сопротивления; 7 – то же по фазе импеданса;

б – электрические разрезы: 8 – по данным электрического каротажа, 9 – по результатам решения обратной задачи частотного зондирования с источниками 1-3

экспериментальным оценкам и их доверительным интервалам с учетом заданных параметров точности и разбиения на слои (детальности) разреза, т.е. такую кривую искусственно сглаживать не требуется. Последний подход (сглаживание), безусловно, позволяет искусственно снизить случайную ошибку экспериментальных оценок, но при этом велика возможность исказить экспериментальные данные (простой пример – облако значений, через которое возможно как угодно провести кривую) и потому такой подход нами не практикуется.

Полученное распределение сопротивления от глубины (кривая 9 на рис.5, *б*) достаточно хорошо согласуется с данными электрического каротажа в стволе скважины (кривая 8 там же). Частотные кривые кажущегося сопротивления такого разреза приведены на рис.5, *a* в виде модуля кажущегося сопротивления (кривая 6) и фазы импеданса (кривая 7). Следует отметить, что эти кривые, очевидно в силу близости одномерной модели и данных каротажа, хорошо согласуются с частотными кривыми, полученными в результате решения прямой задачи по данным каротажа (на рис.5, *a* не приведены).

Можно видеть, что результаты измерений кажущегося сопротивления в поле двух различных типов контролируемых источников и на разных удалениях от точки приема (2000 км – источник «Зевс» и 110 км – ЛЭП «Уренгой – Пангоды») уверенно совпадают между собой и согласуются с кривыми 6 и 7.

Результаты МТЗ представлены в виде средних значений кажущегося сопротивления с доверительными интервалами (обозначены кружками 3 на рис.5, *a*). Экспериментальная кривая МТЗ повторяет форму модельной кривой 6, но смещена параллельно вниз по оси сопротивлений почти на половину порядка. Смещение объясняется тем, что обработка результатов зондирования с естественными и контролируемыми источниками выполнена

преимущественно по импедансу $Z_{yx} = E_y/H_x$, т.е. только по одной паре сопряженных компонент E_y и H_x , где E_y ориентирована по широте (электрическое поле) и H_x ориентирована по меридиану (магнитное поле), что соответствует субширотной ориентировке излучающих линий контролируемых источников – «Зевс» и ЛЭП «Уренгой – Пангоды».

Отметим, что кривые кажущегося сопротивления МТЗ по результатам наблюдений 2011 г., опубликованные в [10], в этом же диапазоне частот располагаются на половину порядка выше и практически сливаются с модельной кривой 6 на рис.5, а. Объясняется это тем, что в 2011 г. обработка МТЗ выполнялась путем поворота системы координат измерительной линии на направление, в котором дополнительные компоненты тензора сопротивлений пренебрежимо малы. Этот азимут составил 30° к западу. Для удобства анализа на рис.5 приведена кривая МТЗ, измеренная в том же азимуте, что и кривая зондирования в поле контролируемых источников, т.е. для широтной электрической и меридиональной магнитных компонент. При этом необходимо отметить, что в поле контролируемых источников значения кажущегося сопротивления существенно слабее зависят от угла поворота измерительной системы, чем в методах МТ-АМТ-зондирования. Причина этого явления не совсем понятна. Тем не менее, мы неоднократно наблюдали в Карело-Кольском регионе и в Центральной Финляндии [4] стабильность результатов зондирования с контролируемыми источниками (независимость от ориентировки источника и измерительной системы), тогда как данные МТЗ сильно зависели от ориентировки измерительной системы и распадались на минимальные и максимальные кривые, различающиеся иногда на несколько порядков.

Для примера на рис.4 значения кажущегося сопротивления источника «Зевс» в двух взаимно ортогональных направлениях определены непосредственно из диаграмм спектральной плотности мощности. Для этого достаточно воспользоваться формулой.

$$\rho_T = \frac{|Z_{yx}|^2}{\omega \mu_0} = 0,127T \frac{СИМ_{E_y}}{СИМ_{H_x}} 10^6.$$

Полученные таким образом значения кажущегося сопротивления по импедансу Z_{yx} с точностью 10 % совпадают со значениями кажущегося сопротивления по данным АМТ-МТЗ, что указывает на высокую степень горизонтальной однородности разреза осадочного чехла в районе скважины СГ-7.

При обработке результатов эксперимента 2012 г. в решение обратной задачи было введено методическое усовершенствование. Оно заключается в том, что больший вес придавался результатам зондирования с контролируемыми источниками (CSEMS) на коротких периодах 0,005-0,25 с (кружки 1 и 2 на рис.5, а), а также геомагнитным откликам полей естественных источников на самых длинных периодах 10^4 - 10^8 с (глубинное магнитовариационное зондирование (ГМВЗ), кружки 4 и 5 на рис.5, а). В среднем диапазоне периодов решение обратной задачи выполнялось с опорой на фазовую кривую импеданса МТЗ (обозначена кружком 7 на рис.5, а). Как известно, в диапазоне МТЗ наиболее велика опасность статических искажений, приводящих к смещению кривой кажущегося сопротивления. Фазовая кривая свободна от этого влияния, но нуждается в количественной привязке по уровню значений кажущегося сопротивления. Эта задача в принятом алгоритме решения обратной задачи выполняется с помощью отмеченной выше привязки к высокочастотным (CSEMS) и низкочастотным (ГМВЗ) ветвям глубинного зондирования. Подобранный разрез (разрез 9 на рис.5, б) близко согласуется с результатами каротажа сопротивления, (кривая 8 на рис.5, б).

В верхней части разреза земной коры (в пределах осадочного чехла) выделяются три слоя пониженного сопротивления: в интервале глубин 100-200; 800-1500 и 4-7 км (рис.5, б). Глубже 7 км наблюдается резкое увеличение сопротивления, связываемое с вулканогенно-осадочными образованиями пермо-триасового основания осадочного чехла (траппов).

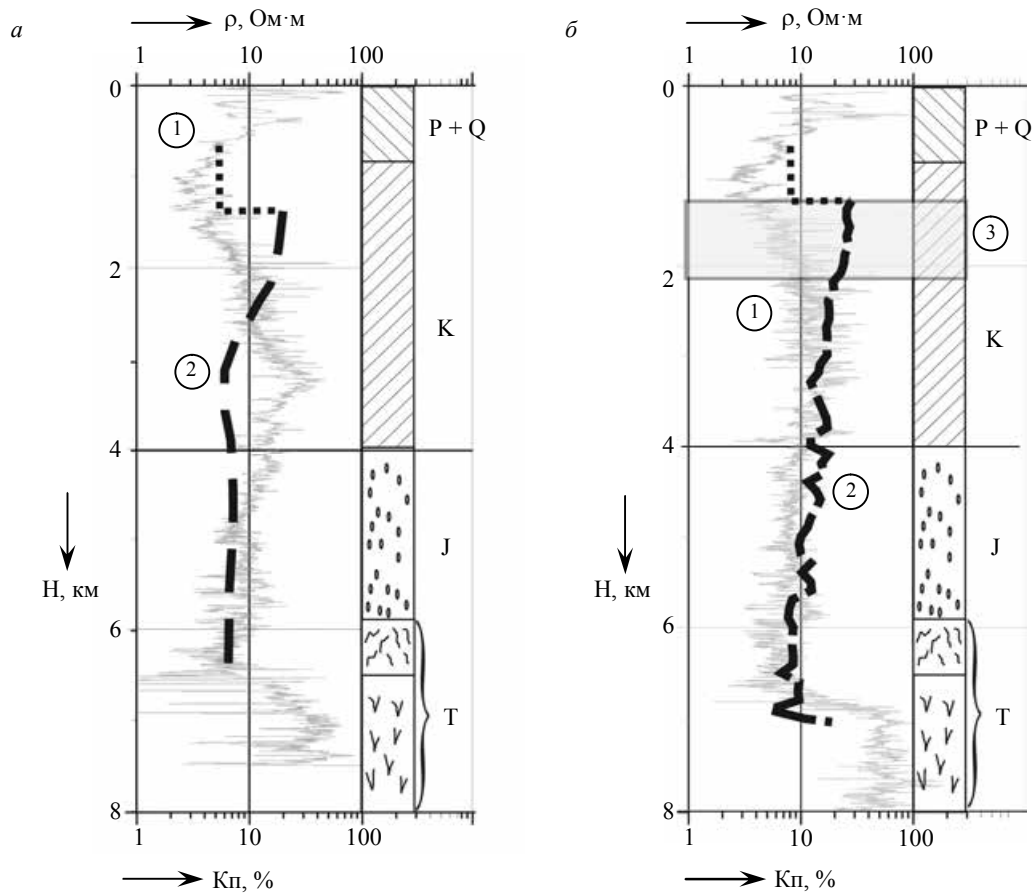


Рис.6. Сопоставление результатов глубинного электромагнитного зондирования в поле промышленной ЛЭП «Уренгой – Пангоды» и АМТ-МТЗ с геологическим разрезом и с каротажем скважин СГ-6 (а) и СГ-7 (б)
 Цифры в кружках: 1 – электрический каротаж сопротивления; 2 – кривая проницаемости, тонким пунктиром над кривой 2 показана нижняя граница региональной покрышки (флюидоупора), сложенной слабо проницаемыми для флюидов глинами палеоген-верхнемелового возраста; 3 – прямоугольником отмечена область градиентного роста сопротивления с глубиной по данным электромагнитного зондирования, совпадающая с областью высокой пористости (до 25 %).
 P + Q – палеоген-четвертичные отложения; К – карбон; J – юра; Т – триас

В диапазоне глубин от 1,2 до 2,2 км по данным каротажа (рис.6) установлен интервал осадочных пород с повышенными коллекторскими свойствами и высокой пористостью (до 25 %). Сравнивая его с результатами интерпретации электромагнитного зондирования на рис.5, б, можно заметить, что интервалу соответствует область градиентного увеличения электрического сопротивления от 3 Ом·м на глубине 1,2 км до 15 Ом·м на глубине 2,2 км (рис.5, б).

Установленный в ходе эксперимента факт позволяет сделать вывод о перспективности использования глубинной электроразведки для изучения строения осадочного чехла и для возможного прогнозирования положения горизонтов с повышенными коллекторскими свойствами. Информативный диапазон периодов колебаний первичного поля, необходимый для решения этой задачи (для выделения толщи 3 на рис.6), находится в пределах 10-200 с на самом пределе возможностей зондирования с портативным генератором «Энергия-3» по причине падения интенсивности полезного сигнала. В случае применения в 100 раз более мощного генератора «Энергия-2» эта проблема, по-видимому, может быть решена более надежно, даже без привлечения АМТ-МТ-зондирований. Это является задачей следующего этапа исследований.

Выводы

1. Разработаны основные элементы методики глубинных электромагнитных зондирований в поле естественных и мощных контролируемых источников поля (промышленных ЛЭП) для задачи поисков полезных ископаемых в условиях Ямало-Ненецкого автономного округа. Основу стратегии составляет методика площадных электромагнитных зондирований с использованием источников средней (2 кВт) и большой (до 200 кВт) мощности. При несомненном преимуществе использования источников большой мощности за источниками средней мощности остается то преимущество, что их легко доставить к месту работ любым транспортом (включая воздушный транспорт), они позволяют более оперативно подключаться к ЛЭП и оказывают меньшее влияние на подземные и наземные линии связи и коммуникации. В качестве излучающих антенн используются промышленные ЛЭП или же антенна сверхнизкочастотного излучения «Зевс». Синхронно выполняются аудиоманнитотеллурические и магнитотеллурические зондирования (АМТ-МТЗ) в поле естественных источников.

2. Разработана методика решения обратной задачи электромагнитных зондирований с промышленными ЛЭП и с антенной «Зевс» в комплексе с АМТ-МТЗ. Методика базируется на итерационной процедуре, в которой за опоры приняты результаты зондирований с контролируемыми источниками в высокочастотном диапазоне (200-0,25 Гц), результаты глобальных МВЗ в диапазоне суточных вариаций и результаты измерений фазы импеданса в среднем диапазоне периодов по данным МТ-АМТ-зондирований.

3. Выполнена калибровка результатов интерпретации глубинных электромагнитных зондирований путем сопоставления их с данными сверхглубокого бурения на примере Ен-Яхинской скважины СГ-7. Над устьем СГ-7 выполнены зондирования с двумя типами контролируемых источников поля и АМТ-МТ-зондирования. Установлены три промежуточные области пониженного сопротивления на глубинах 200 м, 1 км и в интервале 5-7 км, согласующиеся с результатами электрического каротажа. Глубже 7 км по резкому увеличению сопротивления фиксируется кровля траппов, подстилающих осадочный чехол.

Работа выполнена на средства грантов РФФИ 11-05-12033-офи-м-2011 и 13-05-12044-офи-м-2013 при поддержке губернатора ЯНАО Д.Н.Кобылкина, сотрудников Администрации ЯНАО И.В.Петровой и А.Л.Титовского, а также руководства МЭС Западной Сибири и Ямало-Ненецкого ПМЭС, предоставивших ВЛ-220 «Уренгой – Пангоды» в качестве антенны для проведения эксперимента по глубинному электромагнитному зондированию земной коры в нефтеперспективных районах Западной Сибири.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра, 1968. 255 с.
2. Возможности и перспективы применения несейсмических методов для поисков скоплений углеводородов и геосолитонная концепция их образования / В.М.Мегеря, В.Г.Филатов, В.И.Старостенко, И.Н.Корчагин, А.М.Лобанов, Ю.В.Гласко, М.Ю.Волоцков, С.А.Чкачков // Геофизический журнал. Киев: Наукова Думка, 2012. Т.34. № 3. С.4-21.
3. Высоковольтный силовой инвертор генератора «Энергия-2» для электромагнитных зондирований и мониторинга очаговых зон землетрясений / М.Б.Баранник, А.Н.Данилин, Б.В.Ефимов, В.В.Колобов, П.И.Прокопчук, В.Н.Селиванов, А.Н.Шевцов, Ю.А.Копытенко, А.А.Жамалетдинов // Сейсмические приборы. 2009. Т.45, № 2. С.5-23.
4. Жамалетдинов А.А. Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований с мощными контролируемыми источниками (опыт критического анализа). СПб: СОЛЮ, 2012. 163 с.
5. Жданов М.С. Сто лет электромагнитной геофизики: заметки о прошлом и дорога в будущее // Материалы 5-й Всероссийской школы ЭМЗ-2011, Санкт-Петербург, Петродворец. СПб: Изд-во СПбГУ, 2011. Кн.1. С.52-85.
6. Ингертов О.И. Современные тенденции в развитии аппаратурного комплекса для электроразведочных работ на суше и на море // Материалы 5-й Всероссийской школы ЭМЗ-2011, Санкт-Петербург, Петродворец. СПб: Изд-во СПбГУ, 2011. Кн.1. С.86-103.

7. Многофункциональная цифровая измерительная станция КВВН-7 для электромагнитного мониторинга сейсмоактивных зон / В.В.Колобов, Д.Н.Куклин, А.Н.Шевцов, А.А.Жамалетдинов // Сейсмические приборы. 2011. Т.47, № 2. С.47-61.
8. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона / Е.П.Велихов, А.А.Жамалетдинов, Л.А.Собчаков, А.В.Вешев, А.К.Сараев, А.Д.Токарев, А.Н.Шевцов, А.В.Васильев, А.Г.Сонников, А.В.Яковлев // ДАН. 1994. Т.338, № 1. С.106-109.
9. Семенов В.Ю. Электропроводность мантии по данным российских геомагнитных обсерваторий / В.Ю.Семенов, Е.П.Харин // Физика Земли. 1997. № 9. С.31-37.
10. Электромагнитное зондирование земной коры в районе сверхглубоких скважин СГ-6 и СГ-7 в полях естественных и мощных контролируемых источников / А.А.Жамалетдинов, М.С.Петрищев, А.Н.Шевцов, В.В.Колобов, В.Н.Селиванов, О.А.Есипко, Е.А.Копытенко, В.Ф.Григорьев // ДАН. 2012. Т.445, № 2. С.205-209.
11. 3D modeling and analysis of the Dst EM Responses in the North Pacific Ocean region / A.Kuvshinov, H.Utada, D.Avdeev, T.Koyama // Geophys. J. Int. 2005. № 160. P.505-526.
12. Boerner D.E. Controlled source electromagnetic deep sounding: theory, results and correlation with natural source results. Invited Review Paper for the 10th Workshop on EM Induction. Ensenada: Mexico. 1991. P.3-50.
13. Constable S.C. Occam's inversion; a practical algorithm for the inversion of electromagnetic data / S.C.Constable, R.L.Parker, C.G.Constable // Geophysics. 1987. 52. P.289-300.
14. New portable multifunctional broadband MT System / Ye.A.Kopytenko, N.A.Palshin, S.V.Poljakov, A.V.Schennikov, B.I.Reznikov, B.V.Samsonov // IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth 20th Workshop Abstract, Giza, Egypt, September 18-24, 2010.
15. Vozar J. Compatibility of induction methods for mantle soundings / J.Vozar, V.Y.Semenov // Journal of geophysical research. 2010. Vol.15. B03101.

REFERENCES

1. Berdichevsky M.N. Jelektricheskaja razvedka metodom magnetotelluricheskogo profilirovaniya (*Electrical prospecting method of magnetotelluric profiling*). Moscow: Nedra, 1968, 255 p.
2. Megerja V.M., Filatov V.G., Starostenko V.I., Korchagin I.N., Lobanov A.M., Glasko Yu.V., Wolotzkov M.Yu., Chkachkov S.A. Vozможности i perspektivy primeneniya nesejsmicheskikh metodov dlja poiskov skoplenij uglevodorodov i geosolitonnoj koncepcija ih obrazovaniya (*The possibilities and perspectives of non-seismic methods for hydrocarbon accumulation and a geosoliton concept of their formation*). Geofizicheskij zhurnal. Kiev: Naukova Dumka, 2012. Vol.34, N 3, p.4-21.
3. Barannik M.B., A.N.Danilin, B.V.Efimov, V.V.Kolobov, P.I.Prokopčuk, V.N.Selivanov, A.N.Shevtsov, Ye.A.Kopytenko, A.A.Zhamaletdinov. Vysokovol'tnyj silovoj inverter generatora «Energija-2» dlja jelektromagnitnyh zondirovanij i monitoringa ochagovyh zon zemletrjasenij (*High-voltage power inverter of «Energy-2» generator for electromagnetic sounding and monitoring of earthquake source zones*). Sejsmicheskie pribory. 2009. Vol.45, N 2. p.5-23.
4. Zhamaletdinov A.A. Teorija i metodika glubinyh jelektromagnitnyh zondirovanij s moshhnyimi kontroliruemyimi istochnikami (opyt kriticheskogo analiza) (*A Theory and methods of deep electromagnetic soundings with powerful controlled sources (a case study)*). St Petersburg: Solo, 2012, p.163. ISBN 978-5-98340-272-0 (book).
5. Zhdanov M.S. Sto let jelektromagnitnoj geofiziki: zametki o proshlom i doroga v budushhee (*One Hundred Years of electromagnetic geophysics: The past and the future*) St Petersburg, Petrodvorec. St Petersburg: Izd-vo SPbGU, 2011. Book 1, p.52-85.
6. Ingerov O.I. Sovremennye tendencii v razvitii apparaturnogo kompleksa dlja jelektrozvedochnyh rabot na sushe i na more (*Current trends in development of hardware complexes for electrical exploration on land and at sea*). Materialy 5-j Vserossijskoj shkoly JeMZ-2011, St Petersburg, Petrodvorec. St Petersburg, Izd-vo SPbGU. 2011. Book 1, p.86-103.
7. Kolobov V.V., Kuklin D.N., Shevtsov A.N., Zhamaletdinov A.A. Mnogofunkcional'naja cifrovaja izmeritel'naja stan-cija KVVN-7 dlja jelektromagnitnogo monitoringa sejsmoaktivnyh zon (*A Multifunctional digital measuring station KVVN-7 for electromagnetic monitoring of seismically active areas*). Sejsmicheskie pribory. 2011. Vol.47, N 2, p.47-61.
8. Velikhov E.P., Zhamaletdinov A.A., Sobchak L.A., Veshev A.V., Saraev A.K., Tokarev A.D., Shevtsov A.N., Vas-siliev A.V., Sonnikov A.G., Yakovlev A.V. Opyt chastotnogo jelektromagnitnogo zondirovaniya zemnoj kory s primeneniem moshhnoj anteny SNCh-diapazona (*A Case of frequency electromagnetic sounding of the Earth's crust using a powerful ELF-antenna*). DAN. 1994. Vol.338, N 1, p.106-109.
9. Semenov V.Yu., Harin E.P. Jelektroprovodnost' mantii po dannym rossijskikh geomagnitnyh observatorij (*Electrical conductivity of the mantle according to Russian geomagnetic observatories*). Fizika Zemli. 1997. N 9, p.31-37.
10. Zhamaletdinov A.A., Petrishchev M.S., Shevtsov A.N., Kolobov V.V., Selivanov V.N., Esipko O.A., Kopytenko Ye.A., Grigoriev V.F. Jelektromagnitnoe zondirovanie zemnoj kory v rajone sverhglubokih skvazhin SG-6 i SG-7 v poljah este-stvennyh i moshhnyh kontroliruemyh istochnikov (*Electromagnetic sounding of the earth's crust in the area of ultra-deep wells SH-6 and SH-7 in the fields of natural and powerful controlled sources*). DAN. 2012. Vol.445. N 2, p.205-209.
11. Kuvshinov A., Utada H., Avdeev D., Koyama T. 3D modeling and analysis of the Dst EM Responses in the North Pacific Ocean region (*3D modeling and analysis of the Dst EM Responses in the North Pacific Ocean region*). Geophys. J. Int. 2005. N 160, p.505-526.
12. Boerner D.E. Controlled source electromagnetic deep sounding: theory, results and correlation with natural source results. Invited Review Paper for the 10th Workshop on EM Induction. Ensenada: Mexico. 1991, p.3-50.

