

«Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» –
филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики
им. Ю. П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Единая геофизическая служба Российской академии наук»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Уральский государственный горный университет»

Пермское отделение ЕАГО

**ДВАДЦАТЬ
ШЕСТАЯ
УРАЛЬСКАЯ МОЛОДЕЖНАЯ
НАУЧНАЯ ШКОЛА
ПО ГЕОФИЗИКЕ**

Сборник научных материалов

Пермь 2025

УДК 550.3
ББК 26.324
Ш 5614

**Двадцать шестая уральская молодежная научная школа по геофизике:
Сборник науч. материалов.** – Пермь: ГИ УрО РАН, 2025. 210 с.

Сборник содержит материалы, представленные на Двадцать Шестой Уральской молодежной научной школе по геофизике, состоявшейся в Перми 17-21 марта 2025 г. Рассматривается широкий круг вопросов современной геофизики – от новых научно-практических разработок в области физики твердой Земли до совершенствования технологий применения геофизических методов при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых.

Издание представляет интерес для специалистов научных и производственных организаций, занимающихся геофизическими исследованиями природных и природно-техногенных объектов.

Главный редактор

член-корреспондент РАН А.А. Маловичко (ФИЦ ЕГС РАН)

Ответственный редактор

кандидат физико-математических наук Р.А. Дягилев (ФИЦ ЕГС РАН)

Редакционная коллегия: профессор, д.т.н. В.И. Костицын (ПГНИУ), профессор, д.т.н. А.С. Долгаль («ГИ УрО РАН»)

Рецензенты: к.г.-м.н. И.А. Козлова (ИГ УрО РАН), к.т.н. Д.Ю. Шулаков («ГИ УрО РАН»)

978-5-903258-51-2



© «ГИ УрО РАН», 2025

УДК 550.347

РАЗЛОМНО-БЛОКОВАЯ СТРУКТУРА И СЕЙСМИЧНОСТЬ АРМЕНИИ

*Оганесян Амаяк Оганесович, Авдалян Арман Грачевич
ИГИС НАН РА, г. Гюмри, Республика Армения*

Аннотация. В статье проведен анализ сейсмической активности территории в контексте ее блокового строения. Именно по разломным ограничениям указанных блоков сосредоточена основная сейсмичность региона и, соответственно, при оценке сейсмической опасности в качестве площадных источников должны быть выбраны эти блоки. Сопоставление эпицентров землетрясений из разных групп со структурно-динамической моделью, показывает, что эпицентры располагаются в пределах конкретного обособленного блока земной коры.

Ключевые слова: очаг, разлом, блоковая структура, сейсмичность, землетрясение.

В настоящее время можно считать установленным, что области современного горообразования имеют блоковое строение. При этом они подразделяются на области с крупноблочным и мелкоблочным строением. В крупных блоках под воздействием тектонических сил накапливается большая сумма напряжений, которые затем могут разрядиться на глубинных разломах, разделяющих блоки. В малых блоках накапливается меньшая сумма касательных напряжений и соответственно следует ожидать меньшую энергию упругой отдачи. На территории Армении активными являются разломы северо-восточного, северо-западного и, отчасти меридионального простирания, причем сейсмогенерирующими могут быть лишь диагональные разломы. По региональным разломам Армении возможны подвижки одновременно как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях, причем, амплитуда вертикальных движений больше горизонтальных. Среди активных региональных разломов преобладают взбросо-сдвиги. Выделив вероятные активные разломы, можно определить сейсмогенерирующие зоны с учетом фрагментарности, сейсмичности и других важных характеристик разломов [1].

Совокупный анализ геофизических, геологических, сейсмологических и других материалов позволил выявить особенности глубинного строения литосферы территории Армении, составить ее структурно-динамическую модель, состоящую из комплекса схем разломно-бокового строения земной коры на трех уровнях глубин: по поверхности кристаллического фундамента (до 5 км); по подошве сейсмоактивного слоя в земной коре (до 20 км); по границе Мохоровича (до 45 км) (рис. 1). Выявлено гетерогенное строение верхней части земной коры этой территории, выражающееся в том, что системами разломов различных простирания и глубин заложения она расчленяется на блоки различного порядка. Установлено уменьшение количества и увеличение размеров блоков по глубине. На рисунке 1 выделены системы разрывных нарушений с подразделением их на категории по размерам и глубине проникновения в земную кору [2].

К первой категории были отнесены разломы, разграничивающие крупные тектонические блоки и имеющие глубину проникновения до 50 км и более (мантийные). Ко второй категории отнесены разломы глубиной 15-25 км, разграничивающие тектонические блоки более низких порядков и проникающие до подошвы сейсмоактивного слоя. Эти разломы подразделены на два подтипа – активные и неактивные.

Вторая модель верхней части земной коры, заключенной между фундаментом и подошвой сейсмоактивного слоя на глубине 13-30 км, также представляется в виде

системы блоков, границами которых служат разломы, некоторые из которых имеют большую глубину проникновения в земную кору. По сравнению с моделью кристаллического фундамента здесь размеры блоков более крупные, а, следовательно, количество разломов меньше. Указанный слой на территории Армении состоит из восьми относительно приподнятых и опущенных блоков общекавказского простираия. В зонах сочленения этих блоков в основном расположены очаги сильных землетрясений, происходящих на территории Армении, что и является основным критерием при выделении и картировании сейсмогенных зон.

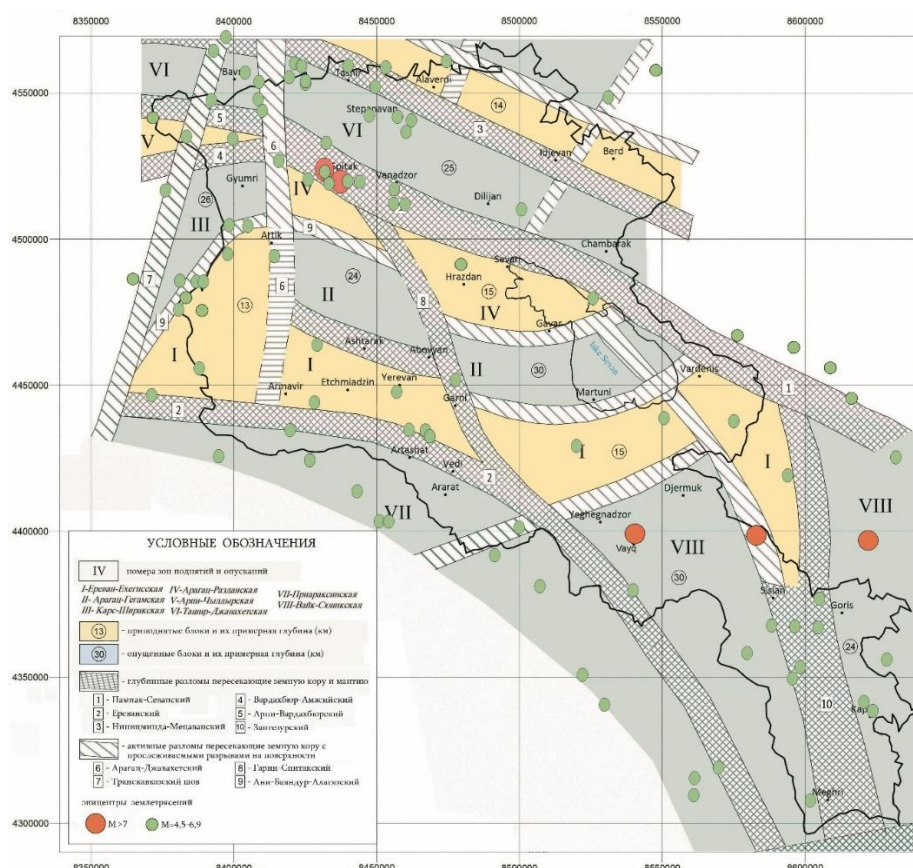


Рис. 1. Структурно-динамическая модель сейсмоактивного слоя территории Армении

Наиболее крупными структурами исследуемого района, выделенными на глубинах 15-20 км, являются Среднеараксинский и Центральный мегаблоки. На более высоких уровнях земной коры, и в особенности, по поверхности гетерогенного фундамента осадочного чехла, выявлено весьма сложное мозаично-блоковое строение. О мозаично-мелкоблоковой структуре Кавказского региона и Армении, в частности, свидетельствуют также многочисленные работы различных исследователей этого региона.

Граница между Среднеараксинским и Центральным мегаблоками проходит по зоне Ереванского глубинного разлома шириной 15-20 км, ограниченного с северо-востока и юго-запада Аштарак-Воротанским и Эчмиадзин-Шахбузским парными региональными разломами.

Севанский разлом на западе, за пределами Армении, прослеживается через Ардаганское вулканическое плато в восточную часть Понтида и сочленяется с Северо-Анатолийским разломом (Северный офиолитовый пояс Анатолии).

На Базумском хребте, расположенном на северо-западном продолжении Севанского офиолитового пояса, отчетливо выделяются два параллельных разлома: северный из них прослеживается по линии г. Арчасар – с. Катнахпюр – Кечутский хребет, а южный

проходит по линии Пушкинский перевал – рр. Желтая и Черная – районный центр Амасия.

Второй разлом глубокого заложения протягивается почти параллельно Севанскому, по линии, соединяющей два рудоносных района Армении, Анкаванский и Южно-Сюникский-Анкаван-Сюникский разлом. В Сюнике глубинное и длительное развитие этого разлома доказывается всеми геологическими, а также геофизическими данными и не вызывает сомнения. Он служит структурной границей двух различно построенных тектонических сегментов – Кафанского и Сюникского антиклинориев, резко отличающихся историей геотектонического развития. Важным критерием, доказывающим глубинный характер этого разлома, является мощное развитие магматизма как в интрузивной, так и эффузивной фациях и эндогенная минерализация. Вдоль этого разлома расположен крупнейший в Закавказье Мегринский плутон, его апофизы и связанные с ними медно-молибденовые месторождения Агарака, Айгедзора, Каджарана и Дастакерта.

Система выделенных разломов в верхней части земной коры, на основе оценки глубины их заложения, разделена на две группы. Разломы в осадочном чехле 0-5 км и достигающие глубин порядка 15 и более километров.

Основными критериями, контролирующими сейсмичность территории Армении являются: степень тектонической раздробленности земной коры, активизировавшиеся в неоген-четвертичное время разрывные нарушения Кавказского и Антикавказского простирания, а также границы мегаблоков, наличие плотностной и скоростной субгоризонтальной границы на средней глубине 2 км и др. Указанные критерии позволяют из общей тектонической структуры Армении выделять те участки (сейсмогенные зоны), где локализуются очаги сильных землетрясений, максимальная магнитуда которых зависит от размеров и особенностей строения и динамики этих участков [3, 4].

Земная кора в территории Армении сейсмически активна от поверхности до тридцатикилометровых глубин. При этом наибольшее число очагов сосредоточено в слое 5-20 км, т.е. внутри коры очаги располагаются не диффузно, а приурочены к определенному слою земной коры.

Не все разломы характеризуются одинаковой сейсмичностью, часть из них более сейсмоактивна, чем другая. В общем плане наиболее сейсмоактивными являются общекавказские разломы и два разлома северо-восточного простирания (Ахурянский и Арабат-Севанский). Из группы сейсмоактивных разломов по сейсмостатическим данным особенно высокоактивными являются Памбак-Севанский, Памбак-Севан-Сюникский, Гарнийский и Ахурянский.

Рассмотрение эпицентрального поля сильных землетрясений Армении и сопредельных районов показывает, что большинство эпицентров как бы сгруппированы в отдельные более или менее обособленные сейсмоактивные районы. При сопоставлении эпицентрального поля со структурно-динамической моделью отчетливо выделяются четыре отдельные группы их скопления – Гюмри-Анийская, Спитак-Разданская, Приереванская и Сюникская, которые в структурном плане выделяются в виде отдельных блоков земной коры, несущих ответственность за подготовку и реализацию этих землетрясений [5].