13. *Constable S.C., Parker R.L., Constable C.G.* Occam's inversion; a practical algorithm for the inversion of electromagnetic data. *Geophysics*, 1987. 52, p.289-300.

14. *Kopytenko Ye.A., Palshin N.A., Poljakov S.V., Schennikov A.V., Reznikov B.I., Samsonov B.V.* New portable multi-functional broadband MT System. IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth 20th Workshop Abstract, Giza, Egypt, September 18-24, 2010.

15. *Vozar J. & Semenov V.Yu.* Compatibility of induction methods for mantle soundings. *Journal of geophysical research*. 2010. Vol.15. B03101.

PILOT ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS WITH THE USE OF INDUSTRIAL POWER TRANSMISSION LINE «URENGOY – PANGODY» ALONG WITH AMT-MT-SOUNDINGS

A.A.ZHAMALETDINOV, *Dr. of Geological and Mineral Sciences, Chief Research Scientist,*
abd.zham@mail.ru

St Petersburg branch of IZMIRAN, Russia

A.N.SHEVTSOV, *PhD in Physics and Mathematics, Senior Research Scientist,*

anshev2009-01@rambler.ru

Geological Institute, RAS, Apatity, Russia

V.V.KOLOBOV, *PhD in Engineering Sciences, Leading Research Scientist,*

kolobov@adm.kolasc.net.ru

Institute of Physical and Technical Problems Energy North KSC RAS, Apatity, Russia

M.S.PETRISHCHEV, *PhD in Engineering Sciences, Head of Division, ms_petr@mail.ru*

St Petersburg branch of IZMIRAN, Russia

In 2011 and 2012 in-situ electromagnetic soundings using the industrial power transmission line «Urengoy-Pangody» were taken in the Yamal-Nenets Autonomous District (YaNAD). They were conducted both in the field of the extra-low frequencies (ELF) antenna «Zeus» located on the Kola Peninsula and in the fields of the natural sources (AMT-MT). Conductive layers were installed at depths of a few hundred meters and more than 1 km. These layers were linked with changes in lithology, porosity and fluid saturation of rocks. The research results showed perspective of complex electromagnetic sounding with natural and powerful controlled sources to find gas and oil promising horizons at a depth in the sedimentary cover of the West Siberian platform in the YaNAD.

Key words: electromagnetic sounding, controlled and natural sources, industrial power lines.

ВОЗМОЖНОСТИ РЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ В НЕФТЕНОСНЫХ РАЙОНАХ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (АКВАТОРИЯ р.ЛЕНЫ, КРИВОЛУКСКАЯ ПЛОЩАДЬ)

Н.Н.НЕВЕДРОВА, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник,
NevedrovaNN@ipgg.nsc.ru

А.М.САНЧАА, канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник, *SanchaaAM@ipgg.nsc.ru*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

С.М.БАБУШКИН, директор, *bab@gs.nsc.ru*

Д.В.КРЕЧЕТОВ, геофизик, *Krechet1@Bk.ru*

Сейсмологический филиал геофизической службы СО РАН, Новосибирск, Россия

Профиль геофизических работ выполнен по фарватеру р.Лены. Исследования проводились комплексом методов (электромагнитные зондирования становлением поля, сейсморазведка методом общей глубинной точки). По данным электроразведки получен полный геоэлектрический разрез осадочных отложений и характеристики опорного электрического горизонта. В осадочном чехле по простираению продуктивного слоя четко выделены зоны с повышенными и пониженными значениями удельного электрического сопротивления. Совместный анализ результатов геоэлектрических и сейсмических исследований подтверждает перспективность комплексирования этих методов.

Ключевые слова: Криволюкская площадь, электромагнитные зондирования становлением поля.

Методы электроразведки с контролируруемыми источниками включают значительное количество разнообразных модификаций и востребованы в настоящее время для очень широкого круга задач, включая поиски и разведку полезных ископаемых различного генезиса. Применение электроразведки особенно актуально при поисках нефти и газа на Сибирской платформе, так как геоэлектрические условия здесь более благоприятны для этих методов, чем, например, в Западной Сибири. Современные технологии индукционных электромагнитных зондирований позволяют изучать разрез Сибирской платформы до значительных глубин (3-4 км)*. В статье представлены основные результаты региональных речных исследований методом электромагнитных зондирований становлением поля (ЗСБ) в Восточной Сибири. Измерения этим методом были выполнены во время полевого сезона 2008 г. на территории Криволюкского лицензионного участка Киренского района Иркутской области (рис.1). Участок расположен на юго-восточном склоне Непско-Ботуобинской антеклизы и относится к Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. Электроразведочный профиль выполнен по фарватеру р.Лены. На этом же профиле ранее были выполнены сейсмические работы методом общей глубинной точки (ОГТ). Общая длина профиля геофизических наблюдений составила 70 км. Методом ЗСБ всего было выполнено 140 физических наблюдений. Размещение по профилю приемных пунктов электроразведочных работ показано на рис.1.

В качестве приемной установки использована многовитковая рамка (40 витков) квадратной формы со стороной 10 м. На врезке рис.1 представлен один из генераторных контуров, который выполнен из одновиткового провода, закрепленного по берегам реки в виде неправильного вытянутого четырехугольника. Продольная сторона контура (вдоль русла

* Геоэлектрические исследования перспективных участков нефтегазоносности юга Сибирской платформы / Н.Н.Неведрова, М.И.Эпов, А.М.Санчаа, С.М.Бабушкин // Записки Горного института. 2009. Т.183. С.260-263.

Nevedrova N.N., Epov M.I., Sanchaa A.M., Babushkin S.M. Geoelektricheskie issledovaniya perspektivnykh uchastkov neftegazonosnosti yuga Sibirskoi platformy (Geoelectrical exploration of promising oil and gas bearing areas in the southern part of the Siberian platform) Zapiski Gornogo instituta., 2009. Vol.183, p.260-263.

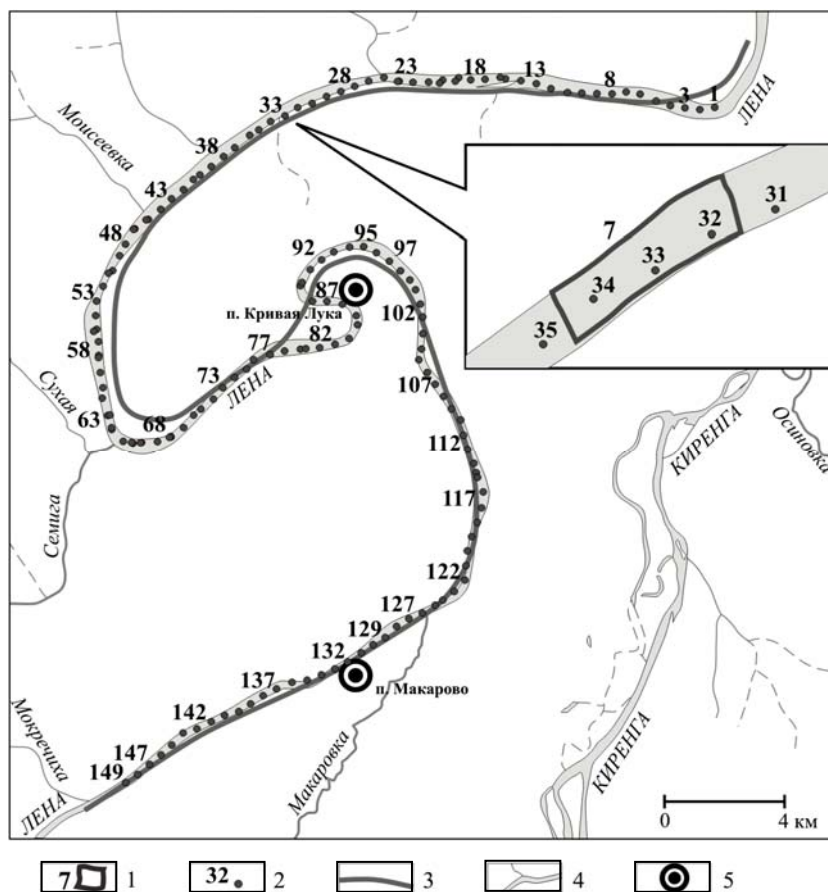


Рис.1. Схема района электроразведочных и сейсмических работ, выполненных на акватории р.Лены по одному профилю. Профиль и пункты ЗСБ. Масштаб 1 : 250000

- 1 – генераторный контур; 2 – пункты приема электроразведочных наблюдений;
3 – сейсмический профиль; 4 – реки; 5 – населенные пункты

реки) составила в среднем 1500 м, а поперечная (поперек русла), в зависимости от ширины реки, изменялась от 300 до 700 м. Из-за топографических особенностей местности (русло реки, наличие островов и кос) не было возможности разложить генераторный контур правильной геометрической формы. При раскладке проводились замеры координат по периметру контура с шагом 50-100 м (в зависимости от кривизны маршрута). Затем по измеренным координатам рассчиталась площадь контура, а также магнитный момент генераторной установки. Расстояние между пунктами возбуждения составляло от 2 до 3,5 км. Расстояние между пунктами регистрации выдерживалось в пределах 500 м. Амплитуда тока в генераторном контуре достигала 30 А. Все измерения ЗСБ

выполнены с помощью электроразведочных станций «Импульс-авто», «Импульс-сл». Динамический диапазон измерения ЭДС переходного процесса – 136 дБ; диапазон времени регистрации составлял от 0,5 мкс до 10 с; длина записи достигала 0,5 с. Минимальная амплитуда измеряемого сигнала – 0,5-1,0 мкВ.

Основная задача интерпретации выполненных профильных ЗСБ заключалась в определении геоэлектрического строения осадочного чехла с целью выявления и прогнозирования зон вероятного развития коллекторов, насыщенных высокоминерализованными водами, подпирающими нефтяную залежь. К продуктивному горизонту относится подсолевая толща терригенных отложений.

Интерпретация всего объема полевых данных выполнена с помощью программных комплексов решения обратных задач в интерактивном режиме*. На рис.2 приведены графики характерных полевых кривых ЗСБ в зоне с аномально низким значением удельного электрического сопротивления подсолевого горизонта. На этом же рисунке представлены геоэлектрические модели, полученные в результате инверсии полевых данных. Кривые

* Эпов М.И. Автоматизированная система интерпретации электромагнитных зондирований / М.И.Эпов, Ю.А.Дашевский, И.Н.Ельцов. Новосибирск: Изд-во Института геологии и геофизики СО АН. 1990. 29 с.

Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н. Автоматизированная система интерпретации электромагнитных зондирований (An automated system of electromagnetic soundings interpretation). Новосибирск: Изд-во Института геологии и геофизики СО АН. 1990, p.29.

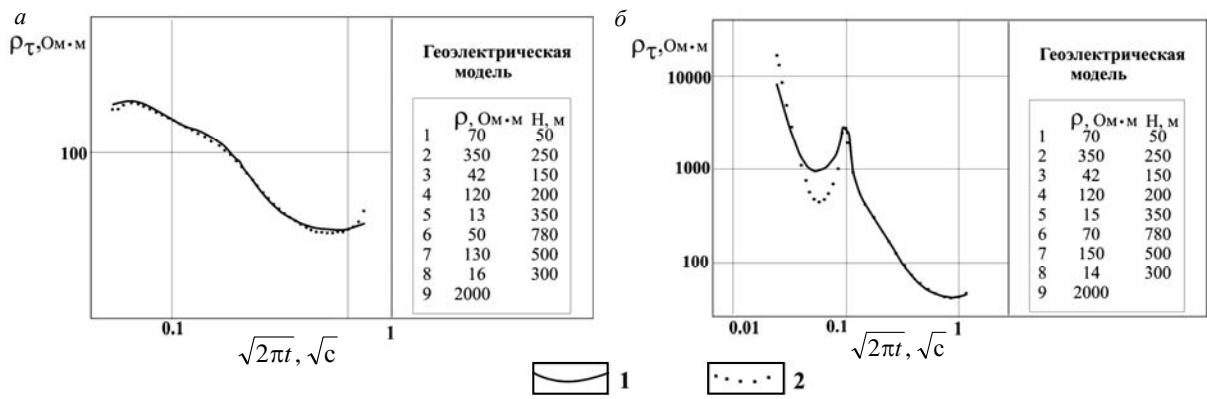


Рис.2. Характерные кривые ЗСБ в зоне с низкими значениями удельного электрического сопротивления в подсолевой толще: а – полевая и синтетическая кривая ЗСБ для соосной установки (пикет 97); б – кривые для разнесенной установки (пикет 95)
1 – синтетическая кривая; 2 – полевые данные

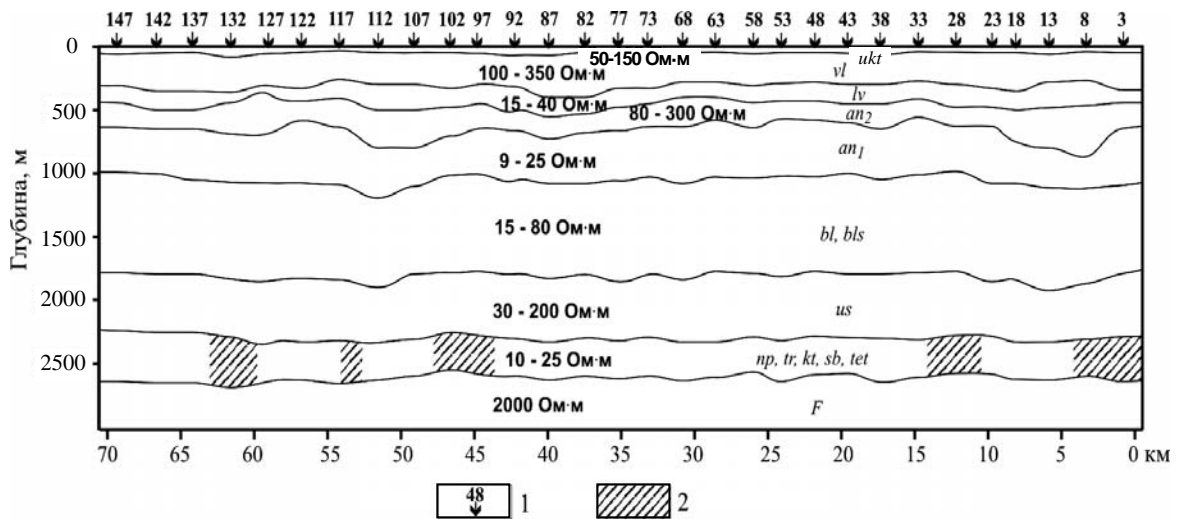


Рис.3. Геоэлектрический разрез по данным ЗСБ
F – рифейский фундамент; свиты: np – непская, tr – тирская, kt – катанская, sb – собинская, tet – тэтэрская, us – усольская, bl – бельская, bls – булайская, an – ангарская, lv – ливинцевская, vl – верхоленская, ukt – усть-кутская
1 – пункты ЗСБ; 2 – зоны пониженного значения удельного электрического сопротивления (6-15 Ом·м)

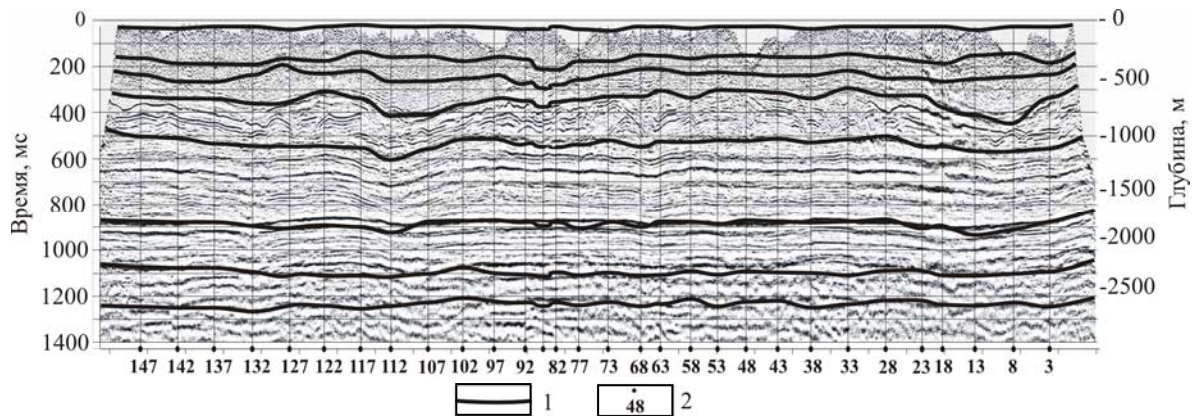


Рис.4. Сводный сейсмогеоэлектрический разрез по данным ОГТ и ЗСБ
1 – геоэлектрические границы; 2 – пункт электроразведочных наблюдений

имеют выраженный минимум и восходящую правую ветвь, что позволяет получить полный геоэлектрический разрез осадочного чехла. На рис.2, *а* показана кривая для «соосной» установки. Полевые материалы этих установок интерпретировались в первую очередь.

Далее была выполнена интерпретация полевых данных для разнесенных установок (рис.2, *б*). Следует отметить, что для разнесенных установок в ряде случаев левая ветвь кривой зондирования искажается, что связано с большим влиянием поверхностных неоднородностей на процесс становления. В результате интерпретации был построен геоэлектрический разрез по профилю наблюдений (рис.3).

Получен полный геоэлектрический разрез осадочных отложений и характеристики опорного электрического горизонта от дневной поверхности до глубин 2600-2800 м. В осадочном чехле в пределах продуктивного слоя выделены зоны с повышенными и пониженными значениями удельного электрического сопротивления. Основные осадочные слои глубже 1000 м залегают практически горизонтально с незначительными углами наклона геоэлектрических границ. Был также выполнен совместный анализ результатов геоэлектрических и сейсмических исследований (рис.4).

Анализ пока предварительный, так как на данном этапе еще не закончена полная обработка сейсмических данных. Однако некоторые выводы сделать можно. Отметим преимущества речной электроразведки. Ее данные позволяют точнее определить границы литологических комплексов верхней части разреза от дневной поверхности до глубин примерно в 500 м. Кроме того, очень хорошо выделяется граница осадочный чехол – высокоомный фундамент, что подтверждено представленными на рис.2 характерными полевыми кривыми и геоэлектрическими моделями. По сейсмическим данным выделение этой границы затруднительно. Технология речных электроразведочных работ менее трудоемка и экономична в труднодоступных районах со сложной топографией по сравнению с сейсморазведкой и другими наземными методами. В интервале глубин от 500 до 2000 м сейсмические и электрические границы неплохо согласуются.

В заключение следует отметить, что результаты свидетельствуют о перспективности использования представленного в статье комплекса геофизических методов: электромагнитных и сейсмических для нефтепоисковых работ на Сибирской платформе. Очевидно, что при комплексировании увеличивается информативность и достоверность исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 09-05-12047-офи_м.

POTENTIAL OF RIVER ELECTRICAL EXPLORATION IN OIL REGIONS OF THE SIBERIAN PLATFORM (THE LENA RIVER AREA, KRIVOLUKSKAYA AREA)

N.N.NEVEDROVA, *PhD in Geological and Mineral Sciences, Senior Research Scientist,*
NevedrovaNN@ipgg.nsc.ru

A.M.SANCHAA, *PhD in Geological and Mineral Sciences, Research Scientist,*
SanchaaAM@ipgg.nsc.ru

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

S.M.BABUSHKIN, *Director, bab@gs.nsc.ru*

D.V.KRECHETOV, *Geophysicist, Krechet1@Bk.ru*

Seismological Branch of Geophysical survey SB RAS, Novosibirsk, Russia

The profile line of geophysical exploration lies along the fairway of the Lena River. A complex of transient electromagnetic soundings (TES) and a common deep point (CDP) method has been used for the exploration. A complete geoelectrical section of sedimentary deposits and the properties of the basic geoelectrical layer have been estimated using TES. In the sedimentary deposits productive layer zones with increased and decreased electrical resistance have been studied. The results of both geoelectrical and seismic analyses prove that the use of both of these methods is very promising.

Key words: Krivolukskaya area, transient electromagnetic soundings (TES).

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ПОИСКАХ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ В ЧЕРНОСЛАНЦЕВЫХ ТОЛЩАХ

А.Н.ОРЕХОВ, канд. геол.-минерал. наук, доцент, *orekhovan@mail.tomsknet.ru*
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия

Золоторудные месторождения, локализованные в черносланцевых толщах, являются одними из основных промышленно значимых источников рудного золота. В то же время, с точки зрения изучения этих объектов геофизическими методами, существует значительное количество проблем, обусловленных, с одной стороны, относительно невысокой контрастностью физических свойств, а с другой – искажающим влиянием графитизированных пород.

Приведены полевые геофизические данные по перспективной площади, расположенной в пределах Бодайбинского района. Выполнен их анализ, приведены основные выводы.

Ключевые слова: золото, месторождения золота в черносланцевых толщах, Бодайбинский район, магниторазведка, взрывная поляризация, гамма-спектрометрия, физико-геологическая модель, комплексная интерпретация.

Введение. Месторождения золота, связанные с толщами углеродистых сланцев, являются одним из наиболее значимых с промышленной точки зрения промышленно-генетических типов. Они, как правило, приурочены к разновозрастным, мощным сланцевым толщам разной степени обуглероженности, достаточно контрастными по своим физическим (и в первую очередь, электрическим) свойствам. Казалось бы, это делает такие объекты весьма благоприятными для опознания их геофизическими методами. Однако это не совсем так. Проблема состоит в том, что сами контрастные по физическим свойствам толщи занимают достаточно большие площади, а оруденение локализовано лишь на отдельных участках. Причем в их пределах физические свойства пород отличаются от безрудных зон не всегда значительно. Второй причиной, существенно мешающей применению в первую очередь электроразведочных методов, является как раз широкое развитие графитизированных пород, что, учитывая достаточно сложные поверхностные условия, существенно снижает эффективность электроразведки методом вызванной поляризации (ВП).

Тем не менее, рациональное комплексирование геофизических методов и использование при интерпретации данных подхода, основанного на физико-геологическом моделировании, позволяет даже в этих сложных условиях достаточно уверенно выделять признаки проявления гидротермальных процессов, а значит, и прогнозировать золотое оруденение*.

Фактической основой статьи являются материалы комплексных наземных геофизических работ масштабов 1:25 000 и 1:10 000, выполненных в Бодайбинском районе в 2009-2011 годах.

В пределах площади работ выделены отложения Илигирской (PR_{3il}), Догалдынской (PR_{3dg}) и Анангурской свит (PR_{3an}). Они сравнительно слабо метаморфизованы и собраны в крупные линейные складки. Представлены, в основном, терригенными отложениями, насыщенными углеродистым веществом. Отмечается повсеместная вкрапленность желези-

* Ерофеев Л.Я. Петрофизические условия локализации месторождений золота в углеродистых породах / Л.Я.Ерофеев, Г.Г.Номоконова, А.Н.Орехов // Геофизические методы при разведке недр и экологических исследованиях: Матер. Всерос. научно-техн. конф. Отв. ред. Л.Я.Ерофеев / Томск. политехн. ун-т. Томск, 2003. С.207-212.

Erofeev L.Ja., Nomokonova G.G., Orekhov A.N. Petrofizicheskie uslovija lokalizacii mestorozhdenij zolota v uglerodistykh porodah (Petrophysical conditions of gold ore deposits localization in carbonaceous rocks). Geofizicheskie metody pri razvedke neдр i jekologicheskijh issledovanijah: Mater. Vseros. nauchno-tehn. konf. Ed. L.Ja.Erofeev. Tomsk. Politehn. un-t. Tomsk, 2003, p.207-212.

сто-магнезиальных карбонатов, иногда встречается примесь туфогенного материала. В целом, для осадочно-метаморфических отложений района характерно широкое развитие горизонтов углеродсодержащих пород.

Для района установлена связь между пликативной тектоникой и золотым оруденением. Так, в пределах нормальной складчатости развивается только кварцево-жильная минерализация наиболее простых типов. В то же время в зонах смятия строение рудных тел усложняется, при этом в ряде случаев появляются кварц-сульфидные зоны, наиболее интересные с промышленной точки зрения.

Метаморфизм в районе развит достаточно широко, причем очень хорошо проявлена региональная метаморфическая зональность. Непосредственно с региональным метаморфизмом тесно связаны метасоматические изменения пород, к которым относятся замещение кальцита анкеритом и, далее, сидеритом, с одновременной концентрацией железисто-магнезиальных карбонатов и сульфидов в углеродистых толщах, что обуславливает появление прожилково-вкрапленной и карбонатной минерализаций. На этом этапе также происходило формирование пирротина. Эти преобразования сопровождаются окварцеванием пород и формированием в ядерных частях пликативных структур вытянутых жильных полей. С этой стадией гидротермальных преобразований связывается местное перераспределение золота и элементов-спутников с последующим отложением их в зонах сульфидизации и кварцевых прожилково-жильных телах. Сформировавшиеся в это время рудные зоны имеют линейный вид, субширотное простирание и несколько повышенное содержание золота. Последний параметр резко повышается в пределах отдельных узлов, приуроченных к таким зонам, что обусловлено проявлением более поздних наложенных гидротермальных процессов*.

Результаты геофизических исследований. Перед проводимыми геофизическими работами ставилась задача выявления потенциально золотосных участков, а также картирования структуры площади. Анализ результатов ранее выполненных в районе аэрогеофизических и наземных геофизических работ позволил сформировать как оптимальный комплекс методов, так и ожидаемую модель объекта поисков.

В комплекс методов масштаба 1:25 000 были включены: магниторазведка, профилирование методом ВП и гамма-спектрометрия. В комплекс работ масштаба 1:10 000 дополнительно была включена электроразведка методом естественных полей (ЕП).

По геологическим данным, объекты поисков представляют собой достаточно узкие (порядка 20-30 м) протяженные зоны, связанные с тектоническими нарушениями, преимущественно субширотного простирания и расположенными, главным образом, в замковых частях антиклинальных складок. Эти зоны обуглерожены, в них присутствует пирротин (причем, по петрофизическим данным, в рудной зоне он имеет обратное намагничение), а в контактовых частях проявлено окварцевание. Таким образом, в физических полях мы должны видеть узкие, вытянутые, слабо отрицательные аномалии магнитного поля, а в пределах рудоносных участков они должны сопровождаться закономерно разнесенными в пространстве аномалиями вызванной и естественной поляризуемости, а также кажущегося удельного электрического сопротивления. Кроме того, рудным зонам должны соответствовать локальные аномалии концентрации калия (в силу характера метасоматоза) по данным гамма-спектрометрии.

Эта модель объекта поисков, с одной стороны, подтвердила правильность выбора комплекса методов, с другой – обусловила требования к методике проведения работ. Так, например, магниторазведка выполнялась с шагом 5 м. Отдельно стоял вопрос о возможностях профилирования ВП. Широкое развитие углеродистых пород, причем в значительном числе

* *Иванов А.И.* Опыт прогнозирования, поисков и оценки новых золоторудных месторождений в Бодайбинском районе // Разведка и охрана недр. 2008. № 2. С.11-16.

Ivanov A.I. Opyt prognozirovaniya, poiskov i ocenki novykh zolotorudnykh mestorozhdenij v Bodaibinskom rajone (*An Attempt of Prospecting, Exploration and Estimation of New Gold Deposits in the Area of Bodaibo*). Razvedka i ohrana neдр. 2008. N 2, p.11-16.

случаев углеродистые сланцы весьма интенсивно прокварцованы по сланцеватости и стоят вертикально, ставило под сомнение возможность получения какой-либо существенной информации по вызванной поляризуемости. Ранее проведенные в районе работы с ВП на постоянном токе положительных результатов не дали. Опытные работы с ВП на переменном токе, проведенные нами, показали, что в пределах зон обуглероживания мы устойчиво получаем положительные значения угла сдвига фазы. Причем ни изменение вида установки, ни понижение частоты не позволили избавиться от этого эффекта. Поэтому, в соответствии с методическими рекомендациями, для геологической интерпретации было решено использовать не сам параметр угла сдвига фазы, а дифференциальный параметр. Для этого съемки ВП в разных масштабах выполнялись на разных частотах, а также использовались амплитуды сигнала, полученные на разных гармониках.

На рис.1-3 приведены некоторые результаты геофизических работ по основному участку и одному из участков детализации. Близкие по структуре физические поля были получены и по другим участкам.

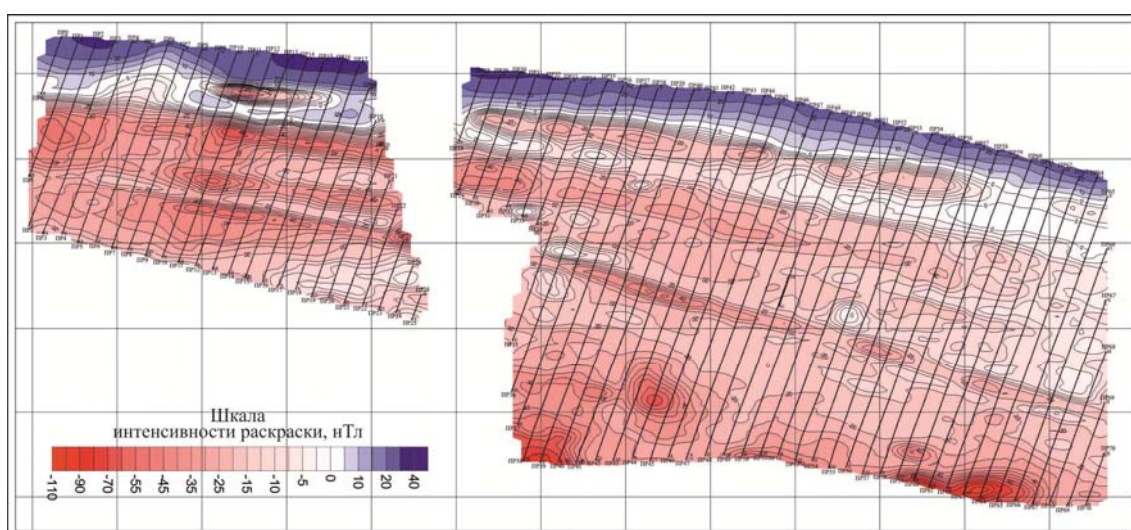


Рис.1. План изолиний приращения полного вектора индукции магнитного поля участка детализации по результатам съемки масштаба 1:10 000

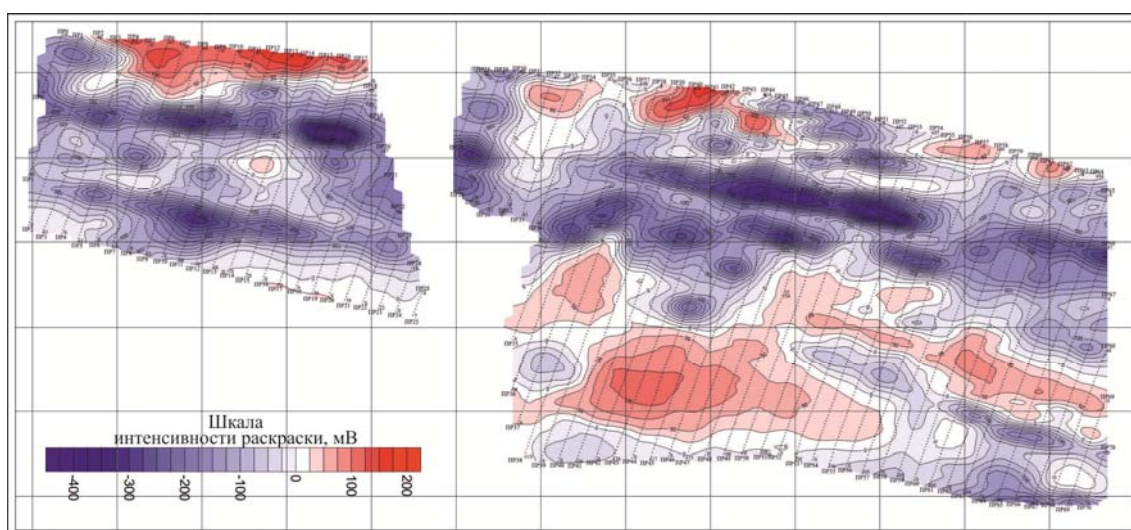


Рис.2. План изопотенциалов естественного электрического поля участка детализации по результатам съемки масштаба 1:10 000

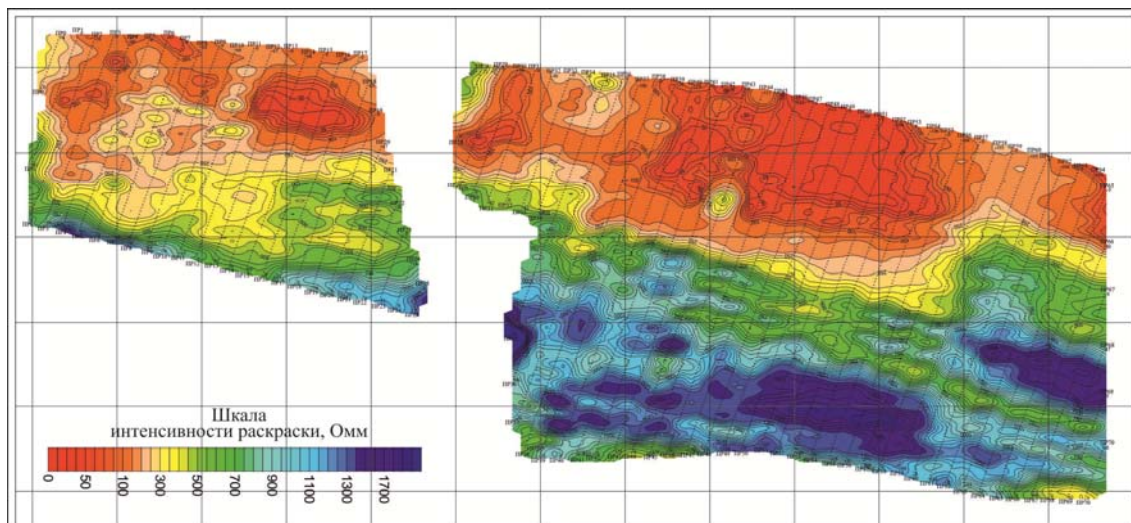


Рис.3. План изом кажущегося удельного электрического сопротивления участка детализации по результатам съемки масштаба 1:10 000

Обсуждение результатов. Известно, что физические поля картируют не само распределение золота, а результаты гидротермально-метасоматических изменений пород, захватывающих, как правило, достаточно большие площади и часто проявляющихся достаточно контрастно, в том числе и в виде зонального распределения физических полей.

Особенности рудного процесса, проявленного в пределах участка работ, позволяют определить основные аномалиеобразующие факторы, которые отражаются в физических полях, определяя их морфологию и свидетельствуя о наличии или отсутствии золоторудной минерализации.

В первую очередь к таким факторам следует отнести пирротинизацию. Гидротермальный пирротин в районе, по имеющимся данным, формируется в ходе первой фазы гидротермального процесса, завершающего процессы метаморфизма, а затем в результате проявления дальнейших наложенных преобразований претерпевает определенные изменения. Потенциально рудными считаются отрицательные аномалии магнитного поля, обусловленные обратно намагниченным пирротинном. Об этом говорят как результаты работ предшественников, так и ранее выполненные ЦНИГРИ палеомагнитные исследования.

К таким же факторам следует отнести и графитизацию, особенно в случае, если она сопряжена с пиритизацией. Результаты этого процесса приводят к понижению сопротивления, повышению поляризуемости и формированию отрицательных, часто достаточно интенсивных аномалий ЕП. Как правило, процессы графитизации связаны с перераспределением и упорядочиванием углеродистого вещества, уже имеющегося в породах, но в ряде случаев графитоиды могут формироваться и в процессе метасоматоза. Как правило, графитизация и пирротинизация несколько разобщены в пространстве, что, кстати, является одним из признаков проявления рудного процесса.

Еще одним из процессов, проявленных в районе и однозначно связанных с оруденением, является окварцевание. Можно было бы говорить о том, что этот процесс весьма контрастно меняет физические свойства пород (особенно электрические) и, соответственно, должен уверенно картироваться электрическими полями. Однако проблема состоит в том, что окварцевание часто проявлено по графитизированным зонам, представляет собой серию кварцевых прожилков, часто маломощных. Соответственно, изменения электрических свойств могут быть не столь однозначными.

Необходимо также иметь в виду, что графитизация и сульфидизация могут возникать и в результате метаморфизма. Хотя образования (сульфиды, зоны графитизации с сульфи-

дами), имеющие гидротермальную природу, проявляются в физических полях значительно контрастнее метаморфогенных, вопрос разделения этих образований для района не решен.

Естественно, что интерпретация физических полей, выполненная в условиях явного дефицита петрофизических данных, носит вариантный характер. Поскольку масштаб съемки достаточно мелкий, речь о выделении рудных столбов по геофизическим данным не идет, а интерпретация была ориентирована на выявление зон аномального распределения физических полей, в которых нарушалась бы спокойная, «породная» структура физических полей и просматривались результаты проявления процессов, описанных выше. Таким образом, потенциально рудоносными нами считались области, пространственно приуроченные к протяженным линейным слабоотрицательным аномалиям магнитного поля, на участках, где они пересекаются крупными субширотными тектоническими нарушениями. Обязательным условием также считалось проявление геофизической зональности, выражающейся в закономерном смещении друг относительно друга осей аномалий всех наблюдаемых физических полей.

Выводы и рекомендации. Сформулируем основные выводы, сделанные по результатам проведенных работ.

1. Вышеописанный комплекс работ способен решать задачи прогнозирования золотого оруденения в черносланцевых толщах.

2. Петрофизическое обеспечение геофизических исследований в районе совершенно недостаточно и не может обеспечить уверенной интерпретации наблюдаемых физических полей.

3. Основным поисковым признаком золотого оруденения в районе является наличие геофизической зональности, заключающейся в закономерном расположении друг относительно друга аномалий магнитного поля, поля сопротивлений, естественного электрического поля, поляризуемости и аномалий естественной радиоактивности элементов калиевой природы. При этом золотое оруденение приурочено к зонам отрицательного магнитного поля, что, предположительно, обусловлено отрицательным углом наклона вектора остаточной намагниченности гидротермального пирротина.

4. Район характеризуется достаточно напряженным структурно-тектоническим строением, причем не все нарушения одинаково проявлены в различных физических полях. В то же время именно в узлах пересечения тектонических нарушений с продольными структурами и формируется геофизическая зональность, предположительно обусловленная гидротермально-метасоматическими процессами, с которыми непосредственно связано золотое оруденение.

INFORMATIVE IMPORTANCE OF GEOPHYSICAL METHODS FOR EXPLORATION OF GOLD ORE MINERALIZATION IN BLACK SHALE STRATA

A.N. OREKHOV, *PhD in Geological and Mineral Sciences, Associate Professor,*
orekhovan@mail.tomsknet.ru
National Research Tomsk Polytechnic University, Russia

Gold ore deposits located in black shale strata are one of the main industrially significant sources of ore gold. However, using geophysical methods for exploration of these objects may lead to numerous problems caused, on the one hand, by relatively low physical contrast and, on the other hand, by the distorting effect of graphitized rocks.

This article presents some *in-situ* geophysical data from a promising area in Bodaibinsky region, their analysis and some basic conclusions.

Key words: gold, gold deposits in the black shale strata, Bodaibinsky region, magnetic survey, induced field (IF), gammaspectrometry, physical-geological model, complex interpretation.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

М.И.ШИМЕЛЕВИЧ, канд. физ.-мат. наук, *shimelevich-m@yandex.ru*

Е.А.ОБОРНЕВ, канд. физ.-мат. наук, *eugenyo@mail.ru*

И.Е.ОБОРНЕВ, канд. физ.-мат. наук, *o_ivano@mail.ru*

Е.А.РОДИОНОВ, аспирант, *evgeny_980@list.ru*

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

Исследованы априорные и апостериорные характеристики степени практической устойчивости (однозначности) решений нелинейных обратных задач геоэлектрики. В качестве критериев степени практической устойчивости использованы численные значения модулей непрерывности прямого и обратного операторов задачи и их модификаций. Приведены примеры расчета априорных и апостериорных характеристик практической устойчивости обратных задач для типовых моделей сред, используемых в геоэлектрике. Исследованы зависимости характеристик практической устойчивости задачи от детальности описания среды, а также от структуры, объема и уровня погрешности входных данных. Полученные численные оценки степени практической устойчивости приближенных решений обратных задач не зависят от применяемого алгоритма их решения. Это позволяет объективно оценить погрешность и достоверность результатов интерпретации геофизических данных.