В Гюмри-Анийскую группу входят несколько известных разрушительных землетрясений с $M=5.5-6.5$, такие как землетрясения 1022, 1046, 1319, 1935 гг. и другие, неоднократно опустошившие древнюю столицу Армении – город Ани. Одним из крупных событий этой группы является также Ленинаканское землетрясение 1926 года с $M=5.5-5.9$. Объем сейсмоактивного блока, определенного произведением площади блока и глубиной подошвы сейсмоактивного слоя, составляет 66000 км^3 .

Спитак-Дилижанская группа очагов, по сравнению с предыдущей группой отличается более мощными событиями. В эту группу входит эпицентр разрушительного

Спитакского землетрясения 1988 года с магнитудой $M \geq 7.1$. В регионе зафиксированы также эпицентры десятки других землетрясений с $4.5 \leq M \leq 5.5$, в число которых входят эпицентры двух известных Цахкадзорского землетрясения 1827 года с $M \geq 5.0$ и Спитакского землетрясения 1967 года с $M \geq 5.0$. Объем сейсмоактивного Спитак-Дилижанского блока составляет 84500 км^3 .

В группу эпицентров Приереванского района входят эпицентры пяти Двинских землетрясений с $M=4.5-5.4$ (851, 858, 863, 869, 893 гг.), Аручское землетрясение 972 г. с $M=5.0$, Гарнийского землетрясения 1679 г. с $M=6.5$, а также эпицентры землетрясений Октемберянского, 1916 г. с $M=4.9$ и Ереванского, 1937 г. с $M=4.6$. Объем Приереванского блока составляет 27600 км^3 .

В Сюникскую группу очагов входят около двух десятков землетрясений с $M > 4.5$. Более того здесь в исторический период произошли несколько землетрясений с $M > 6$, к числу которых относятся Татевское 1308 г., Воротанское 1406 г., Зангезурское 1931 г. и др. Объем Сюникского сейсмоактивного блока составляет 156300 км^3 [1].

Таким образом из вышеизложенного стало очевидным, что эпицентры сильных землетрясений (с $M \geq 4.5$) по территории Армении распределены неравномерно. Отчетливо выделяются четыре отдельные группы их скопления в районах, выраженных, в тектоническом отношении, в виде отдельных блоков земной коры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаретян С.Н., Дургарян Р.Р., Шахбекян Т.А., Григорян А.Г., Мирзоян Л.Б. Региональные разломы территории Армении по геофизическим данным и их сейсмичность. Изд. "Гитутюн" НАН РА, Ереван, 2015. 186 с.
2. Оганесян С.М., Оганесян А.О., Гаспарян Г.С., Фиданян Ф.М. Структурно-динамическая характеристика земной коры территории Армении по комплексу геофизических данных. Изв. НАН РА, Науки о Земле, LVIII, №3, 2005. С. 46-53.
3. Аветисян А.М., Гаспарян Г.С., Оганесян А.О., Саргсян Р.С. Структура земной коры Армении и распределение очагов землетрясений по глубине. Гюмри: Изд. ШГУ. Ученые записки, 2015. С. 85–94.
4. Асланян А.Т., Вегуни А.Т., Милай Т.А. и др. Строение, напряженно-деформированное состояние и условия сейсмичности литосферы Малого Кавказа. Изд. «Мецниереба», Тбилиси, 1983. С. 120.
5. Акопян С.Ц., Джагинян Г.М. Механизмы очагов сильных землетрясений и динамика плито-блоковой структуры Тавро-Кавказского региона. Изд. АН Армении, Науки о Земле, XIV, №2, 1992. С. 48-55.

FAULT-BLOCK STRUCTURE OF ARMENIA AND SEISMICITY

*Hovhannisyan Hmayak, Avdalyan Arman
IGES NAS RA, Gyumri, Armenia*

Summary. The article analyzes the seismic activity of the territory in the context of its block structure. It is along the fault boundaries of these blocks that the main seismicity of the region is concentrated and, accordingly, when assessing seismic hazard, these blocks should be selected as area sources. A comparison of earthquake epicenters from different groups with a structural-dynamic model shows that the epicenters are located within a specific isolated block of the earth's crust.

Key words: source, fault, block structure, seismicity, earthquake.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оганесян Амаяк Оганесович

hmayak.hovhannisyan@bk.ru

ИГИС НАН РА, г. Гюмри, Республика Армения, к.г.-м.н.

Авдалян Арман Грачевич

arman.avdalyan.1981@mail.ru

ИГИС НАН РА, г. Гюмри, Республика Армения, м.н.с.

УДК 550.34

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ КАРКИДОНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

*Анварова Садокат Гайратовна**Институт сейсмологии АН РУз, г. Ташкент, Республика Узбекистан*

Аннотация. В работе выявлены сейсмические процессы в зоне воздействия Каркидонского водохранилища в Узбекистане методом кластеризации по зонам разломов. Количественная оценка повторяемости землетрясений в зоне влияния Каркидонского водохранилища произведена кластеризация распределения землетрясений в ближней зоне водохранилища. Анализируя по кластерам, выделенных в зоне влияния Каркидонского водохранилища показано, что у сейсмичности есть периоды сейсмической активизации, пик сейсмической активизации, период спада сейсмической активизации и период сейсмического затишья с определенной задержкой в каждом годовом цикле эксплуатации. Определяя значения коэффициентов закона Гуттенберга-Рихтера отмечено, что повторяемость землетрясений в вышеотмеченных подзонах может имеет фрактальную размерность.

Ключевые слова: сейсмичность, кластер, зона, разлом, резервуар, землетрясения.