Ключевые слова: обратные задачи, геоэлектрики, нейронные сети, априорные оценки, апостериорные оценки.

В работах [1, 8, 9] показано, что для заданного модельного конечно-параметрического класса сред могут быть рассчитаны априорные и апостериорные оценки степени практической устойчивости решений обратной задачи геоэлектрики. Эти оценки зависят от уровня погрешности в данных и свойств прямого оператора и, в частности, от детальности параметризации среды. Это позволяет, с одной стороны, сформулировать определенные априорные требования к построению эффективно параметризованных сред, для которых обратная задача является практически устойчивой (корректной), с другой – объективно оценить погрешность и достоверность результатов практической интерпретации наблюдаемых геофизических данных. В работе приводятся примеры построения эффективно параметризованных сред на основе априорных характеристик устойчивости и апостериорные оценки приближенных решений, получаемых нейросетевым аппроксимационным методом.

Обратная задача электромагнитных зондирований в заданном модельном конечно-параметрическом классе сред G_F сводится к решению операторного уравнения I рода относительно вектора $s = (s_1, \dots, s_N)$ параметров среды [2, 4]:

$$A_N s = e, \quad s \in S \subset R^N, \quad e \in R^M, \quad (1)$$

где A_N – нелинейный оператор решения прямой задачи, отображающий векторы параметров среды $s = (s_1, \dots, s_N)$ в векторы характеристик поля $e = (e_1, \dots, e_M)$ и определенный на множестве $S \subset R^N$ допустимых значений параметров; $e = (e_1, \dots, e_M)$ – вектор данных, определяемый значениями характеристик электромагнитного (ЭМ) поля в точках фактической сети измерений τ на поверхности Земли; R^N – арифметическое пространство размерности N .

В качестве S обычно задается ограниченное замкнутое подмножество R^N :

$$S: [s_n^{\min} \leq s_n \leq s_n^{\max}], \quad n=1, \dots, N. \quad (2)$$

При численном решении прямой задачи действие оператора A^N на вектор $s = (s_1, \dots, s_N)$ представляет собой суперпозицию преобразований F, A_0 вида

$$A_N s = A_0 F s = A_0 \sigma_0 = e, \quad (3)$$

где F – оператор параметризации [11], определяющий в рассматриваемом классе сред G_F правило пересчета вектора модельных параметров среды $s = (s_1, \dots, s_N)$ размерности N в вектор $\sigma_0 = (\sigma_1, \dots, \sigma_{N_0}) = F s$ размерности N_0 (сетки прямой задачи), который задает значения функции удельной электропроводности $\sigma(x_i, y_j, z_k)$ на сетке $x_i, y_j, z_k \in \Omega$ прямой задачи в исследуемой области Ω ; A_0 – конечно-разностный оператор прямой краевой задачи.

Количественно степень практической устойчивости решения обратной задачи (1) определяется свойствами прямого оператора A^N и свойствами данных.

Пусть для заданной приближенной правой части \tilde{e} уравнения (1) найдено некоторое приближенное решение $s_{\delta 1} \in S$ задачи (1) с приемлемой для практики невязкой синтеза $\delta_{\text{синт}}$, сопоставимой с предполагаемым уровнем погрешности в данных $\delta_{\text{синт}} \approx \delta$:

$$\|A_N s_{\delta 1} - \tilde{e}\|_{R^M} \leq \delta_{\text{синт}}, \quad (4)$$

где $\|\cdot\|_{R^M}$ – норма в пространстве данных R^M .

Известно, что помимо найденного приближенного решения $s_{\delta 1}$ уравнению (1) может удовлетворять некоторое множество δ -эквивалентных решений [10]. Расстояние наиболее удаленного эквивалентного решения от найденного решения $s_{\delta 1}$ определяется величиной [3, 7]

$$\beta_N(s_{\delta 1}, \tilde{e}, \delta_{\text{синт}}) = \sup_{s_{\delta} \in S} \|s_{\delta} - s_{\delta 1}\|_{R^N} \quad \text{при} \quad \|A_N s_{\delta} - \tilde{e}\|_{R^M} \leq \delta. \quad (5)$$

Если $\beta_N(s_{\delta 1}, \tilde{e}, \delta_{\text{синт}}) \rightarrow 0$ при $\delta, \delta_{\text{синт}} \rightarrow 0$, то обратная задача является теоретически устойчивой. На практике невязка синтеза всегда отлична от нуля ($\delta_{\text{синт}} \neq 0$) и поэтому $\beta_N(s_{\delta 1}, \tilde{e}, \delta_{\text{синт}}) \geq 0$. Значение $\beta_N(s_{\delta 1}, \tilde{e}, \delta_{\text{синт}})$ является характеристикой *степени практической устойчивости (однозначности)* найденного приближенного решения $s_{\delta 1}$ обратной задачи (1) для фиксированных входных данных \tilde{e} и невязки синтеза $\delta_{\text{синт}}$. Если значение $\beta_N(s_{\delta 1}, \tilde{e}, \delta_{\text{синт}})$ мало (например, относительно нормы найденного приближенного решения $\|s_{\delta 1}\|_{R^N}$), то решение можно считать практически устойчивым. Любое δ -эквивалентное решение s_{δ} не может отклоняться от найденного $s_{\delta 1}$ более чем на величину $\beta_N(s_{\delta 1}, \tilde{e}, \delta_{\text{синт}})$ [7, 10]:

$$\|s_{\delta} - s_{\delta 1}\|_{R^N} \leq \beta_N(s_{\delta 1}, \tilde{e}, \delta_{\text{синт}}), \quad (6)$$

и, таким образом, $\beta_N(s_{\delta 1}, \tilde{e}, \delta_{\text{синт}})$ служит апостериорной оценкой погрешности полученного приближенного решения $s_{\delta 1}$ задачи для фиксированных данных \tilde{e} , так как определяет «разброс» возможных δ -эквивалентных решений s_{δ} относительно найденного $s_{\delta 1}$.

Характеристика степени практической устойчивости $\beta_N(s_{\delta 1}, \tilde{e}, \delta_{\text{синт}})$ зависит от конкретных используемых входных данных. Для практики представляет интерес получение априорных оценок степени практической однозначности приближенных решений по всему множеству S допустимых решений обратной задачи (1), не связанных с конкретными данными и находимыми решениями. Такие оценки могут быть получены на основе анализа множества решений прямых задач для оператора A^N до непосредственного решения обратной задачи.

Зададимся некоторым точным значением вектора параметров среды s и решим для него прямую задачу $e(s) = A_N(s)$. Рассмотрим изменение решения $\Delta e = e(s + \Delta s) - e(s)$ прямой задачи при произвольно заданном (не обязательно малом) изменении Δs вектора параметров среды:

$$A_N(s + \Delta s) - A_N(s) = \Delta e(s, \Delta s). \quad (7)$$

Максимально возможное изменение параметров среды $\|\Delta s\|$ при изменении поля $\|\Delta e\| \leq \delta$ (рассмотренное для всех $s \in S$) определяет степень устойчивости (однозначности) решений обратной задачи на множестве S для любых теоретических данных $e(s)$:

$$\beta_N(\delta) = \sup_{s, s' \in S} \|s' - s\|_{R^N} \quad \text{при} \quad \|A_N s' - A_N s\|_{R^M} \leq \delta. \quad (8)$$

В теории некорректных задач величина $\beta_N(\delta)$ используется в качестве характеристики степени устойчивости решений обратных задач и называется модулем непрерывности обратного оператора задачи (1) (точнее говоря, является одной из его разновидностей) [5, 6]. Характеристика устойчивости (8) определяет теоретическое максимально возможное расстояние по норме между эквивалентными решениями в целом по всему множеству допустимых решений S при заданном уровне погрешности δ в исходных данных и, таким образом, степень практической однозначности (устойчивости) задачи в рассматриваемом классе сред в целом. Чем меньше $\beta_N(\delta)$, тем ниже степень эквивалентности решений обратной задачи и тем более устойчива обратная задача. Характеристика $1/\beta_N(\delta)$ определяет разрешающую способность применяемого геофизического метода в рассматриваемом классе сред. Чем меньше $\beta_N(\delta)$, тем ниже разрешающая способность метода.

Одной из практических задач интерпретации является оценка степени практической однозначности определения геолого-геофизических параметров отдельной типовой (целевой) структуры, связанной с определенным типом полезных ископаемых, на фоне неизвестной (или слабо изученной) вмещающей среды с использованием ограниченных объемов данных [8, 11, 12]. Для решения задач такого типа может быть использована оценка, являющаяся обобщением рассмотренной выше характеристики $\beta_N(\delta)$ [8].

Рассмотрим соотношение (7) для случая, когда изменение вектора параметров происходит только для некоторой группы выделенных *анализируемых параметров* $s^a = (s_1^a, \dots, s_{N_a}^a) \in S^a \subset S$:

$$A_N(s + \Delta s^a) - A_N(s) = \Delta e(s, \Delta s^a). \quad (9)$$

Величина $\beta_N^a(\delta)$, определяемая соотношением

$$\beta_N^a(\delta) = \sup_{s, s'^a} \|s'^a - s\|_{R^{N_a}} \quad \text{при} \quad \|A_N(s'^a) - A_N(s)\|_{R^M} \leq \delta, \\ s'^a = s + \Delta s^a, \quad \Delta s^a \in S^a, \quad s \in S, \quad (10)$$

представляет собой априорную оценку степени практической устойчивости определения группы анализируемых параметров $s^a = (s_1^a, \dots, s_{N_a}^a)$ при любом заранее неизвестном строении s вмещающей (фоновой) среды и уровне погрешности δ данных, определенных на фактической сети измерений τ .

Расчет оценок величин $\beta_N(s_{\delta 1}, \tilde{e}, \delta)$, $\beta_N(\delta)$, $\beta_N^a(\delta)$ сводится к решению ряда соответствующих задач нелинейной условной оптимизации [1, 8, 9].

Свойства априорных и апостериорных характеристик степени устойчивости зависят от свойств оператора прямой задачи A^N и, таким образом, от свойств множества S (2) определения оператора A^N и свойств множества его значений $E = A_N S$, т.е. на практике от: а) типа и детальности N/N_0 параметризации среды, б) объема M , типа и структуры используемых входных данных $e = (e_1, \dots, e_M)$, определенных на фактической сети наблюдений τ .

Знание априорных характеристик устойчивости позволяет оценить максимально возможную детальность решений (относительно детальности сетки прямой задачи N_0) при заданном предполагаемом уровне погрешности данных $\delta \approx \delta_{\text{синт}}$ и желаемом уровне практической устойчивости получаемых решений ε_0 :

$$\max \frac{N}{N_0} \text{ при } \beta_N(A_N, \delta, S, M, \tau) \leq \varepsilon_0, \quad \delta \leq \delta_0. \quad (11)$$

При выполнении условий (11), для приемлемых для практики значений ε_0, δ_0 , обратная задача (1) в рассматриваемом классе эффективно параметризованных сред является практически устойчивой (корректной).

Апостериорные характеристики устойчивости $\beta_N(s_{\delta_1}, \tilde{e}, \delta)$ позволяют объективно оценить погрешность найденного решения обратной задачи на основе имеющихся измеренных данных \tilde{e} и полученной фактической невязки синтеза $\delta_{\text{синт}}$ (задача верификации).

Схема решения задачи инверсии в заданном модельном классе сред с использованием характеристик практической устойчивости включает следующие этапы:

1. Решение задачи эффективной (регуляризованной) параметризации среды на основе расчетных априорных характеристик устойчивости и решения задачи (11).

2. Нахождение приближенного решения $s_{\delta_1} \in S$ любым методом, обеспечивающим приемлемую невязку синтеза $\delta_{\text{синт}} \approx \delta_0: \|A_N s_{\delta_1} - e_{\delta}\|_{R^M} \leq \delta_{\text{синт}}$.

3. Построение апостериорной характеристики $\beta_N(s_{\delta_1}, \tilde{e}, \delta_{\text{синт}})$ степени однозначности (устойчивости) найденного приближенного решения s_{δ_1} обратной задачи (1) для фиксированных наблюдаемых данных e_0 и полученной фактической невязки синтеза $\delta_{\text{синт}}$.

Рассмотрим схему решения обратной задачи на модельном примере. На рис.1 представлена схема исходного модельного 2D-класса G_0 геоэлектрических сред для задачи интерпретации данных детальной съемки методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Геометрические размеры модели составляют по глубине до 1,4 км и по протяженности до 50 км. Исходная детальность параметризации соответствует детальности конечно-разностной аппроксимации прямой задачи с числом узлов $N_0 = 62 \times 7 = 434$. Параметрами среды $s = (s_1, \dots, s_{N_0})$ исходной модели являются значения удельного сопротивления ячеек сетки прямой задачи $\rho_{ij} (i = 1, \dots, 62, j = 1, \dots, 7)$, которые изменяются в диапазоне от 1 до 10^4 Ом·м. В качестве характеристик поля использовались компоненты тензора импеданса $Z_{yx}(\omega_k, y_i)$, $Z_{xy}(\omega_k, y_i)$, заданные на поверхности Земли ($z = 0$) в узлах сетки прямой задачи $y_i (i = 1, \dots, 31)$ на сетке частот $\omega_k (k = 1, \dots, 13)$ в диапазоне от 20000 до 100 Гц.

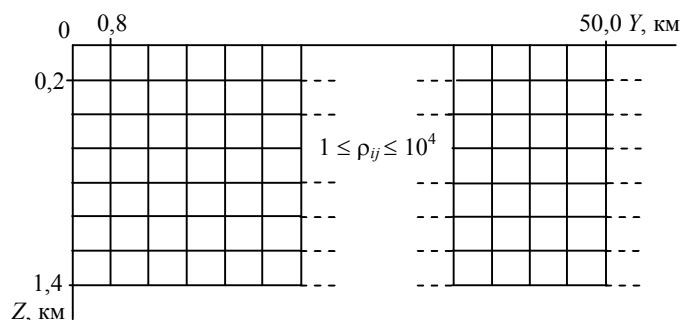


Рис.1. Двухмерная модель геоэлектрических сред для задачи интерпретации данных детальной съемки МТЗ

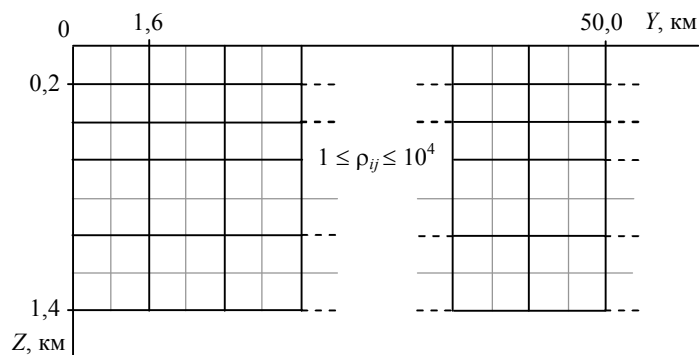


Рис.2. Схема эффективно параметризованного класса сред (фрагмент модели среды без учета краевых областей) для задачи детальной съемки МТЗ с максимально возможной детальностью параметризации $N_1/N_0 \approx 0,36$ при заданных $\delta = 5\%$ и $\varepsilon_0 = 5\%$

метрами класса G_1 являются значения удельного сопротивления блоков (рис.2), полученных в результате объединения ячеек сетки прямой задачи $\rho_{ij} (i = 1, \dots, 31, j = 1, \dots, 5)$. В трех верхних ярусах макропараметры укрупнялись за счет объединения пар микроячейки параметризации N_0 только по горизонтали, а для четвертого и пятого яруса микроячейки объединялись в пары по горизонтали и вертикали. Остальные характеристики класса G_1 и G_0 совпадают.

В таблице приведены значения характеристик устойчивости $\beta_{N_1}^{G_1} (\delta = 0.05)$ рассчитанные на основе (11) для модельного класса G_1 , средние значения по всем периодам и для всех компонент тензора импеданса: модулей $|Z_{yx}|, |Z_{xy}|$ и фаз $\arg(Z_{xy}), \arg(Z_{yx})$ для двух поляризации YX (TM), XY (TE) ЭМ поля. Итоговое значение (осредненное по всем компонентам и периодам) $\beta_N (\delta = 0,05) = 4,53\%$ не превышает заданного значения $\varepsilon_0 = 5\%$.

Значения устойчивости решения обратной задачи, %

Критерии степени устойчивости решения обратной задачи по всем периодам	Модуль импеданса		Фаза импеданса		Среднее значение по всем компонентам тензора импеданса
	YX (ТН)	XY (ТЕ)	YX (ТН)	XY (ТЕ)	
Среднее значение $\beta_{N_1}^{G_1} (\delta = 0,05)$ для класса G_1 по выборке $P = 1200$	0,64	1,42	6,01	10,06	4,53
Средние относительные невязки синтеза для модели М1 по норме L_2	3,18	3,04	0,39	1,95	2,14
Средние значения апостериорной характеристики $\beta_{N_1}^{M_1} (s_{\delta 1}, e, \delta_{\sin t})$ найденного приближенного решения $s_{\delta 1}$ для модели М1	0,90	1,36	1,17	1,24	1,17

На втором этапе строился обратный оператор для класса G_1 – «решатель-solver» обратной задачи $s^* = A_{G_1}^{-1} e \approx \Psi_{G_1}^{app} e$. В данной работе использовался нейросетевой аппроксимационный метод построения обратного оператора – аппроксиматора – на основе множества эталонных примеров решений прямых задач в классе G_1 [11]. Множество модельных эта-

На основе исходного класса G_0 был построен новый эффективно параметризованный класс сред G_1 для предполагаемого уровня погрешности данных $\varepsilon_0 = 5\%$ и желаемой степени практической устойчивости решений обратной задачи $\varepsilon_0 = 5\%$.

Число параметров $s = (s_1, \dots, s_N)$ в новом классе G_1 уменьшилось и стало равным $N_1 = 31 \times 5 = 155$. Таким образом, относительная детальность параметризации составила $N_1/N_0 = 155/434 \approx 0,36$. Пара-

лонных примеров для класса G_1 делилось на две выборки: для обучения ($P^{Trn} = 125000$) и для тестирования ($P^{Tst} = 76600$) аппроксиматора. В качестве нейросетевой (НС) конструкции был выбран трехслойный перцептрон с передаточной сигмоидальной функцией активации для входного и выходного слоев. Решение задачи (1)

с помощью трехслойной нейросетевой конструкции можно приближенно записать в виде: $s^* = \Psi_{G_1}^{app} e = \mathbf{V}g(\mathbf{W}e)$, где g – заданная нелинейная передаточная функция, например $g(x) = 1/(1 + e^{-x})$. Элементы матриц весовых коэффициентов \mathbf{V} , \mathbf{W} (размерности $M \times L$, $L \times N$) являются свободными параметрами нейросети и определяются при ее обучении на эталонных примерах. Процесс обучения сводится к решению задачи минимизации на тренировочном наборе с условием «останова», получаемым по тестирующей выборке. После построения аппроксиматора $\Psi_{G_1}^{app}$ обратная задача сводится к простому вычислению суперпозиции нелинейных функций от вещественного аргумента. Поэтому время инверсии для конкретных данных определяется первыми секундами плюс затратами на расчет ошибки синтеза. Основное преимущество НС-аппроксиматора состоит в том, что он может быть использован для любого количества инверсий на моделях класса G_1 с «неограниченной» протяженностью более 50 км. На рис.3 представлен результат инверсии синтезированных данных для модели M1, из класса G_1 . Модель представляет собой группу перекрывающихся и экранирующих друг друга локальных тел с удельными сопротивлениями 50 и 600 Ом·м, залегающих в полупространстве с удельным сопротивлением равным 200 Ом·м.

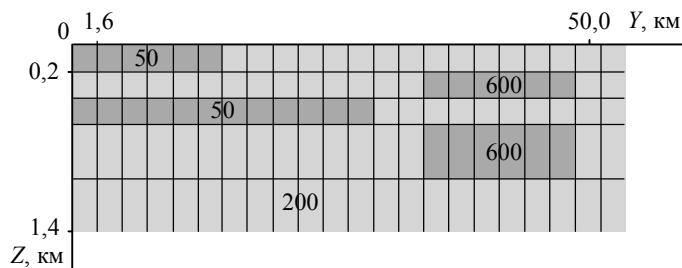


Рис.3. Схематическая модель M1

С помощью построенного для класса G_1 НС-аппроксиматора $\Psi_{G_1}^{app}$ была проведена инверсия синтезированных данных для модели M1 и получено приближенное решение обратной задачи $s_{\delta 1}$. Абсолютные ошибки инверсии $|s_{tru} - s_{\delta 1}|$, осредненные по примерам тестирующей выборки и по всем параметрам каждого яруса, а также по всей модели в целом, следующие:

Номер яруса	1	2	3	4	5
Ошибка решения, %	0,01	0,04	0,57	2,69	5,45
Среднее	1,75 %				

В таблице представлены относительные невязки синтеза (по норме L_2) по компонентам поля, осредненные по частотам, и среднее значение невязки по всем компонентам тензора импеданса.