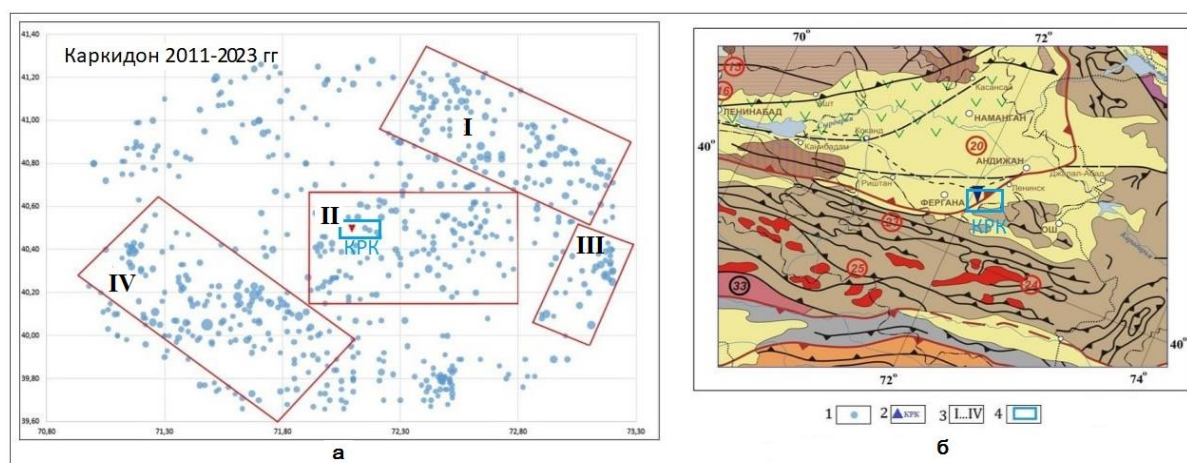
Решение вопросов обеспечения сейсмической безопасности зон деформационного влияния водохранилищ, в последнее десятилетие становятся все более значимыми при анализе техногенных катастроф. Они обусловлены в основном не глубинными геодинамическими процессами и локального напряженно-деформированного состояния, меняющегося при эксплуатации водохранилищ. Они происходят как вне зависимости от деятельности человека, так и в зависимости от уровней антропогенных воздействий. Обычно в центре внимания сейсмологов оказываются сильные землетрясения, но в рамках изучения техногенной сейсмичности большой интерес представляет и изучение слабого землетрясения. В отличие от сильных землетрясений, слабые землетрясения случаются часто, а сильные землетрясения дают довольно обширную информацию о тектонических процессах, происходящих в очаговых зонах [1].

Следовательно, возможность выявления слабых сейсмических процессов в тектонических разломах земной коры в зонах воздействия водохранилищ и изучения особенностей ее проявления необходима при изучении сейсмичности, вызываемой водохранилищами [2]. Как отмечено Pr.Talwani, в большинстве случаев сейсмичности, связанной с водохранилищем, сейсмичность является результатом наводнения, значительного изменения уровня водохранилища или более позднего заполнения водохранилища выше самого высокого уровня воды, достигнутого в то время [2]. Это классифицируется как первичная сейсмичность. Эта «первичная сейсмичность» объясняется совместной реакцией водохранилища на первоначальное заполнение или изменение уровня воды. Для него характерно повышение сейсмичности выше уровня, предшествовавшего наводнению, крупным событиям или общей стабильности, как отсутствие сейсмичности в зоне действия водохранилища. Он также может характеризоваться широко распространенной сейсмичностью, которая перемещает наружу в одном или нескольких направлениях окружающих разломов. Со временем количество и сила землетрясений уменьшаются, а сейсмичность возвращается к фоновому уровню до затопления водохранилища.

Двумерный (аналогично Е.А. Roeloffs [3]), предварительные результаты расчетов показывают, что эта “протяженная техногенная сейсмичность” зависит от частоты и амплитуды изменений уровня озера, размера водохранилища и характеристик фундамента [3]. Изменения антропогенной силы указывают на задержки по сравнению с изменениями размера озера. Долгосрочные изменения объема воды (1 год) с большей вероятностью вызовут более глубокие и сильные землетрясения, чем краткосрочные изменения объема воды [1,2]. Индуцированная сейсмичность наблюдается как в разломах под самой глубокой частью водоема, так и в прилегающих к нему районах. Она проявляется как дополнительная сейсмичность по сравнению с сейсмичностью, существовавшей за пределами фона или до работы объекта. Расположение сейсмичности определяется характером разломов земли под водоемом и вблизи него.

Каркидонское водохранилище находится в Ферганской области [4]. Источник воды река Исфарамсай. Водохранилище было введено в эксплуатацию в 1967 году. Общий объем 218.4 млн. м³. Длина водохранилища составляет 5 км, а ширина 5.5 км. Земляная плотина имеет высоту 70.3 метра и длину 420 метров. Зона Каркидонского водохранилища сейсмически активна. Территориальная сеть сейсмических станций, работавших в непосредственной зоне Каркидонского водохранилища в период нашего исследования, не всегда позволяла получить исчерпывающую информацию о слабых местных землетрясениях [1,5]. Поэтому в качестве информационной основы при составлении локального каталога землетрясений вблизи Каркидонского водохранилища мы использовали ресурсы, представленные в [6, табл.1].

Чтобы детально проанализировать взаимосвязь между фоновыми и вне фоновыми сейсмическими процессами как двумя переменными, мы сначала построили пространственно-временное распределение землетрясения в зоне водохранилища. Пространственно-временное распределение скоплений по зоне влияния Каркидонского водохранилища показано на рисунке 1а.



Условные обозначения (а): 1 - эпицентры землетрясений с $K \geq 7$ в период 2011-2023 гг.; 2 - расположение водоема; 3 - скопления, выявленные методом ближайших соседей [6]; 4 - изолированные скопления; (б): 5 - швы; 6 - сдвиги 7 - смещения; 8 - крупные разломы; 9 - гранитоиды; 10 - границы между конструктивными элементами

Рис.1. Пространственно-временное распределение землетрясений по кластерам в зоне Каркидонского водохранилища (а) и сравнение со структурами (б) в разрезе карты “Тектоническая карта Узбекистана и прилегающих территорий” [1,9]

Метод кластеризации использовался, как в [5] (метод F.Valdxauser, V.L. Elsvort [7]). Для дальнейшего анализа характеристик землетрясений, как и в случае с [6], для проведения кластерного анализа использовался метод ближайших соседей [8].

Источники землетрясения после кластеризации делятся на количество эпицентров уплотнения и сжатия в кластерах с учетом их неравномерного распределения по времени. По сравнению с тектоническими структурами мы использовали фрагменты тектонической карты Узбекистана и прилегающих территорий, разработанные Лабораторией Неотектоники и геодинамики Института геологии РАН (вырезка на рис. 1б) [9]. Эмпирические формулы повторяемости землетрясений в выделенных кластерах и в пределах активных структур в зоне Каркидонского водохранилища показано в таблице 1.

Таблица 1.