На третьем этапе рассчитывались апостериорные характеристики $\beta_N(s_{\delta 1}, \tilde{e}, \delta_{sin t})$ степени однозначности (устойчивости) найденного приближенного решения $s_{\delta 1}$ для фиксированных модельных данных \tilde{e} и полученной фактической невязки синтеза $\delta_{sin t}$. В таблице представлены апостериорные характеристики по компонентам тензора, осредненные по периодам, и среднее значение невязки по всем компонентам.

Апостериорные оценки степени устойчивости, представленные в таблице, в среднем меньше соответствующих априорных характеристик практической устойчивости, что свидетельствует об эффективности используемого НС-метода инверсии.

Полученные в работе результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. На основе оценок *априорных характеристик устойчивости* $\beta_M(\delta)$, $\beta_N^a(\delta)$ могут быть сформулированы определенные требования к создаваемым моделям параметризации среды (и ее детальности), при которых обратная задача является практически устойчивой. Эти требования формулируются с учетом типа и объема используемых входных данных, уровня их погрешности и предполагаемой структуры фактической сети наблюдений.

2. Апостериорные оценки степени практической устойчивости (однозначности) $\beta_N(s_{\delta 1}, \tilde{\epsilon}, \delta)$ получаемых приближенных решений обратных задач позволяют объективно оценить погрешность и достоверность результатов практической интерпретации полевых данных (задача *верификации* результатов интерпретации геофизических данных).

В работе использовались ресурсы суперкомпьютерных кластеров МВС-100К МСЦ РАН, «Ломоносов» и «Чебышев» НИИЦ МГУ. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-11-00579, И.Е.Оборнев, НИИЯФ МГУ) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-05-01135, Е.А.Оборнев, М.И.Шимелевич).

ЛИТЕРАТУРА

1. Априорные оценки степени практической неоднозначности решений обратных задач геоэлектрики / М.И.Шимелевич, Е.А.Оборнев, И.Е.Оборнев, Е.А.Родионов // *Материалы 39-й сессии Международ. научн. семинара им. Д.Г.Успенского*. Воронеж: Изд-во Воронеж гос. ун-та. 2012. С.283-286.
2. Бердичевский М.Н. Об обратных задачах в геоэлектрике / М.Н.Бердичевский, В.И.Дмитриев. Глава 8 в книге: *Светов Б.С. Основы геоэлектрики*. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 656 с.
3. Гончарский А.В. О равномерном приближении монотонного решения некорректных задач / А.В.Гончарский, А.Г.Ягола // *Докл. Акад. наук СССР*. 1969. Т.184, № 4. С.771-773.
4. Жданов М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный мир, 2007. 712 с.
5. Иванов В.К. О некорректно поставленных задачах // *Математический сборник*. 1963. Т.61(103), № 2. С.211-223.
6. Лаврентьев М.М. Некорректные задачи математической физики и анализа / М.М.Лаврентьев, В.Г.Романов, С.П.Шишатский. М.: Наука, 1980. 286 с.
7. Новик О.Б. Математические вопросы сокращения числовой геофизической информации при поисках нефти и газа / *Московск. геологоразв. ин-т. Деп в ВИЭМС 02.11.87 № 485-МГ*.
8. Численные методы оценки степени практической устойчивости обратных задач геоэлектрики / М.И.Шимелевич, Е.А.Оборнев, И.Е.Оборнев, Е.А.Родионов // *Физика Земли*. 2013. № 3. С.58-64.
9. Численные методы оценки степени устойчивости обратных задач геоэлектрики в конечно-параметрических классах сред / М.И.Шимелевич, Е.А.Оборнев, И.Е.Оборнев, Е.А.Родионов // *Материалы Пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н.Бердичевского и Л.Л.Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011*. СПб: Изд-во СПбГУ, 2011. Т.2. С.139-141.
10. Численные методы решения некорректных задач / А.Н.Тихонов, А.В.Гончарский, В.В.Степанов, А.Г.Ягола. М.: Наука. 1990. 232 с.
11. Шимелевич М.И. Аппроксимационный метод решения обратной задачи МТЗ с использованием нейронных сетей / М.И.Шимелевич, Е.А.Оборнев // *Физика Земли*. 2009. № 12. С.22-38.
12. Шимелевич М.И. Нейросетевой метод магнитотеллурического мониторинга геоэлектрических параметров среды на основе неполных данных / М.И.Шимелевич, Е.А.Оборнев // *Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле*. 2008. № 1. Вып.11. С.62-67.

REFERENCES

1. Shimelevich M.I., Osborne E.A., Osborne I.E., Rodionov E.A. Apriornye ocenki stepeni prakticheskoy neodnoznachnosti reshenij obratnykh zadach geoelektriki (*Priori assessment of the practical solutions of inverse problems of ambiguity geoelectrics*). Materialy 39-i sessii Mejdunarodnogo nauchnogo seminar im. D.G.Uspenskogo. Voronezh: Izd-vo Voronezh. gos. un-ta, 2012, p. 283-286.
2. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Ob obratnykh zadachah v geoelektrike (*On inverse problems in geoelectrics*). Chapter 8 of the book: Svetov B.S. Osnovy geoelektriki. Moscow: Izd-vo LKI, 2008, p. 656.
3. Goncharskiy A.V., Yagola A.G. O ravnomernom priblizhenii monotonnykh reshenij nekorrektnykh zadach (*Uniform approximation of monotonic solutions to incorrect problems*). Dokl. AN SSSR. 1969. 184, N 4, p. 771-773.
4. Zhdanov M.S. Teoriya obratnykh zadach i reguljarizacii v geofizike (*The theory of inverse problems and regularization in geophysics*). Moscow: Nauchnyi mir. 2007, p. 712.

5. Ivanov V.K. O nekorrektno postavlenykh zadachah (*On improperly posed problems*). Matematicheskiy sbornik. 1963. T. 61(103) № 2. p. 211-223.
6. Lavrentyev M.M., Romanov V.G., Shishatskiy S.P. Nekorrektnye zadachi matematicheskoy fiziki i analiza (*Improperly posed problems of mathematical physics and analysis*). Moscow: Nauka, 1980, p. 286.
7. Novik O.B. Matematicheskie voprosy sokrashheniya chislovoj geofizicheskoy informacii pri poiskah nefi i gaza (*Mathematical problems in the reduction of the number of geophysical data necessary for oil and gas exploration*). Moscow. geologorazved. ins-t. Dep v VIEMS 02.11.87 N 485-MG.
8. Shimelevich M.I., Obornev E.A., Obornev I.E., Rodionov E.A. Numerical methods for estimating the degree of practical stability of inverse problems in geoelectrics. Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2013. Vol.49. N 3, p. 356-362.
9. Shimelevich M.I., Obornev E.A., Obornev I.E., Rodionov E.A. Chislennyye metody ocenki stepeni ustojchivosti obratnykh zadach geoelektriki v konechno-parametricheskikh klassah sred (*Numerical methods for assessing the stability of inverse problems of geoelectrics in finite-parameter class of environment*). Materialy Pyatoi vserossiiskoi shkoly-seminara imeni M.N.Berdichevskogo i L.L.Vanyana po elektromagnitnym zondirovaniyam Zemli – EMZ-2011. St Peterburg: Izd-vo SPbGU. 2011. Vol.2, p. 139-141.
10. Tihonov A.N., Goncharskiy A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G. Chislennyye metody resheniya nekorrektnykh zadach (*Numerical methods for solving improperly posed problems*). Moscow: Nauka, 1990, p. 232.
11. Shimelevich M.I., Obornev E.A. An approximation method for solving the inverse MTS problem with the use of neural networks. Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2009. Vol.45, N 12, p. 1055-1071.
12. Shimelevich M.I., Obornev E.A. Nejrosetevoj metod magnetotelluricheskogo monitoringa geoelektricheskikh parametrov srede na osnove nepolnykh dannykh (*Neuronet metod of magnetotelluric monitoring of geoelectrical parameters on the base of incomplete data*). Vestnik KRAUNC, Nauki o Zemle. 2008. N 1, iss.11, p.62-67.

NUMERICAL METHODS OF VALIDITY ESTIMATION OF ELECTROMAGNETIC SOUNDING DATA INTERPRETATION RESULTS

M.I.SHIMELEVICH, *PhD in Physics and Mathematics, shimelevich-m@yandex.ru*

E.A.OBORNEV, *PhD in Physics and Mathematics, eugenyo@mail.ru*

I.E.OBORNEV, *PhD in Physics and Mathematics, o_ivano@mail.ru*

E.A.RODIONOV, *Postgraduate student, evgeny_980@list.ru*

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University (MSU SINP), Moscow, Russia

The article deals with *a priori* and *a posteriori* characteristics of a degree of practical stability (practical uniqueness) of solutions to nonlinear inverse problems in geoelectrics. Numerical values of moduli of continuity of direct and inverse operators and their modifications are used as criteria of a degree of practical stability. Examples of calculation of *a priori* and *a posteriori* characteristics of a degree of practical stability of inverse problems for standard models which are used in geoelectrics are given. A dependence of characteristics of a degree of practical stability on accuracy of a description and on input data structure, volume and level of error is examined. The obtained numerical estimations of a degree of practical stability of approximate solutions to inverse problems do not depend on the algorithm applied for their solving. This allows estimating accuracy and reliability of the geophysical data interpretation results objectively.

Key words: inverse problems, geoelectrics, neural networks, *a priori* estimates, *a posteriori* estimates.

ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВНОСТИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГРУНТОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ

А.А.ФИЛИМОНЧИКОВ, аспирант, *af4990@mail.ru*

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия

А.В.ТАТАРКИН, канд. техн. наук, начальник отдела геофизических исследований,
VSTO08@mail.ru

М.И.ГИЛЕВА, инженер-геофизик, *mariafileva@inbox.ru*

ООО НИИПППД «Недра», Пермь, Россия

Рассматривается опыт применения электроразведочных исследований при поисках и оценке перспективности месторождений грунтовых строительных материалов. На различных этапах исследований использованы известные корреляционные зависимости и данные лабораторных измерений с определением удельного электрического сопротивления образцов грунтов.

Выполненные исследования позволили провести подсчет объемов грунтов с различным содержанием глины и выделить перспективные участки, отложения которых могут быть использованы в качестве строительных материалов.

Ключевые слова: месторождения грунтовых строительных материалов, оценка перспективности, электроразведка, удельное электрическое сопротивление, петрофизический подход, картирование, подсчет запасов.

Развитие минерально-сырьевой базы России неразрывно связано с освоением новых и расширением существующих месторождений полезных ископаемых. Увеличение объемов и темпов добычи минеральных ресурсов требует развитой инфраструктуры. Основой рационального и эффективного использования богатств недр и научного планирования геологоразведочных работ является оценка ресурсов минеральных строительных материалов [2].

Ведущее положение в топливно-энергетическом комплексе страны занимают регионы Западной Сибири, где добывается более 70 % нефти, 90 % газа, 50 % торфа и 30 % каменного угля. Однако большая часть территории региона покрыта труднопроходимыми лесами и болотами, мощность торфа в которых зачастую достигает 2 м и более. Поэтому крупные месторождения строительных материалов развиты на юге Западной Сибири (Алтайский край, Кемеровская область) или приурочены к аллювиальным отложениям крупных рек, таких как Обь и Иртыш. Для эффективной реализации промышленного потенциала региона необходимо учитывать совокупность экономико-географических, горно-геологических, технических и других факторов производства [5].

Основную информацию о местонахождении и перспективах нерудных полезных ископаемых (в том числе и строительных материалах) дают картировочно-поисковые съемки с привлечением геофизических методов. При детальной разведке нерудных полезных ископаемых геофизические методы повышают эффективность геологических работ и позволяют уменьшить объем бурения [4]. Одним из ведущих направлений в поисково-разведочной геофизике является группа методов электрометрии. Получаемая с их помощью информация может быть использована для проектирования инфраструктуры разрабатываемого месторождения [6].

В статье рассмотрен опыт применения методов электрометрии при поиске и оценке перспективности месторождений грунтовых строительных материалов в одном из регионов Западной Сибири. Целью исследований являлось повышение оперативности геологоразве-

дочных работ. В задачи входило картирование территории, постановка геологических работ и подсчет запасов.

Объекты исследований расположены в Тюменской области – южная часть Западно-Сибирской равнины, правый берег р.Иртыш, на возвышенности Тобольский материк – и представляет собой заболоченную таежную местность. В границах участка находятся следующие нефтяные месторождения: Протозановское, Тальцийское, Северо-Тамаргинское, Косухинское, Северо-Тяжминское, им.Малыка, Западно-Эпасское. Исследования необходимо выполнить в зонах радиусом 5, 10, 15, 20 км от центра месторождений.

По своей структуре исследования можно разделить на два этапа согласно задачам: поисковый и оценочный. На поисковом этапе по геофизическим исследованиям дан прогноз перспективных участков. Оценочный этап включал бурение скважин на выделенных участках, лабораторные исследования, уточнение геоэлектрической модели и собственно оценку перспективности встреченных грунтов в качестве строительных материалов.

Электроразведочные наблюдения проводились методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Выбор классического метода обусловлен высокой мобильностью, низкими трудозатратами и оптимальным соотношением между требуемой детальностью и стоимостью работ. В общей сложности отработано более 1500 физических точек с шагом съемочной сети, соответствующим масштабам 1:10 000 – 1:20 000, площадь исследованной территории равна 90 км². Глубина исследования составила 15 м.

На этапе обработки и интерпретации была получена геоэлектрическая модель среды без учета априорной информации, отражающая особенности строения и изменения электрических свойств грунтов, залегающих до глубины 15 м. Верхняя часть разреза до глубины 1-2 м характеризуется повышенными значениями удельного электрического сопротивления (УЭС) 50-650 Ом·м, что соответствует отложениям почвенно-растительного слоя и торфа. Подстилающие грунты обладают сопротивлением 10-30 Ом·м, что позволяет предполагать глинистый состав отложений. В интервале глубин 2-5 м, а также с глубины 10 м отмечаются области незначительного повышения сопротивления до 70-130 Ом·м, что связано с увеличением содержания песчаного материала, включениями гравия в исследуемом массиве пород.

Проведенные электроразведочные работы позволили выполнить пересчет удельного электрического сопротивления грунтов в содержание глинистого материала в процентах посредством использования палетки Рыжова [3] с учетом температуры при минерализации воды 0,15 г/л. Прогноз выполнен согласно принятой классификации грунтов в зависимости от процентного содержания глин. Таким образом, проведено картирование исследуемой территории, в ходе которого определены участки, перспективные на различные грунтовые строительные материалы. В общей сложности выделено более 80 перспективных участков для семи нефтяных месторождений.

Для постановки буровых работ на перспективных участках были построены карты прогнозного содержания глинистого материала в интервалах глубин 2-5, 5-10 и 10-15 м. Области наибольшего изменения свойств грунтов были рекомендованы для проходки геологических выработок. По итогам бурения получены данные о составе пород района исследований. В верхней части разреза до глубины 1-2 м залегают отложения почвенно-растительного слоя и торфа, подстилающая толща имеет глинистый состав: глины, суглинки и, редко, супеси различной консистенции с примесью органических веществ. Результаты первичной количественной интерпретации ВЭЗ хорошо согласуются с геологическим строением района работ.

Информация, полученная по результатам бурения, позволила уточнить геоэлектрическую модель среды. С помощью параметрических зондирований выполнена привязка геоэлектрических горизонтов к выделенным инженерно-геологическим элементам, более точно определено удельное сопротивление отложений.

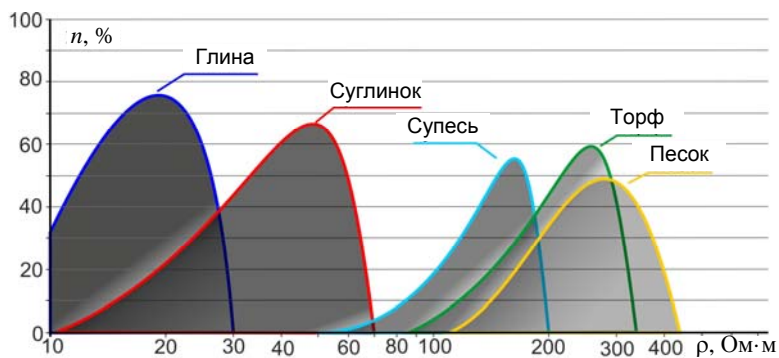


Рис.1. Распределения удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов Протозановского месторождения

лабораторные измерения удельного сопротивления образцов выполнены по развиваемой авторами методике с применением микроустановки Шлюмберже. Используемая методика позволяет оперативно выполнять замеры УЭС на образцах практически любых размеров без нарушения их герметизации и сплошности, т.е. использовать рядовые пробы. Для получения истинного сопротивления вводятся поправки за влияние размеров образцов, полученные в результате моделирования.

В результате построены диаграммы распределения УЭС дисперсных грунтов для каждого месторождения. Распределения изменения удельного сопротивления для каждой группы дисперсных грунтов семи нефтяных месторождений показаны на примере Протозановского месторождения (рис.1).

Из рис.1 видно, что для большинства глин характерны сопротивления 18-19 Ом·м, суглинков – 45-50 Ом·м, супесей – 150-160 Ом·м, песков – 220-320 Ом·м. Таким образом, исследуемые грунты обладают более высокими сопротивлениями относительно зависимости А.А.Рыжова. Завышение УЭС грунтов происходит, вероятно, за счет примеси органических веществ, что необходимо учитывать при оценке перспективности.

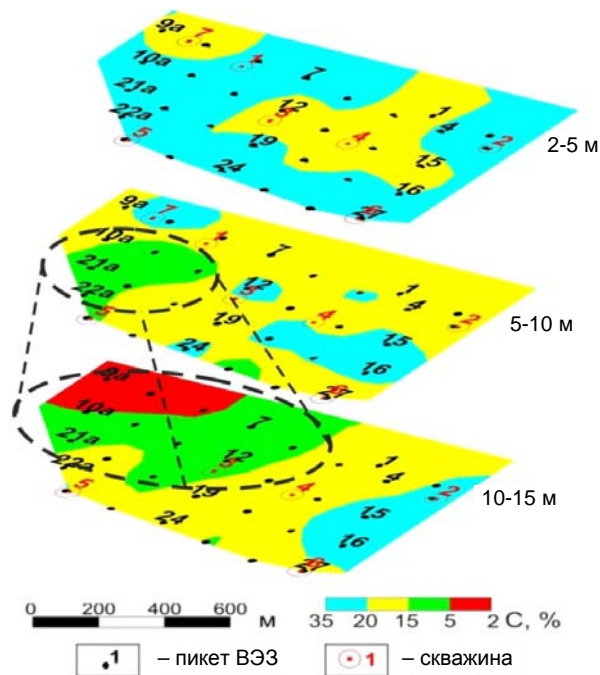


Рис.2. Карты содержания глинистого материала в интервале глубин 2-5, 5-10, 10-15 м для первого перспективного участка Протозановского месторождения

Для уточнения зависимости удельного сопротивления грунтов от содержания глинистого материала проведены лабораторные измерения УЭС образцов горных пород. Существующая методика измерения УЭС образцов, описанная в нормативных документах, является трудоемкой. Для проведения наблюдений необходима подготовка образцов, что увеличивает затраты времени. В связи с этим ла-

бораторные измерения удельного сопротивления образцов выполнены по развиваемой авторами методике с применением микроустановки Шлюмберже. Используемая методика позволяет оперативно выполнять замеры УЭС на образцах практически любых размеров без нарушения их герметизации и сплошности, т.е. использовать рядовые пробы. Для получения истинного сопротивления вводятся поправки за влияние размеров образцов, полученные в результате моделирования.

С учетом полученной зависимости были построены окончательные интервальные карты содержания глинистого материала в процентах для всех перспективных участков. Кроме того, была определена балльность, используемая для инженерно-геологического районирования [1]. На рис.2 представлен пример для перспективного участка. Выявлено, что для большей части исследуемой территории характерно содержание глинистого материала от 15 до 35 %, что по гранулометрической классификации грунтов соответствует глинам и суглинкам. Супеси (содержание глинистого материала от 5 до 15 %) распространены локально с глубины около 5 м, пески – породы с содержанием глины менее 5 % – имеют очень малый объем (около 2,5 %) и залегают на глубине более 10 м.

**Объемы грунтов с различным содержанием глин (на примере первого перспективного участка
Протозановского месторождения), тыс.м³**

Геоэлектрический горизонт; глубина залегания, м	Содержание глин, %			
	35-20	20-15	15-5	5-2
Слой 1; 0-0,9	Объем торфа $V = 2400$ тыс.м ³			
Слой 2; 0,9-2,4				
Слой 3; 2,4-5	1874	729	–	–
Слой 4; 5-10	1490	2234	931	–
Слой 5; 10-15	570	3230	1330	380
Итого	3934	6193	2261	380

Примечание. Площадь участка 1 км², исследованный объем пород 15 млн м³.

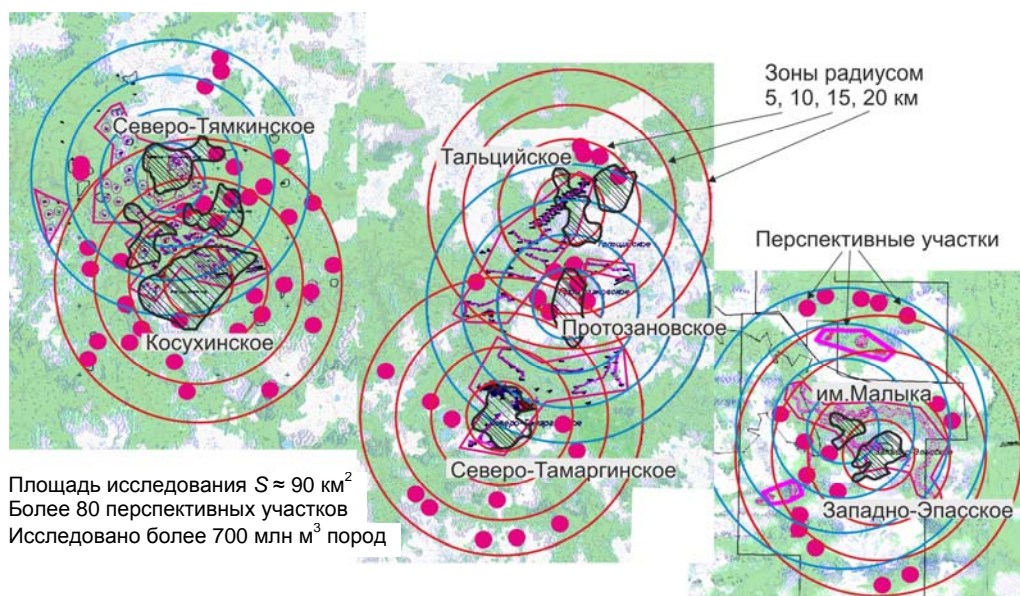


Рис.3. Схема расположения перспективных участков вокруг нефтяных месторождений

Данные анализа карт использованы для подсчета объемов грунтов с различным содержанием глины на каждом перспективном участке, а также определен объем торфяных залежей (см. таблицу).

Подобный цикл работ выполнен на каждом перспективном участке в зонах поиска радиусом 20 км вокруг семи нефтяных месторождений (рис.3). Полученная информация использована для определения перспективности встреченных грунтов в качестве различных строительных материалов.

Выводы. Сформулируем основные результаты исследований:

1. Геофизические исследования, выполняемые на поисковом этапе, могут успешно применяться для определения местоположения залежей грунтовых строительных материалов. Такой подход эффективен и позволяет учесть горнотехнические и экономические факторы при планировании рационального недропользования.

2. Применение петрофизического подхода позволяет получить информацию о характеристиках грунтов всего исследуемого объема пород, что повышает эффективность инженерно-геологических изысканий на стадии до и после геологоразведочных работ.

3. По итогам исследований проведена оценка перспективности более 80 участков для использования грунтов в качестве различных строительных материалов в зонах радиусом 20 км вокруг следующих нефтяных месторождений: Протозановского, Тальцийского, Северо-Тамаргинского, Косухинского, Северо-Тямкинское, им.Малька, Западно-Эпасское.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методика инженерно-геологического районирования на основе балльной оценки классификационного признака / В.В.Середин, М.В.Пушкарева, Л.О.Лейбович, Н.С.Бахарева // Инженерная геология. 2011. № 3. С.20-25.
2. Потлов Г.Г. Методические особенности оценки ресурсов нерудных стройматериалов в районах железнодорожного строительства Сибири и Дальнего Востока // Нерудные ископаемые Западной Сибири. 1971. № 32. С.191-193.
3. Рыжов А.А. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач / А.А.Рыжов, А.Д.Судоплатов // Научно-техн. достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр / ВИЭМС. М., 1990. С.27-41.
4. Хмелевской В.К. Краткий курс разведочной геофизики, 2-е изд. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1979. 287 с.
5. Шаманский И.Л. Геолого-экономическая оценка ресурсов и месторождений минерального сырья, их задачи и связь с экономикой геологоразведочных работ / И.Л.Шаманский, С.П.Никоноров, Р.З.Фахрутдинов // Нерудные ископаемые. 1969. № 28. С.3-10.
6. Экологическая оценка территорий месторождений углеводородного сырья для определения возможности размещения объектов нефтедобычи / Л.О.Лейбович, В.В.Середин, М.В.Пушкарева и др. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2012. № 12. С.13-16.

REFERENCES

1. Seredin V.V., Pushkareva M.V., Leibovich L.O., Bahareva N.S. Metodika inzhenerno-geologicheskogo raionirovaniya na osnove ball'noi otsenki klassifikatsionnogo priznaka (*A Technique of engineering-geological zoning based on point assessment of classification criterion*). Inzhenernaya geologiya. 2011. N 3, p.20-25.
2. Potlov G.G. Metodicheskie osobennosti otsenki resursov nerudnykh stroimaterialov v raionakh zheleznodorozhnogo stroitel'stva Sibiri i Dal'nego Vostoka (*Methodological features of resources evaluation of nonmetallic building materials in railway building in Siberia and Far East areas*). Nerudnye iskopaemye Zapadnoi Sibiri. 1971. N 32, p.191-193.
3. Ryzhov A.A., Sudoplatov A.D. Raschet udel'noi elektroprovodnosti peschano-glinistykh porod i ispol'zovanie funktsional'nykh zavisimostei pri reshenii gidrogeologicheskikh zadach (*Conductivity calculation of sand-clays rocks and the use of functional dependences for solving hydrogeological problems*). Nauchno-tekhn. dostizheniya i peredovoi opyt v oblasti geologii i razvedki neдр. VIEMS. Moscow, 1990, p.27-41.
4. Khmelevskoi V.K. Kratkii kurs razvedochnoi geofiziki (*A Short course of exploration geophysics*). Second edition. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta. 1979, p.287.
5. Shamanskii I.L., Nikonorov S.P., Fahrutdinov R.Z. Geologo-ekonomicheskaya otsenka resursov i mestorozhdenii mineral'nogo syr'ya, ikh zadachi i svyaz' s ekonomikoi geologorazvedochnykh rabot (*Geo-economic evaluation of resources and mineral deposits, their tasks and relations with exploration economy*). Nerudnye iskopaemye. 1969. N 28, p.3-10.
6. Leibovich L.O., Seredin V.V., Pushkareva M.V., Chirkova A.A., Kopylov I.S. Ekologicheskaya otsenka territorii mestorozhdenii uglevodorodnogo syr'ya dlya opredeleniya vozmozhnosti razmeshcheniya ob'ektov nefteдобычи (*Ecological evaluation of hydrocarbons deposits for determining a location of oil-producing facilities*). Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse. 2012. N 12, p.13-16.

PROSPECTIVITY ASSESSMENT OF GROUND BUILDING MATERIALS DEPOSITS USING ELECTROLOGGING

A.A.FILIMONCHIKOV, Postgraduate student, af4990@mail.ru

Perm State National Research University, Russia

A.V.TATARKIN, PhD in Engineering Sciences, Head of Geophysical Research Department, VSTO08@mail.ru

M.I.GILEVA, Engineer-geophysicist, mariagileva@inbox.ru

«Nedra» Ltd, Perm, Russia

The article deals with an application of electrical exploration for prospecting and prospectivity assessment of ground building materials deposits. Certain correlations and laboratory measurements data on determination of electrical resistivity of ground samples were used at various stages of the research.

The research results allowed calculating the volume of ground with different clay content and choosing some promising areas, whose deposits can be used as building materials.

Key words: ground building materials deposits, prospectively assessment, electric exploration, electrical resistivity, petrophysical approach, mapping, reserves calculation.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ПОИСКОВ НЕГЛУБОКИХ ЗАЛЕЖЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНЕ ГОРОДА ИТАЙ ЭЛЬ-БАРУД, ДЕЛЬТА НИЛА (ЕГИПЕТ)

Х.М.ШААБАН, аспирант, *hshaaban001@yahoo.com*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Х.ГАЗАЛА, профессор, *ghazala@mans.edu.eg*

Университет Эль-Мансура, Египет

Э.АЛЬ-САЙЕД, профессор, *saidragab2001@yahoo.com*

Г.ЭЛЬ-КАДИ, профессор, *gadosan@yahoo.com*

Национальный научно-исследовательский институт астрономии и геофизики, Хелуан, Египет

Комплекс дельты Нила является самым крупным и известным дельтовым комплексом Средиземноморского осадочного бассейна. Кроме того, дельта Нила – это единственное место на территории Египта, где происходит накопление и сохранение современных отложений. Геологическая изученность четвертичных отложений этого региона невысока. В данной работе рассматриваются особенности строения верхов четвертичных отложений западной части дельты Нила и локализации в их составе подземных водоносных горизонтов, установленные в результате проведения электромагнитных исследований методом переходных процессов (МПП).

В ходе исследований было выполнено 232 измерения методом МПП на 43 точках наблюдений с использованием станций «SIROTEM МК-3». В качестве источника и приемника электромагнитного сигнала была использована одна петля. Длина стороны петли составляла 25 м. Для геоэлектрического одномерного (1D) моделирования разрезов четвертичных отложений до глубины 30 м была использована программа «TEMIXXLV4».

Построенные геоэлектрические разрезы показывают, что в составе верхнечетвертичных отложений выделяется три геоэлектрических слоя. Верхняя часть разреза, выполненная голоценовыми илами Нила, разделяется на два слоя: слой сельскохозяйственного использования (слой 1); слой ила (слой 2). В нижней части разреза залегают песчаные водоносные горизонты верхнего плейстоцена (слой 3) со сложной нелинейной морфологией границ. Именно этот слой представляет основной промышленный интерес как источник подземных вод.

Ключевые слова: подземная вода, электромагнитные методы, геоэлектрические слои, Египет.

Введение. Дельта Нила, охватывающая площадь около 12500 км², культивируется в течение нескольких тысячелетий. Область исследований находится в центральной части западного фланга дельты Нила вблизи города Итай Эль-Баруд (рис.1). Она локализована между широтами 30°50'-31°N и долготами 30°35'-30°46'42"E и занимает площадь около 435 км². На этой площади проводится активная сельскохозяйственная деятельность.

Осадочные отложения дельты Нила являются самым крупным и известным дельтовым комплексом Средиземноморского осадочного бассейна. Кроме того, это единственная область на территории Египта, где происходит современное накопление и четвертичных отложений. Таким образом, прогиб дельты Нила обладает наиболее полным разрезом четвертичных отложений в Египте. Здесь отложения имеют наибольшие мощности и подразделяются на несколько стратифицированных единиц. Четвертичные отложения Нила несогласно залегают на образованиях плиоцена или более древних отложениях [3]. По данным

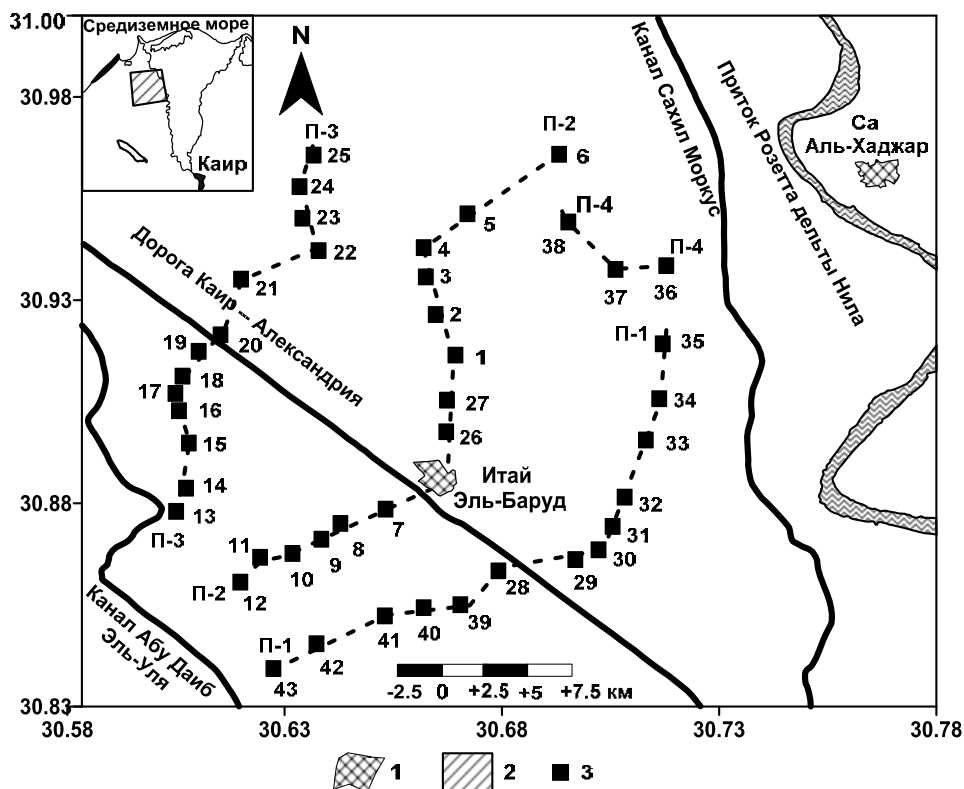


Рис.1. Схема расположения электроразведочных профилей на площади исследований (район г. Итай Эль-Баруд)

1 – города; 2 – положение района исследований на мелкомасштабной схеме; 3 – положение электроразведочных станций, метод переходных процессов (МПП)

А.Риззини и соавторов [5], максимальная мощность четвертичных отложений здесь достигает 1000 м, с уменьшением мощности в направлении южной окраины дельты. В средней части дельты Нила мощность толщи составляет около 500 м.

К настоящему времени здесь выполнено небольшое число геофизических исследований, направленных на изучение верхов четвертичных отложений. В данной работе представлены результаты исследований особенностей радиальной расслоенности четвертичных отложений и морфологии кровли подземного водоносного горизонта с использованием электромагнитного метода МПП.

Литостратиграфия. По данным А.Риззини и соавторов [5], в разрезе четвертичных отложений дельты Нила по вещественному составу выделяются два основных формационных комплекса: формация «Mit-Ghamr» и формация «Bilqas».

Формация «Mit-Ghamr» имеет тот же возраст, что и широко распространенная в Египте формация песков «Prenile Qena». Она состоит из кварцевых песков и конгломератов. Тонкие слои глины, соли и торфа, содержащие прибрежную или лагунную фауну, маркируют верхние уровни этой формации. Мощность формации «Mit-Ghamr», достигающая 700 м в северной части дельты, уменьшается в южном направлении [6]. В разрезе этой формации проявляются вариации литологического состава от песчаных фаций (покрывающих большую часть дельты) до песчаных сланцев в северной краевых зонах дельты.

Формация «Bilqas» состоит преимущественно из глин, солей и мелкозернистого песка речных паводковых осадков. В ее разрезе выделяются растительные остатки и торфяники. Эта формация представляет собой непроницаемую покрывку четвертичных осадков дельты Нила. Мощность этой формации варьирует от нескольких метров в южной части до 30 м в северной части дельты Нила, достигая на отдельных участках 77 м [6]. В составе форма-

ции «Vilqas» отмечаются литологические вариации: глины и илы – в восточной и центральной частях дельты Нила; дюнные отложения в северных прибрежных районах; песчаные фации – на юге.

Гидрогеология. Удельное электрическое сопротивление осадочных слоев зависит от их состава, водонасыщенности и минерализации подземных вод [1, 4]. Таким образом, при проведении электроразведочных работ необходимо учитывать гидрологический и гидрохимический режимы водоносных горизонтов дельты Нила.

В составе четвертичных отложений дельты Нила выделяется два основных водоносных горизонта. Нижний горизонт представляет собой мощный слой плейстоценовых песков (формация «Mit-Ghamr») [4], который перекрывается водоупорными толщами илов голоцена (формация «Vilqas»). В разрезе последней выделяются линзы песков (верхний водоносный горизонт), содержащие грунтовые воды, которые поступают сюда через дренажные и ирригационные каналы. Соленость подземных вод водоносных горизонтов дельты Нила изменяется от умеренной до чрезмерно высокой. Наиболее низкие значения минерализации отмечаются в южных частях региона дельты и в районах, близких к оросительным каналам и рукавам Нила.

Геофизические исследования. В течение последних трех десятилетий электромагнитные методы широко используются для картирования закономерностей латеральной и вертикальной изменчивости сопротивлений осадочных отложений. В последние годы метод МПП находит применение при выявлении основных водоносных горизонтов в пределах бассейнов, выделенных этим методом на стадии региональных исследований [2].

В ходе полевых исследований нами было выполнено 232 измерения методом МПП на 43 точках наблюдений с использованием австралийских электромагнитных станций «SIROTEM МК-3» (рис.1). В состав станции «SIROTEM МК-3» входят источник и приемник, монтируемые в единой портативной консоли. Источник создает электрический импульс в петлях кабеля, проложенного на дневной поверхности. В качестве приемника электромагнитного сигнала обычно используется та же петля. Длина стороны петли составляла 25 м. Все наблюдения повторялись четыре или пять раз.

Обработка и интерпретация данных МПП. Для обработки выбирались записи с наилучшим соотношением «полезный сигнал – шум». Для расчета глубины и кажущегося сопротивления слоев четвертичных отложений использован модуль программы одномерного (1D) моделирования TEMIXXLV4 (1996). При подготовке исходной геоэлектрической модели для расчета 1D-инверсии данных МПП были учтены результаты скважинных геологических исследований. Моделирование выполнялось «методом подбора»: параметры модели подбирались таким образом, чтобы обеспечить согласованность данных МПП и данных скважинных исследований. На рис.2 показаны типичные примеры графиков зондирования МПП и расчетных геоэлектрических разрезов.