Эмпирические формулы повторяемости землетрясений в выделенных кластерах

№	Кластеры	Эмпирические формулы	Достоверность аппроксимации
Каркидон			
1	I кластер	$\lg N = -1.2598M + 5.8966$	$R^2 = 0.9152$
2	II кластер	$\lg N = -1.5185M + 6.5492$	$R^2 = 1.0000$
3	III кластер	$\lg N = -0.5891M + 3.0117$	$R^2 = 0.9400$
4	IV кластер	$\lg N = -0.7269M + 4.0476$	$R^2 = 0.9064$

Повторяемость землетрясений по закону Гуттенберга-Рихтера, в пределах кластеров Каркидонского водохранилища Восточного Узбекистана в рисунке 2 по кластерам.

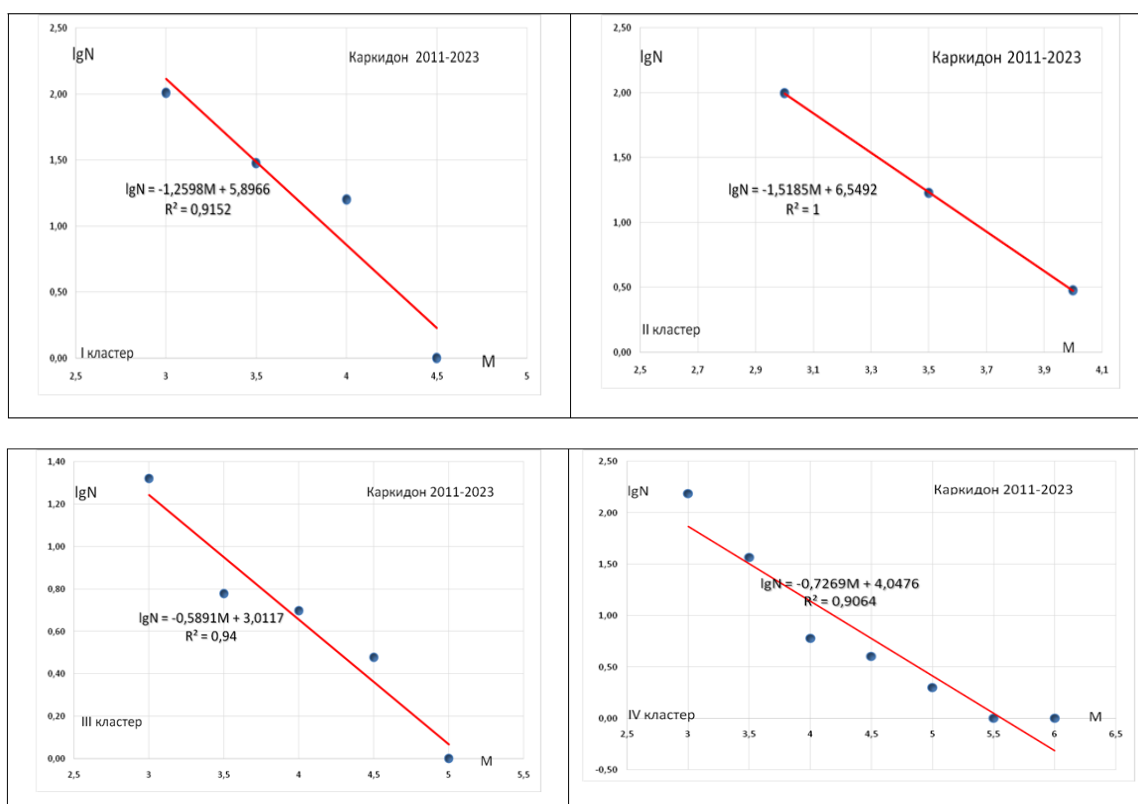


Рис. 2. Повторяемость землетрясений по закону Гуттенберга-Рихтера, в пределах кластеров Каркидонского водохранилища

Различие количества землетрясений N (по каждому году) с $K \geq 8$ в зонах влияния Каркидонского водохранилища Восточного Узбекистана за период наблюдений 2011-2023гг по годам сохраняется.

Анализ по кластерам, выделенных в зоне влияния Каркидонского водохранилища показали, что у сейсмичности есть периоды сейсмической активизации, пик сейсмической активизации, период спада сейсмической активизации и период сейсмического затишья с определенной задержкой в каждом годовом цикле эксплуатации. Соответственно, по значениям коэффициентов закона Гуттенберга-Рихтера можно отметить, что повторяемость землетрясений в вышеотмеченных подзонах может имеет фрактальную размерность. Распределение землетрясений за исследуемый период по каждому объекту показывает возможную плотность очагов ближе к зонам активных тектонических структур (рис. 16).

Исследования поддержаны финансированием гранта No.AL-582205639 «Агентства по инновационному развитию» Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xamidov L.A., Raimjonova N.A. Karkidon suv omborining ta'sir hududida seysmik jarayonlarning klasterlanishi (y36.) // Respublika ilmiy anjumani materiallari //prof. X.D.Ishbayev tahriri ostida. Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti. Toshkent: O'zMU, 2024. С.99-102.
2. Pradeep Talwani (Talwani P.) On the Nature of Reservoir-induced Seismicity // Pure and applied geophysics, Burkhouse Vergal, Basel, 150 (1997) P. 473–492.
3. Roeloffs E. A. Fault Stability Changes Induced Beneath a Reservoir with Cyclic Variations in Water Level. J. Geophys. Res. 93, 1988. P. 2107–2124.
4. Интернет-ресурс Министерства водного хозяйства Республики Узбекистан. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cawater-info.net/bk/1-1-1-1-3-uz.htm> (дата обращения 17.01.2025 года)
5. Анварова С.Г., Ганиева Б.Р., Артиков Ф.Р. Локальный каталог землетрясений ближней зоны крупных водохранилищ Центрального и Южного Узбекистана // Тр. XXIV Уральской молодежной научной школы по геофизике. Пермь, Россия. 2023. С. 3-7.
6. Хамидов Л.А., Ганиева Б.Р., Анварова С.Г., Бахриддинова Д.Х. Кластеризация распределения землетрясений в зонах влияния низконапорных водохранилищ Узбекистана // J. Seismologiya muammolari. Toshkent. SI. №2.tom 6. 2023. С. 51-60.
7. Waldhauser F., Ellsworth W.L., A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault // California, Bull. Seism. Soc. Am. 90 (6) (2000) P. 1353-1368.
8. Han J.W., Micheline K., Pei J. Cluster analysis Data Mining, (Third ed.) // 2012. P. 443-495.
9. Тектоническая карта Узбекистана и прилегающих территорий. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://neotec.ginras.ru/neomaps/M025_Uzbekistan_2004_Tectonics_Tektonicheskaya-karta-uzbekistana-i-prilegayuschikh-territoriy.html (дата обращения 29.01.2025)

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF EARTHQUAKE RECURRENCE IN THE ZONE OF INFLUENCE OF THE KARKIDON RESERVOIR

*Anvarova Sadokat Gayratovna,
Institute of Seismology of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent, Uzbekistan*

Summary. The work revealed seismic processes in the impact zone of the Karkidon reservoir in Uzbekistan by clustering by fault zones. A quantitative assessment of the recurrence of earthquakes in the zone of influence of the Karkidon reservoir was carried out by clustering the distribution of earthquakes in the near zone of the reservoir. Analyzing the clusters identified in the zone of influence of the Karkidon reservoir, it is shown that seismicity has periods of seismic activation, peak seismic activation, a period of decline in seismic activation and a period of seismic lull with a certain delay in each annual operation cycle. Determining the value of the coefficients of the Gutenberg-Richter law, it is noted that the recurrence of earthquakes in the above-mentioned subzones may have a fractal dimension.

Key words: seismicity, cluster, zone, fault, reservoir, earthquakes.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Анварова Садокат Гайратовна

sadokat.anvarova@mail.ru

Институт сейсмологии АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан, м.н.с., докторант (PhD)

УДК 550.8.024; 550.8.052

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ТОННЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЙ СПЕКТРА СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

*Андреанов Семён Валерьевич, Мингалева Татьяна Андреевна
АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург*

Аннотация. В статье рассматривается применение спектральных методов анализа собственных колебаний для контроля состояния тоннельных конструкций метрополитена. Исследование основано на измерении микросейсмических сигналов в диапазоне частот от 2 до 15 Гц. Проведен комплексный анализ совместно с данными геодезического мониторинга участков тоннеля, что позволило выявить зависимость между динамическими характеристиками конструкции и её физическим состоянием. Разработанная методика показала высокую чувствительность к дефектам обделки и изменению свойств окружающих грунтов. Результаты исследования имеют практическое значение для обеспечения безопасной эксплуатации тоннельных сооружений.

Ключевые слова: тоннель, метрополитен, частотный спектр, собственные частоты, мониторинг.

Длительная эксплуатация тоннельных сооружений, как на территории России, так и в мировой практике, приводит к неизбежному износу конструктивных элементов. В процессе эксплуатации тоннели подвергаются различным деградационным процессам, таким как коррозия металлических элементов, деформация бетонных конструкций, трещинообразование, образование внутренних пустот и протечек, вызванных как первичными дефектами строительства, так и последующими воздействиями окружающей среды [1].

Для обеспечения безопасной и надежной эксплуатации тоннельных сооружений необходима регулярная диагностика их технического состояния. Одним из перспективных методов неразрушающего контроля является вибрационный мониторинг, включающий анализ собственных частот колебаний конструкции. Метод измерения микросейсмических колебаний позволяет определить частотный состав собственных колебаний тоннельных конструкций, который является ключевым параметром для оценки их механической целостности [3, 4].

Собственные частоты колебания конструкций напрямую зависят от их массоинерционных характеристик, жесткости и геометрических параметров. Любые изменения в состоянии конструкции, такие как развитие трещин, процессы коррозии или ослабление соединений, неизбежно приводят к изменению её динамических свойств, что может быть выявлено путем сравнительного анализа результатов вибрационного контроля.

В рамках настоящего исследования проведено измерение собственных частот колебания перегонного тоннеля метрополитена с последующей качественной интерпретацией полученных данных. Тоннель проходит через грунты, характеризующиеся преобладанием обводненных песчаных грунтов с включениями линз суглинков, что существенно влияет на динамику его состояния. Выбран участок тоннеля почти километровой длины с различными типами конструкции обделки (сборная ж\б, чугунная без усиления и чугунная, усиленная бетоном и внутренней металлоизоляцией). В целях комплексной оценки технического состояния тоннеля проведен анализ данных геодезического мониторинга вертикальных осадок, охватывающий период 4 года.

Максимальное изменение осадок для исследуемого участка тоннеля наблюдаются на участках ПК 220-270 и достигают практически -70 мм. На краях участка наблюдается стабилизация изменения осадок, значения колеблются около 0 мм. На участке ПК 70 – ПК 520 можно выделить 5 локальных минимумов: в районе ПК 135 с значениями -52 мм, ПК 260 с значениями -68 мм, ПК 340, 460 и 520 с значениями до -35 мм. Анализ графика вертикальных смещений на довольно коротком участке тоннеля в интервале между ПК 695 – ПК 810 показывает наличие осцилляций, характеризующихся переходами от положительных значений (до +23 мм) к отрицательным значениям (до -30 мм), что свидетельствует о неравномерных деформациях конструкции тоннеля (рис. 1).