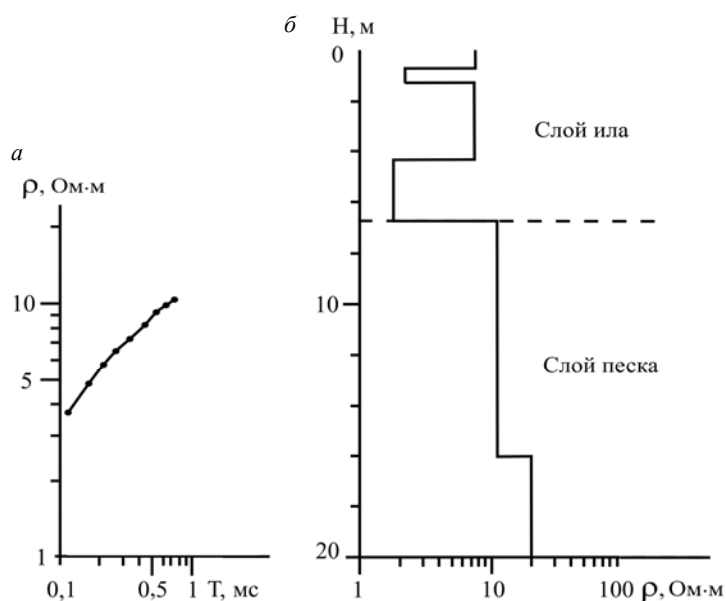


Рис.2. Типичный пример графика электромагнитного зондирования (а) и интерпретационного геоэлектрического разреза (б)

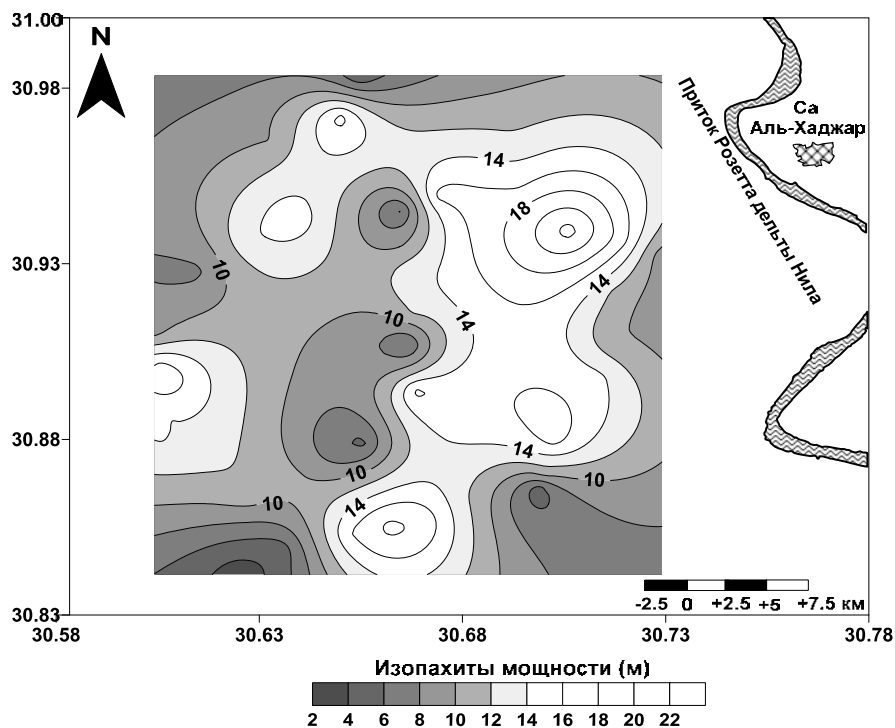


Рис.4. Изопахиты мощности голоценовых илов дельты Нила (район г. Итай Эль-Баруд)

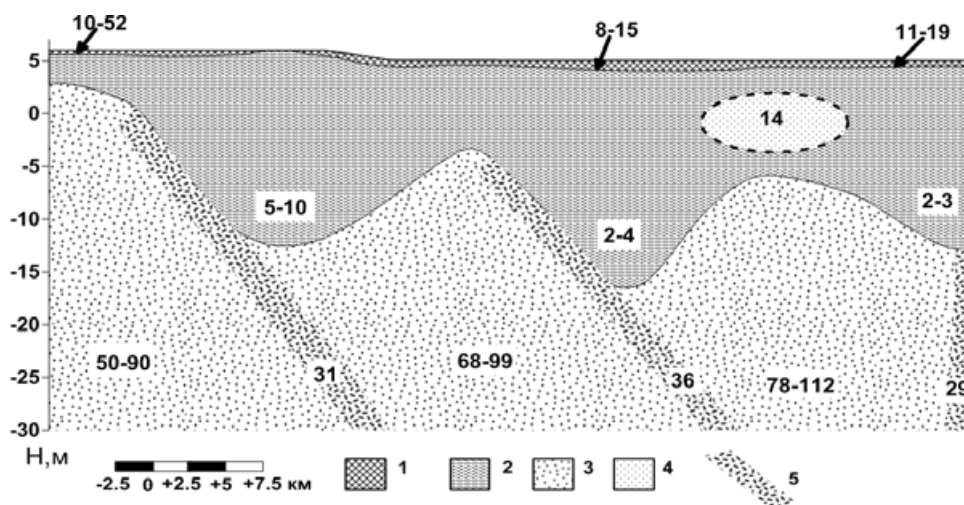


Рис.5. Обобщенная геологическая модель района исследования, полученная по результатам МПП

1 – сельскохозяйственный слой; 2 – ил; 3 – крупнозернистый песок; 4 – тонкодисперсный песок;
5 – предполагаемое положение зон разрывных нарушений

западной, западной, восточной и южной частях площади исследований. Этим районам соответствуют впадины плейстоценовых песков.

Геологическая модель района исследования представлена на рис.5.

Заключение. Применение электромагнитных методов исследований обеспечивает создание структурно-вещественной основы модели глубинного геологического строения района Нила. Основой глубинных построений являются три геоэлектрических разреза, которые отражают особенности глубинного строения площади исследований.

В пределах области исследований имеется сеть оросительных водных каналов, через которые поверхностные воды проникают в нижние горизонты, что отражается на разрезах удельного электрического сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hydrochemistry and water quality of groundwater in the central part of the Nile Delta, Egypt / M.G.Atwia, J.B.Khalil, M.M.El Awady, M.M.Habib // Egyptian Journal of Geology. 1996. Vol.41/2B. P.743-764.
2. Kaufmann A.A. Frequency and transient sounding. Methods in Geochemistry and Geophysics / A.A.Kaufmann, G.V.Keller // Elsevier Publ. Co., 1983. Vol.16. 685 p.
3. Said R. The geological evaluation of the River Nile. New York, Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 1981. 151 p.
4. Serag El-Din H.M. Geological, hydrogeological and hydrological studies on the Nile Delta Quaternary aquifer. PhD Thesis, Faculty of Science, Mansoura University, Egypt, 1990. 300 p.
5. Stratigraphy and sedimentation of Neogene-Quaternary section in the Nile Delta area (A.R.E.) / A.Rizzini, F.Vezzani, V.Cococetta, G.Milad // Marine Geology, 1978. Vol.27. P.327-348.
6. The Neogene-Quaternary sedimentary basins of the Nile Delta, Egypt / Z.M.Zaghloul, A.A.Taha, O.A.Hegab, F.M.El-Fawal // Journal of Geology. 1997. Vol.21. P.1-19.

REFERENCES

1. Atwia M.G., Khalil J.B., El Awady M.M., Habib M.M. Hydrochemistry and water quality of groundwater in the central part of the Nile Delta, Egypt. Egyptian Journal of Geology. 1996. Vol.41/2B, p.743-764.
2. Kaufmann A.A., Keller G.V. Frequency and transient sounding. Methods in Geochemistry and Geophysics, Elsevier Publ. Co., 1983. Vol.16, p.685.
3. Said R. The geological evaluation of the River Nile. New York, Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 1981, p.151.
4. Serag El-Din H.M. Geological, hydrogeological and hydrological studies on the Nile Delta Quaternary aquifer. PhD Thesis, Faculty of Science, Mansoura University, Egypt, 1990, p.300.
5. Rizzini A., Vezzani F., Cococetta V., Milad G. Stratigraphy and sedimentation of Neogene-Quaternary section in the Nile Delta area (A.R.E.). Marine Geology. 1978. Vol.27, p.327-348.
6. Zaghloul Z.M., Taha A.A., Hegab O.A., El-Fawal F.M. The Neogene-Quaternary sedimentary basins of the Nile Delta, Egypt. Journal of Geology. 1997. Vol.21, p.1-19.

APPLICATION OF THE TIME-DOMAIN ELECTROMAGNETIC METHOD FOR SHALLOW GROUNDWATER PROSPECTING IN ITAY EL-BAROUD AREA, NILE DELTA (EGYPT)

H.M.SHAABAN, Postgraduate student, *hshaaban001@yahoo.com*

National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

H.GHAZALA, Professor of Applied Geophysics, *ghazala@mans.edu.eg*

Mansoura University, Egypt

E.AL-SAYED, Professor of Applied Geophysics, *saidragab2001@yahoo.com*

G.EL-QADY, Professor of Applied Geophysics, *gadosan@yahoo.com*

National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Helwan-11421, Egypt

The Nile Delta is not only the oldest known ancient delta, but also is the largest and most important depositional complex in the Mediterranean sedimentary basin. Furthermore, it is a unique site in Egypt that is suitable for accumulation and preservation of the Quaternary sediments. There are very few investigations which have been carried out on the Upper Quaternary sediments of the western part of the Nile Delta. The present paper is mainly concerned with the application of the geophysical technique in the form of electromagnetic method to investigate the Quaternary sediments sequence as well as detecting the groundwater aquifer in the area of study.

A site of 232 TEM sounding in 43 stations were carried out using a «SIROTEM MK-3» time-domain system. A simple coincident loop configuration, in which the same loop transmits and receives signals, was employed. The loop side length was 25 m. A 1-D modeling technique was applied to estimate the depth and the apparent resistivity of the interpreted geoelectrical data.

Based on the interpretation of the acquired geophysical data, four geoelectric cross-sections were constructed. These sections show that the Upper Quaternary sequence consists of three geoelectric layers. The Holocene Nile mud is split into two layers: the agricultural root zone (Layer 1); thick water saturated mud (Layer 2). The Upper Pleistocene sandy aquifer (Layer 3) has very complicated non-linear boundary.

Key words: groundwater, electromagnetic methods, geoelectrical layers, Egypt.

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И СОДЕРЖАНИЙ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (НА ПРИМЕРЕ ОБЪЕКТОВ СРЕДНЕГО УРАЛА)

Н.П.СЕНЧИНА, аспирантка, *n_senchina@inbox.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Проанализирована взаимосвязь электрохимических процессов коры выветривания и геохимических полей. Цель работы – оценить влияние естественных электрических полей на движение ионов металлов в горных породах. Полученные данные полевых измерений и лабораторных анализов могут помочь в оценке массопереноса под действием электрического поля и вклада электрических явлений в перераспределение химических элементов в горных породах. Наблюдаемые зависимости позволяют ответить утвердительно на вопрос о влиянии естественного электрического поля на дифференциацию элементов в породах.

Ключевые слова: геоэлектрохимия, метод естественного электрического поля, геохимия.

Введение. Электрохимические процессы в горных породах относятся к числу важных факторов, контролирующих формирование и изменение минеральных фаз. Особо важную роль электрохимические процессы играют в зоне гипергенеза, где благодаря гальваническому эффекту образуются квазистационарные естественные электрические поля. В таких ситуациях возможно накопление большого количества продуктов природного электролиза [2]. При этом заряженные соединения элементов перемещаются в растворах в открытых порах и поляризуют закрытые поры в близком соответствии с законами электростатики. Предложенный материал представляет собой результат анализа небольшого объема полевых наблюдений, направленных на оценку влияния естественных электрических полей на вторичное перераспределение химических элементов в горных породах в условиях коры выветривания. Данные наблюдения необходимы для подтверждения выкладок, представленных в теоретической модели, описанной в работах [4, 5] при участии автора и кратко изложенной ниже. Некоторые важные выводы сделаны на основе анализа корреляционных связей результатов измерения потенциала естественного электрического поля и содержания химических элементов вдоль профилей, проложенных в пределах дунитового и пироксенитового массивов на Среднем Урале.

Описание метода и результатов. В работе проанализированы результаты измерений потенциала естественного электрического поля (ЕП) и результаты химического анализа проб по двум профилям (рис.1). Профиль 1 расположен на рудном поле имени Н.К.Высоцкого в пределах платиноносного Светлоборского дунитового массива, профиль 2 пересекает массивное жильное тело титаномагнетита на массиве Качканар, сложенном пироксенитами, габбро, перидотитами. Данные получены автором в течение полевых работ 2013 г. Число точек наблюдения и отбора проб принято минимально необходимым и достаточным для достижения поставленной цели в условиях ограниченных материальных ресурсов.

Работы включают опробование рыхлых отложений верхней части коры выветривания и изучение распределения потенциала естественного электрического поля с помощью неполяризующихся электродов. Результат оценки линейной корреляции электрохимических процессов зоны гипергенеза (потенциала ЕП) с геохимическим образом указанных рудных объектов представлен в таблице.

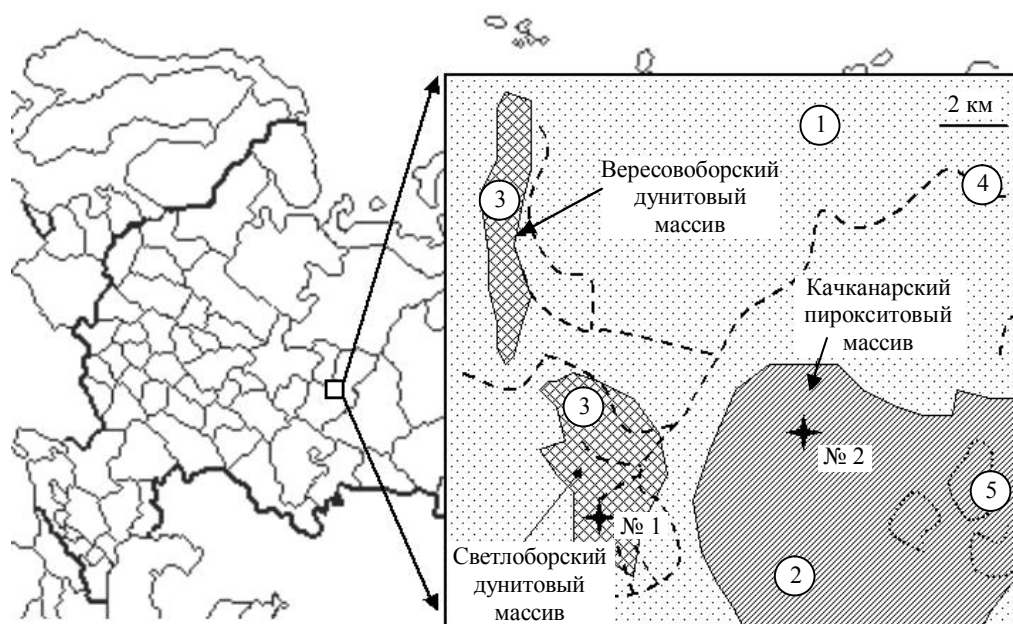


Рис.1. Положение участков работ № 1 и № 2

1 – вулканиты (ордовик); 2 – пироксениты и магнетитовые пироксениты, габбро, перидотиты; 3 – дуниты с оторочкой из габбро и пироксенитов; 4 – русла, содержащие россыпи платины; 5 – контуры карьеров Качканарского горно-обогатительного комбината

Характеристика групп элементов по коэффициенту корреляции с ЕП на профиле 2

Химический элемент	Коэффициент корреляции потенциала ЕП и содержания соответствующего элемента	Характеристика групп элементов по коэффициенту корреляции с потенциалом ЕП (границы определены с помощью критических значения коэффициента корреляции при различных уровнях значимости)
Sr Zn Cr	-0,63 -0,47 -0,46	Элементы, передвигающиеся под действием естественного электрического поля в соответствии с предлагаемой моделью
Ni Ba Cu	-0,37 -0,22 -0,12	Элементы, частично передвигающиеся под действием естественного электрического поля
Br Co Y	-0,10 -0,06 -0,03	Индиферентные по отношению к ЕП элементы, с незначительным коэффициентом корреляции с естественным электрическим полем
Fe Ti Mn	0,66 0,70 0,42	Элементы, распределение которых участвует в формировании естественного электрического поля (не исключено, что также зависит от ЕП, но распределение подчиняется другим закономерностям)

Анализируя данные ЕП, следует указать, что значения электрического потенциала в случае профиля 1 находятся в пределах от -10 до 35 мВ. Для профиля 2 значения ЕП находятся в более широких пределах, и картина измерений электрического поля соответствует зоне окисления электронного проводника – магнетита со значимым минимумом (порядка 100 мВ) над центром этого тела. Шаг измерений и отбора проб составляет 2 м при числе точек измерений 30 – на профиле 1 и 15 – на профиле 2.

Результаты анализа проб показали, что в случае профиля 1 значимой корреляционной связи измеренных содержаний элементов и потенциала ЕП не наблюдается. Однако в случае измерений на участке с более мощным полем – по профилю 2 – заметны сильные корреляционные связи между ЕП и содержаниями железа (коэффициент корреляции с ЕП ра-

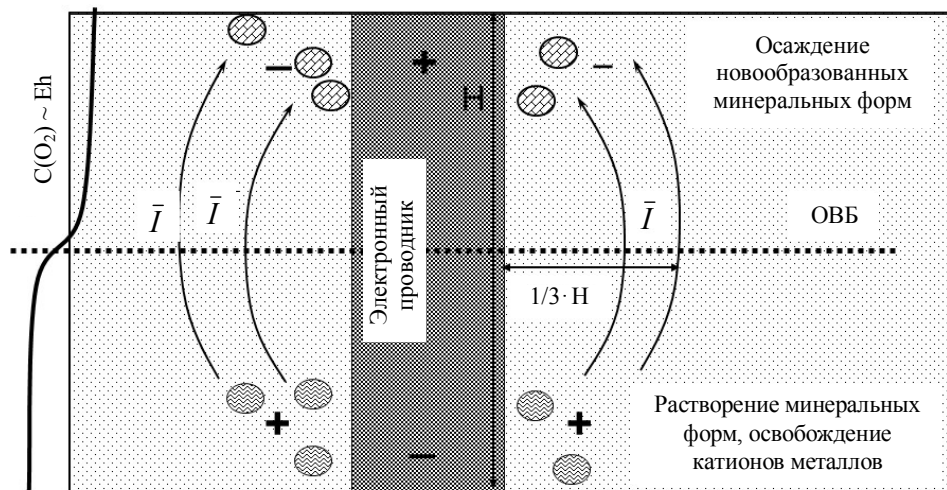


Рис.2. Схема протекания процесса и геометризованная модель, используемая в расчете (в объеме – цилиндрически симметричная относительно центральной оси рудного тела)

вен 0,66) и титана (0,70). Следует отметить, что аномалии по железу и титану нельзя считать ореолом рассеяния жильного тела, так как они имеют отрицательный знак – минимум концентрации наблюдается над телом титаномагнетита.

Важно отметить, что для других элементов коэффициенты корреляции ЕП и содержания элемента тоже достаточно высоки по модулю, но в большинстве случаев отрицательны (за исключением Mn). Таким образом, можно сделать предварительный вывод о том, что в случае слабых полей их влияние на перераспределение элементов не ощутимо. Однако заметить связь ЕП и концентраций элементов можно при перепаде значений естественного электрического поля порядка 100 мВ и более.

При этом распределение железа и титана (вероятно, и марганца) наверняка следует считать «производящим» электрическое поле, а другие элементы из отмеченных в таблице высокими коэффициентами корреляции – можно считать мигрировавшими под действием ЕП.

Это можно объяснить следующим образом: отрицательный знак коэффициента корреляции содержания элемента и потенциала ЕП говорит о том, что данный элемент мигрировал под действием электрического поля в соответствии с силами кулоновского взаимодействия, т.е. ионы металлов (имеющие положительный заряд) передвигаются к отрицательному полюсу в ионном проводнике, где и накапливаются, что проиллюстрировано рис.2.

На рис.2 изображена схема протекания процесса, возникающего в ионном проводнике (выделено точками) при наличии в его среде электронного проводника, расположенного в условиях смены потенциала, вызванной изменением концентрации кислорода с глубиной. В таком случае формируется окислительно-восстановительный барьер (ОВБ) и электронный проводник получает вертикальную электрическую поляризацию с положительным полюсом у поверхности, тогда как на окружающие породы – ионные проводники – наводится противоположный заряд [1, 3], приводящий в движение ионы, содержащиеся в поровых растворах, в соответствии с линиями тока. В связи с этим возникает закономерный вопрос, какова доля элементов и соединений, которая способна растворяться, перемещаться и накапливаться под действием квазистационарных электрических полей природного происхождения, от чего она зависит и как может быть определена теоретически.

Расчет доли перемещаемых под действием ЕП элементов. Чтобы выполнить простую количественную оценку указанных процессов, геометризуя формы и упрощая зависимости, в первую очередь прибегнем к законам Фарадея: 1) масса вещества, осажденного на электроде при электролизе, прямо пропорциональна количеству электричества, пере-

данного на этот электрод; 2) для данного электрического заряда масса химического элемента, осажденного на электроде, прямо пропорциональна эквивалентной массе элемента.

Законы Фарадея можно записать в виде следующей формулы:

$$m = (Q/F)(M/z), \quad (1)$$

где: m – масса осажденного на электроде вещества в граммах, Q – полный электрический заряд, прошедший через вещество; $F = 96485,338$ Кл·моль⁻¹ – постоянная Фарадея; M/z – эквивалентная масса осажденного вещества; M – молярная масса вещества, z – валентное число ионов вещества (число электронов на один ион).

В случае постоянного тока получим формулу

$$m = (It/F)(M/z), \quad (2)$$

где I – сила электрического тока; t – время.

Для тока в линейном проводнике

$$I = U/R = US/\rho l, \quad (3)$$

где U – разность потенциалов; R – сопротивление; S – площадь сечения проводника; ρ – удельное электрическое сопротивление проводника; l – длина проводника.

Не будем переходить к плотности тока, так как сейчас нас интересуют интегральные характеристики. С учетом средних параметров объекта моделирования и данных литературных источников, возьмем следующие их значения для упрощенной модели: разность потенциалов на концах рудного столба 100 мВ; высота рудного столба $H = 50$ м; ширина рудного столба 10 м; среднее сопротивление пород 100 Ом·м; средняя эквивалентная масса 25 г/моль; примерное время протекания процесса $3 \cdot 10^7$ лет.

Область влияния ЕП – область протекания токов в ионопроводящей среде определим из предположения, известного в теории вертикального электрического зондирования, о том, что большая часть токов протекает в области, соответствующей 1/3 величины разности электродов, – в нашем случае для рудного столба $50:3 = 16,7$ м. Объем породы, на который влияет ЕП, по формуле объема цилиндра $V = \pi \cdot 50(16,7)^2 = 43611$ м³. Площадь сечения ионного проводника равна 872 м. Ток, полученный по формуле (3) при подстановке указанных параметров, равен 17,4 мА. По формуле (1) масса переносимого вещества равна 4300 т.