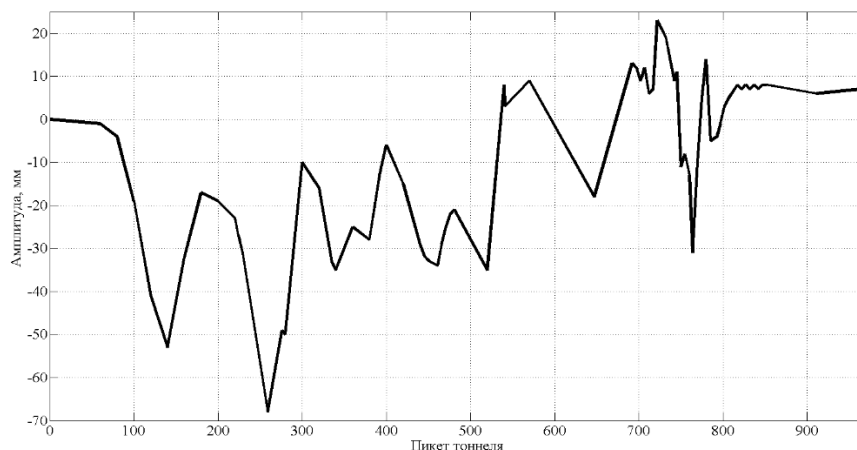


Рис. 1. Разность отклонения деформационных и путейских реперов на исследуемом участке за 4 года

Для проведения измерений в рамках вибрационного мониторинга использовалась трехкомпонентная сейсмостанция «Апатит-В» фирмы ООО «Дизайн системы», г. Обнинск, установленная на поверхность путевого бетона, позволяющая зарегистрировать колебания в трех ортогональных направлениях: N – вдоль тоннеля, E – поперек тоннеля и Z – вертикальная компонента (рис. 2).



Рис. 2. Проведение измерений на одном из участков тоннеля метрополитена

Измерения проводились в ночные «окна» с шагом 20 м вдоль трассы тоннеля действующего метрополитена. В каждом пункте измерения проводились по 5-10 минут, что обеспечивало необходимую выборку данных с наиболее «тихими» интервалами времени (фоновые колебания). Регистрацию колебаний осуществлялась в частотном диапазоне от 0.1 до 125 Гц. Проводимые наблюдения позволили обеспечивать возможность изучения амплитудно-частотных характеристик колебаний. Таким образом, на представленный 1-км участок тоннеля было выполнено около 50 измерений.

Для анализа полученных микросейсмических записей применялся метод спектральной оценки Бартлетта [2], который предполагает разбиение временного ряда на равные по продолжительности части. В ходе обработки непрерывные записи длиной 10 минут разделялись на сегменты продолжительностью 20 секунд, при этом использовались только участки сигналов, не подверженные влиянию техногенных помех, характерных для тоннелей неглубокого заложения. Данная методика позволила достичь 3-4-кратного снижения дисперсии спектральных амплитуд при условии 50% зашумленности исходных данных. Данная спектральная обработка реализована в программном продукте обработки микросейсмических колебаний «MicroReg» [Дягилев Р.А., Лаборатория ПТС, ГИ УрО РАН].

На основе проведенных измерений для каждого пункта наблюдения с шагом по трассе тоннеля 20 метров были рассчитаны спектры колебаний конструкций. Наиболее информативными оказались результаты в диапазоне частот от 2 до 15 Гц, что соответствует области собственных частот колебаний тоннельных конструкций. Выявленные аномалии в гармониках спектра интерпретируются как индикаторы дефектов как самой обделки, так и вмещающего грунтового массива. Спектральный анализ проводился для каждой ортогональной компоненты.

Для визуализации результатов и удобства дальнейшей интерпретации были созданы «тепловые» карты распределения низкочастотных колебаний по исследуемому участку тоннеля (рис. 3). Эти карты позволяют эффективно выявлять пространственные особенности динамического состояния конструкции. Приведены результаты по одной из горизонтальных компонент и по вертикальной составляющей.

Результаты комплексного анализа собственных колебаний по тоннелю представлены на рисунке 3: в верхней части показаны микросейсмические колебания участков тоннеля по горизонтальной компоненте Е (поперек тоннеля), в нижней части приведены результаты по вертикальной компоненте. Для всех ортогональных направлений по вертикальной оси ординат приведены значений частот от 2 до 15 Гц, по горизонтальной оси – условный пикетаж (расстояние вдоль тоннеля в метрах). Цветовой гаммой приведены значения спектральной плотности полученных виброскоростей в условном логарифмическом масштабе. Дополнительно в пределах рисунка проведено описание типов обделки.

В районе рассматриваемого перегона тоннеля наблюдается следующая динамика изменения вертикальных осадок: в интервале между 100 – 670 м от начала измеряемого участка в тоннеле геодезическим мониторингом фиксируются максимальные осадки участков горных выработок, амплитуда осадок неравномерна, в рамках выделенного участка отмечается до 5-6 локальных минимумов.

Схожая картина наблюдается на картах распределения микросейсмических колебаний участков подземной выработки. Заметно изменение поведения колебаний конструкций в местах с различными видами обделок, в частности от 2 до 5 Гц: наблюдается различный частотный состав колебаний, различная интенсивность колебаний. Горизонтальными линиями с различными величинами амплитуд колебаний выделяются собственные частоты: на уровне ≈ 5.7 Гц и на уровне ≈ 12.4 Гц. Для выявления дефектов конструкций необходимо обращать внимание на изменение интенсивности колебаний в

рамках одной строительной конструкции (одним видом отделки тоннеля), anomальное поведение колебаний: такое как появление дополнительных гармоник (разложение одной частоты на несколько), повышение амплитуды на «линиях» собственных частот или вовсе так называемый дребезг по всему диапазону приведенного участка спектра.

Примеры максимального проявления последнего критерия оценки показаны на изображениях в районе пикетов тоннеля 650 м, 710 м, 750 м и 790 м. Данный участок по значениям осадок испытывает знакопеременные осадки.