От общей массы того объема, в котором предполагается влияние ЕП, это значение составляет 3,6 %. Поскольку в перемещении преимущественно участвуют простые и комплексные ионы металлов, будем считать, что их доля в породах коры выветривания (за исключением «железной шляпы» и рудных тел) составляет около 5 %. Тогда доля переносимых за это время металлов равна 70 %. Соответственно, изменение времени процесса сказывается на доле переносимых металлов и итоговое содержание мигрировавших компонентов может достигать иных значений. Необходимо отметить, что данный расчет не претендует на точность, однако позволяет приблизительно оценить массу и скорость накопления перенесенных под действием электрических полей элементов. Поставленный вопрос ранее не рассматривался, в связи с чем возможности более надежного определения параметров и экспериментальной проверки результатов пока нет, но они могут появиться со временем при условии развития данного направления исследований.

Заключение. Полученные данные полевых измерений и лабораторных анализов могут помочь в оценке массопереноса под действием электрического поля и вклада электрических явлений в перераспределение химических элементов в горных породах. Доля металлов, перенесенных в ионной форме под действием длительно существующего электрического поля, в условиях высокого перепада потенциала ЕП, оценивается приблизительно как 70 %. В целом, наблюдаемые зависимости позволяют ответить утвердительно на вопрос о возможности влияния естественного электрического поля на вторичную дифференциацию элементов в породах коры выветривания ультраосновных массивов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комаров В.А. Геоэлектрохимия: Учеб. пособие. СПб: Изд-во Санкт-Петербург. гос. ун-та, 1994. 136 с.
2. Нюссик Я.М. Электрохимия в геологии / Я.М.Нюссик, И.Л.Комов. Л.: Наука, 1981. 240 с.
3. Рысс Ю.С. Геоэлектрохимические методы разведки (Введение в геоэлектрохимию). Л.: Недра, 1983. 255 с.
4. Сенчина Н.П. Перераспределение химических элементов под действием естественного электрического поля (на примере Буруктальского месторождения никеля, Южный Урал) // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». 2013. № 2. С. 57-61.
5. Путиков О.Ф. Условия формирования естественного электрического поля (ЕП) на месторождениях силикатного никеля кор выветривания / О.Ф.Путиков, В.Г.Лазаренков, И.В.Таловина, Н.П.Сенчина // Записки Горного института. 2013. Т.200. С.81-86.

REFERENCES

1. Komarov V.A. Geoelektrokhimiya (*Geoelectrochemistry*): Uchebnoe Posobie. St Petersburg: Izd-vo St Petersburg gos. un-ta, 1994. p.136.
2. Nyussik J.M., Komov I.L. Elektrokhimiya v geologii (*Electrochemistry in the geology*). Leningrad: Nauka, 1981. p.240.
3. Ryss Y.S. Geoelektrokhimicheskie metody razvedki (Vvedenie v geoelektrokhimiyu) (*Geoelectrochemical exploration methods (Introduction to geoelectrochemistry)*). Leningrad: Nedra.1983, p.255.
4. Senchina N.P. Pereraspredelenie khimicheskikh elementov pod deistviem estestvennogo elektricheskogo polya (na primere Buruktal'skogo mestorozhdeniya nikelya, Yuzhnyi Ural) (*Redistribution of chemical elements under the influence of natural electric field (on the example of Buruktalsky nickel deposit, Southern Urals)*). Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Seriya «Nauka i obrazovanie». 2013. N 2, p.57-61.
5. Putikov O.F., Lazarenkov V.G., Talovina I.V., Senchina N.P. Usloviya formirovaniya estestvennogo elektricheskogo polya (EP) na mestorozhdeniyakh silikatnogo nikelya kor vyvetrivaniya (*Conditions of natural electric field (EF) formation in deposits of nickel silicate weathering crusts*). Zapiski Gornogo instituta. 2013, Vol.200, p.81-86.

THE ANALYSIS OF CORRELATION RELATIONSHIPS BETWEEN RESULTS OF NATURAL ELECTRIC FIELD AND CHEMICAL ELEMENTS CONTENT MEASUREMENTS (A CASE STUDY OF CENTRAL URALS OBJECTS)

N.P.SENCHINA, *Postgraduate student, n_senchina@inbox.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The article analyses relationships between electrochemical processes in the weathering crust and geochemical fields to estimate the natural electric fields influence on the movement of metal ions in rocks. *In situ* and laboratory tests data can help to evaluate mass transfer under the influence of electric fields and redistribution of chemical elements in rocks due to electrical phenomena. The observed dependences allow confirming the influence of the natural electric field on differentiation of elements in rocks.

Key words: geoelectrochemistry, a natural electrical field method, geochemistry.

3 324 **Записки Горного института** / Национальный минерально-сырьевой университет
«Горный». СПб, 2015. Т.212. 145 с.
ISBN 978-5-94211-728-3

УДК 378.6:55
ББК 74.58я5

«Записки Горного института» по решению Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации от 19 февраля 2010 года № 6/6 включены в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Научное издание

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Том 212

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Редактор *И.В.Неверова*
Редакторы переводов: *Л.С.Воронова, Ю.Е.Мурзо, С.А.Свешникова*
Компьютерная верстка: *В.И.Каширина, Л.П.Хлюпина, Н.Н.Седых*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.02

Заключение экспертизы постоянно действующей технической комиссии
от 10.04.2015. Протокол № 2

Подписано к печати 10.04.2015. Формат 60 × 84/8. Усл.печ.л. 16,9. Усл.кр.-отт. 16,9. Уч.-изд.л. 15.
Тираж 300 экз. Заказ 283. С 106.

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
РИЦ Национального минерально-сырьевого университета «Горный»
Адрес университета и РИЦ: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, 2
lebedev@spmi.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ СТАТЬИ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В «ЗАПИСКАХ ГОРНОГО ИНСТИТУТА»

«Записки Горного института» издаются в соответствии с планом изданий, утвержденным ректором Горного университета, в сроки, регламентированные агентством «Роспечать».

К статье прилагаются: экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати; рецензия специалиста сторонней организации; анкеты авторов (ФИО, место работы, должность, ученая степень, ученое звание, e-mail, почтовый адрес, контактные телефоны) и договор о предоставлении персональных данных. Авторы высылают статьи (распечатки на бумаге, электронные версии, сопроводительные документы) в РИЦ Горного университета (pmi.spmi@mail.ru).

Рукописи рассматриваются редколлегией журнала.

Рукописи, не принятые к печати, авторам не возвращаются.

За публикацию статей плата с авторов не взимается.

Гонорары за опубликованные статьи не выплачиваются.

Объем статьи не должен превышать 0,5 авторского листа.

Состав статьи: УДК, название статьи и данные анкет авторов на русском и английском языках, реферат на русском и английском языках (по 250 знаков), ключевые слова на русском и английском языках, собственно текст, библиографический список на русском и английском языках.

Авторы представляют набор статьи в текстовом редакторе Word приложения Windows (Windows 2000, Windows 2003) через 1,5-2 интервала (А4, набор 16 × 24,5 см).

Основной текст: шрифт – Times New Roman, 12 кегль, обычный, межстрочный интервал – 1,5; абзацный отступ – 0,8 см. Автоматический перенос слов (запрещается делать переносы вручную); выравнивание – по ширине (только автоматически! в данном случае недопустимо использование пробелов, табуляции и т.д.). Клавиша Enter (перевод строки) используется только в конце абзаца! Инициалы от фамилии, наименования от единиц отбиваются жестким пробелом: Ctrl + Shift + пробел.

Таблицы: Times New Roman, 9 кегль, обычный. Информацию в таблицах давать не единым массивом, а построчно, т.е. не набирать все данные в одной строке!!! Не сокращать слова. Размер таблиц должен соответствовать формату набора – не более 16 × 24 см.

Сноска задается автоматически, шрифт – Times New Roman, 9 кегль, обычный.

Формулы. Для набора формул использовать *только редактор Equation 3* (или конвертировать в Equation 3); Times New Roman, 12 кегль обычный, крупный индекс – 7 кегль, мелкий индекс – 6 кегль, крупный символ – 14 кегль, мелкий символ – 12 кегль. Латинские буквы набирают курсивом, обычным; русские, греческие буквы, цифры и химические символы, критерии подобия – прямым, обычным, это правило распространяется и на набор индексов в символах.

Библиографический список (литература) составляется *в алфавитном порядке* в соответствии с ГОСТ 7.1-84 с изменением № 1 от 28.05.99. На всю приведенную литературу должны быть ссылки в квадратных скобках в тексте статьи.

Иллюстрации представляются готовыми для печати в виде компьютерной графики. Редактор, в котором выполнены иллюстрации, должен быть совместим с редактором Word. Размер иллюстраций должен соответствовать формату набора – не более 16 × 24 см. Все рисунки должны иметь подрисуночные подписи.

ПОРЯДОК РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Организация и порядок рецензирования.

Представленная автором рукопись направляется на рецензию членам редколлегии или экспертам – ученым и специалистам в данной области (доктору, кандидату наук).

Рецензенты уведомляются о том, что направленные им рукописи являются частной собственностью авторов и относятся к сведениям, не подлежащим разглашению.

Рецензентам не разрешается снимать копии с поступивших рукописей, передавать рукописи на рецензирование другим лицам без согласования с главным редактором.

Рецензирование проводится конфиденциально. Рецензия носит закрытый характер и предоставляется автору рукописи по его письменному запросу без подписи и указания фамилии, должности, места работы рецензента. Рецензия может быть представлена по соответствующему запросу экспертных советов в ВАК РФ.

При наличии в рецензии указаний на необходимость исправлений рукопись направляется автору на доработку. В этом случае датой поступления в редакцию считается дата возвращения доработанной рукописи.

Решение о целесообразности публикации после рецензирования принимается главным редактором.

Автору рукописи, не принятой к публикации, редколлегия направляет по его запросу мотивированный отказ.

Не подлежат рецензированию:

- статьи членов Российской академии наук;
- статьи, рекомендованные к публикации научными форумами и конференциями.

Рецензентом не может быть автор или соавтор рецензируемой работы.

Не допускаются к публикации рукописи, оформленные с нарушением принятых правил издания.

Оригиналы рецензий хранятся в редколлегии в течение трех лет.

Сроки рецензирования в каждом отдельном случае определяются главным редактором с учетом создания условий для максимально оперативной публикации статей (но не более месяца со дня поступления рукописи).

2. Требования к содержанию рецензии.

Рецензия должна содержать квалифицированный анализ материала рукописи, объективную аргументированную оценку.

В заключительной части рецензии должны содержаться обоснованные выводы о рукописи в целом и четкая рекомендация о целесообразности ее публикации в сборнике.

Рецензент может дать дополнительные рекомендации автору и редакции по улучшению рукописи. Замечания и пожелания рецензента должны быть объективными и принципиальными, направленными на повышение научного и методического уровней рукописи.

В случае отрицательной оценки рукописи рецензент должен обосновывать свои выводы.

3. Взаимодействие авторов и рецензентов.

По письменному запросу автора рецензии высылаются без указания фамилий рецензентов. Если автор желает возразить рецензенту, он может прислать в редколлегию письмо, которое должно быть передано рецензенту в течение двух недель. Рецензент может по своему усмотрению ответить автору лично, передать ответ через редколлегию или не отвечать.

Рукопись, не принятая к печати, авторам не возвращается.

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»
(Горный университет)**

10 апреля 2015 года

ОБЪЯВЛЯЕТ КОНКУРС

на замещение должностей профессорско-преподавательского состава

ПРОФЕССОРА:

кафедры гидрогеологии и инженерной и инженерной геологии (1 ставка, 0.25 ставки);
кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых (0.25 ставки);
кафедры минералогии, кристаллографии и петрографии (0.5 ставки);
кафедры исторической и динамической геологии (0.5 ставки);
кафедры бурения скважин (0.5 ставки);
кафедры машиностроения (1 ставка, 0.5 ставки);
кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики (1 ставка);
кафедры философии (0.5 ставки);
кафедры металлургии (0.25 ставки, 0.25 ставки);
кафедры организации и управления (1 ставка);
кафедры информационных систем и вычислительной техники (1 ставка);
кафедры разработки месторождений полезных ископаемых (3 ставки);
кафедры безопасности производств (1 ставка);
кафедры теплотехники и теплоэнергетики (1 ставка);
кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений (2 ставки);
кафедры маркшейдерского дела (0.5 ставки);
кафедры инженерной геодезии (0.25 ставки)

Квалификационные требования. Высшее профессиональное образование, ученая степень доктора наук и стаж научно-педагогической работы не менее 5 лет или ученое звание профессора.

СТАРШЕГО ПРЕПОДАВАТЕЛЯ

военной кафедры (2 ставки).

Квалификационные требования. Высшее профессиональное образование и стаж научно-педагогической работы не менее 3 лет, при наличии ученой степени кандидата наук стаж научно-педагогической работы не менее 1 года.

ПРЕПОДАВАТЕЛЯ

военной кафедры (1 ставка).

Квалификационные требования. Высшее профессиональное образование и стаж работы в образовательном учреждении не менее 1 года, при наличии послевузовского профессионального образования (аспирантура) или ученой степени кандидата наук – без предъявления требований к стажу работы.

Прием документов для участия в конкурсе осуществляется в Национальном минерально-сырьевом университете по адресу: г.Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, учебно-методическое управление, ауд.5502, тел.328-82-05.

Окончательная дата приема документов для участия в конкурсе 09.06.2015 года.

**Конкурс состоится 19.06.2015 года на Ученом совете университета по адресу:
г.Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2.**

ДОЦЕНТА:

кафедры гидрогеологии и инженерной и инженерной геологии (3 ставки, 0.5 ставки);
кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений
полезных ископаемых (1 ставка);
кафедры минералогии, кристаллографии и петрографии (2 ставки);
кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений
(1 ставка);
кафедры транспорта и хранения нефти и газа (1 ставка);
кафедры горных транспортных машин (2 ставки);
кафедры машиностроения (4 ставки);
кафедры материаловедения и технологии художественных изделий
(2 ставки);
кафедры организации перевозок и безопасности движения (1 ставка);
кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики (7 ставок);
кафедры теплотехники и теплоэнергетики (1 ставка);
кафедры начертательной геометрии и графики (4 ставки);
кафедры высшей математики (4 ставки);
кафедры социологии и психологии (5 ставок);
кафедры философии (3 ставки);
кафедры иностранных языков (5 ставок);
кафедры русского языка и литературы (3 ставки);
кафедры общей и технической физики (4 ставки);
кафедры информатики и компьютерных технологий (4 ставки);
кафедры физического воспитания (1 ставка);
кафедры автоматизации технологических процессов и производств
(1 ставка);
кафедры химических технологий и переработки энергоносителей
(1 ставка);
кафедры общей и физической химии (2 ставки);
кафедры экономики, учета и финансов (15 ставок);
кафедры организации и управления (5 ставок);
кафедры экономической теории (2 ставки);
кафедры информационных систем и вычислительной техники (4 ставки);
кафедры системного анализа и управления (1 ставка);
кафедры разработки месторождений полезных ископаемых (3 ставки);
кафедры геоэкологии (2 ставки);
кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений
(1 ставка);
кафедры механики (3 ставки);
кафедры маркшейдерского дела (1 ставка);
кафедры инженерной геодезии (4 ставки);
Квалификационные требования. Высшее профессиональное образование, ученая
степень кандидата (доктора) наук и стаж научно-педагогической работы не менее 3 лет
или ученое звание доцента (старшего научного сотрудника).

СТАРШЕГО ПРЕПОДАВАТЕЛЯ:

кафедры организации перевозок и безопасности движения (1 ставка);
кафедры иностранных языков (8 ставок);
кафедры физического воспитания (3 ставки);
кафедры автоматизации технологических процессов и производств (1 ставка);

Квалификационные требования. Высшее профессиональное образование и стаж научно-педагогической работы не менее 3 лет, при наличии ученой степени кандидата наук стаж научно-педагогической работы не менее 1 года.

АССИСТЕНТА:

кафедры гидрогеологии и инженерной и инженерной геологии (2 ставки);
кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых (1 ставка);
кафедры минералогии, кристаллографии и петрографии (1 ставка);
кафедры бурения скважин (4 ставки);
кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений (5 ставок);
кафедры транспорта и хранения нефти и газа (3 ставки);
кафедры горных транспортных машин (2 ставки);
кафедры машиностроения (4 ставки);
кафедры материаловедения и технологии художественных изделий (1 ставка);
кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики (3 ставки);
кафедры истории (1 ставка);
кафедры социологии и психологии (1 ставка);
кафедры русского языка и литературы (1 ставка);
кафедры общей и технической физики (2 ставки);
кафедры информатики и компьютерных технологий (1 ставка);
кафедры автоматизации технологических процессов и производств (3 ставки);
кафедры металлургии (3 ставки);
кафедры общей и физической химии (1 ставка);
кафедры экономики, учета и финансов (2 ставки);
кафедры организации и управления (3 ставки);
кафедры экономической теории (1 ставка);
кафедры разработки месторождений полезных ископаемых (4 ставки);
кафедры безопасности производств (2 ставки);
кафедры взрывного дела (1 ставка);
кафедры геоэкологии (1 ставка);
кафедры маркшейдерского дела (3 ставки);
кафедры инженерной геодезии (2 ставки);

Квалификационные требования. Высшее профессиональное образование и стаж работы в образовательном учреждении не менее 1 года, при наличии послевузовского профессионального образования (аспирантура) или ученой степени кандидата наук – без предъявления требований к стажу работы.

ПРЕПОДАВАТЕЛЯ:

кафедры иностранных языков (2 ставки);
кафедры физического воспитания (4 ставки);

Квалификационные требования. Высшее профессиональное образование и стаж работы в образовательном учреждении не менее 1 года, при наличии послевузовского профессионального образования (аспирантура) или ученой степени кандидата наук – без предъявления требований к стажу работы.

Прием документов для участия в конкурсе осуществляется в Национальном минерально-сырьевом университете по адресу: г.Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, учебно-методическое управление, ауд.5502, тел.328-82-05.

Окончательная дата приема документов для участия в конкурсе 31.05.2015 года. Конкурс состоится 11.06.2015 года на советах факультетов по адресу: г.Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2.

Со списком на замещение должностей профессорско-преподавательского состава можно ознакомиться в сети интернет: <http://spmi.ru/node/11290>

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ: Министерства энергетики РФ, Министерства образования и науки РФ, Российской академии наук, Академии горных наук, НП «Горнопромышленники России», Национального минерально-сырьевого университета «Горный»

Международный организационный комитет Конгресса по обогащению угля приглашает горнопромышленников, специалистов угольной отрасли, научных сотрудников, преподавателей вузов, молодых ученых и аспирантов принять участие в конгрессе



XVIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС ПО ОБОГАЩЕНИЮ УГЛЯ

28 июня – 01 июля 2016 года
Санкт-Петербург, Россия

Основные тематические направления Конгресса:

- Сырьевая база угольной промышленности и ее особенности
- Дробление, измельчение, грохочение и классификация
- Гравитационные методы обогащения
- Сухая сепарация
- Флотация
- Обезвоживание, сушка и брикетирование угля
- Технологии глубокой переработки угля
- Обогащение и переработка углеродистых руд
- Исследование, переработка и обогащение угольных шламов, отходов обогащения, добычи и сжигания углей
- Контроль качества, автоматизация и информационные технологии в углеобогащении
- Проектирование углеобогащительных и брикетных фабрик
- Защита окружающей среды



Важные даты:

- Срок представления тезисов докладов – **до 10 мая 2015 года**
- Рецензирование тезисов – **до 28 июня 2015 года**
- Срок представления полного текста доклада – **15 ноября 2015 года**
- Срок оплаты регистрационного взноса для включения доклада в программу и опубликования в трудах Конгресса (при положительном рецензировании) – **не позднее 01 марта 2016 года**

Требования к тезисам докладов:

Тезисы докладов должны представляться на электронный адрес icpc-2016@icpc-2016.com на английском языке и содержать не более 800 слов.

Регистрационный взнос:

Регистрация до 1 марта 2016 года – **700 USD**
Регистрация после 1 марта 2016 года – **800 USD**
Студентам – **100 USD**

(Оплата российскими участниками будет производиться в рублях по курсу ЦБ РФ)



Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»
199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, д.2

E-mail: icpc-2016@icpc-2016.com
www.icpc-2016.com



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ
УНИВЕРСИТЕТ «ГОРНЫЙ»**

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
УНИВЕРСИТЕТА**

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА

ГОРНОЕ ДЕЛО

ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО

**ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

ГЕОЭКОНОМИКА И МЕНЕДЖМЕНТ



Компания «Фосагро»



ОАО «Газпром нефть»



Группа компаний BP



ЗАО «Группа компаний
«Титан»



ОАО «НОВАТЭК»



ОАО «Сургутнефтегаз»



ООО «Металл-груп»



ЗАО «Русская медная
компания»