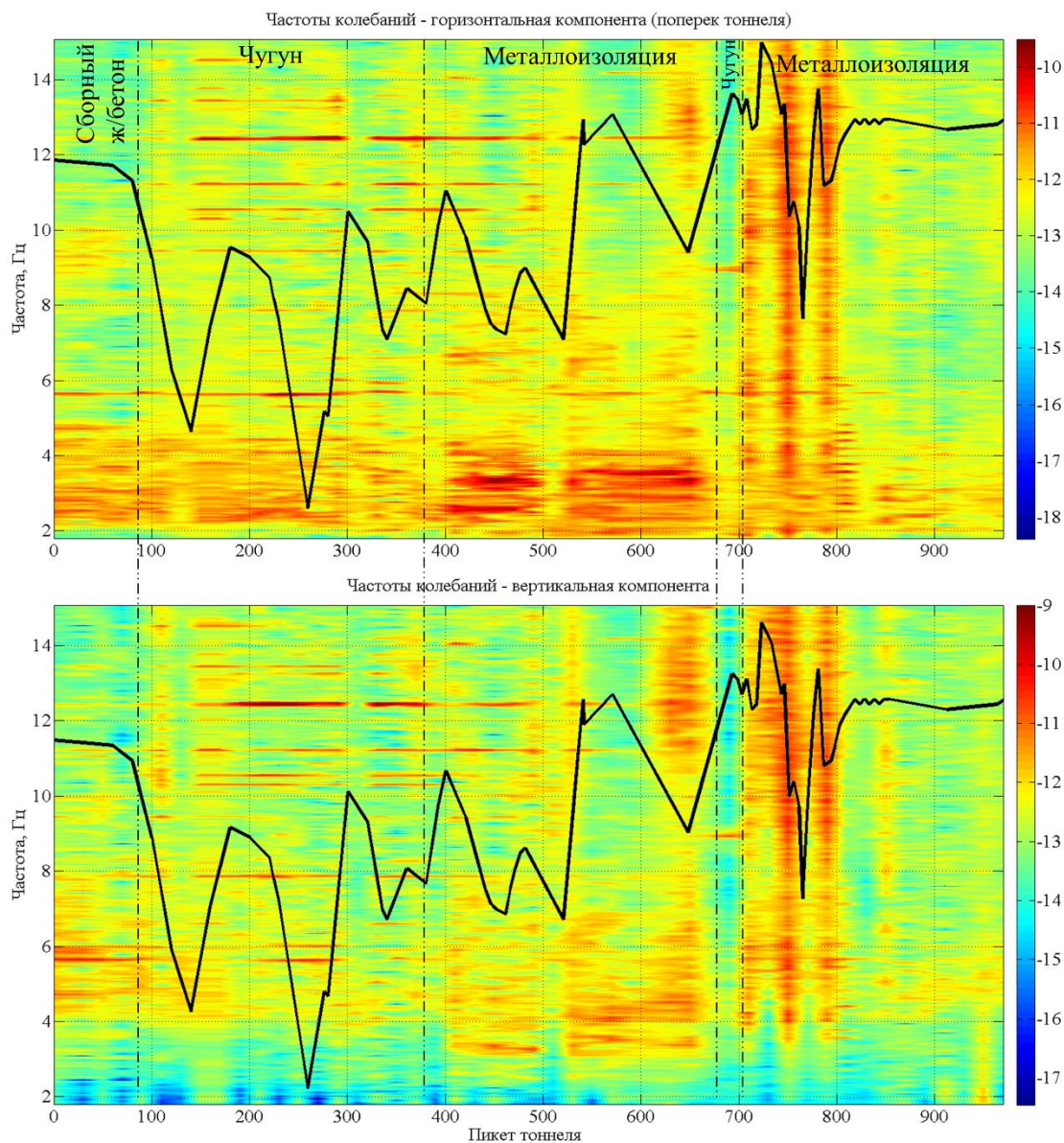


Рис. 3. Комплексный анализ исследования собственных колебаний по тоннелю, «подложка» - микросейсмические колебания E-Z, черный график – амплитуда осадок участков тоннеля (приведена на рис. 1)

Обратим внимание на другой характерный признак anomального поведения колебаний. В интервале между отметками расстояния 150 – 650 м на условной линии амплитуды колебаний по частоте ≈ 12.4 Гц по обоим компонентам выделяется красный высокоамплитудный пик с дополнительными составляющими по другим частотам (наблюдается появление дополнительных высокоамплитудных гармоник) от ≈ 9.5 Гц до 15 Гц. Причем количество данных пиков частотном диапазоне изменяется по длине тоннеля. По

геодезическому мониторингу на данном участке наблюдаются максимальные осадки, с самыми большими значениями в районе максимального проявления дополнительных гармоник колебания конструкции в районе ПК 250 м. Также вдоль данного аномального участка наблюдаются пропуски в «сплошности» линии спектра, т.е. участки с отсутствием вышеописанного критерия, в особенности по результатам обработки вертикальной компоненты, в районе 300 м, 400 м, 550 м, 700 м, данные места по амплитуде осадков приурочены к минимальным околонулевым значениям и, предположительно, являются узловыми точками конструкции тоннеля, что указывает на особенности самой конструкции тоннеля, где деформации минимальны или отсутствуют [5].

Настоящее исследование, проведенное при комплексном техническом обследовании тоннеля метрополитена не глубокого заложения в рамках вибрационного мониторинга, подтвердило эффективность спектрального анализа микросейсмических колебаний как метода контроля состояния тоннельных конструкций. Выявлено, что изменения в собственных частотах и интенсивности колебаний могут служить надежными индикаторами наличия дефектов. Сопоставление результатов с данными геодезического наблюдения позволило выявить корреляцию между аномалиями спектра колебаний и динамикой вертикальных осадков тоннеля.

Выявленная корреляция между осадками тоннеля и изменениями частотного состава его собственных колебаний указывает на то, что деформации конструкции, связанные со знакопеременными осадками, являются причиной, а изменения динамических характеристик и частотного состава колебаний – следствием. Это объясняется тем, что любые изменения геометрических параметров и жесткости конструкции неизбежно приводят к изменению её динамических свойств, что проявляется в изменении частотного спектра собственных колебаний.

Полученные результаты демонстрируют перспективность применения комплексного подхода для оценки более полной картины технического состояния тоннельных сооружений, результаты исследований также могут быть применимы в рамках мониторинга при изменениях конструкции тоннельного сооружения или характеристик контактных условий системы «обделка – вмещающий грунтовый массив» и заобделочного пространства в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jiang Y., Gao Y., Wu X. The nature frequency identification of tunnel lining based on the microtremor method // *Underground Space*. — 2016. — Vol. 1, Iss. 2. — P. 108–113. — ISSN 2467-9674. — <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2016.12.001>.
2. Кренёв А.Н., Артёмова Т.К. Цифровой спектральный анализ: учеб. пособие. — Ярославль: Яросл. гос. ун-т, 2002. — 114 с.
3. Мишенин В.Н., Есипов С.М. Факторы, влияющие на частоты собственных колебаний строительных конструкций, зданий и сооружений на различных этапах жизненного цикла // *Индустриальная Россия: вчера, сегодня, завтра: сборник научных статей по материалам XII Международной научно-практической конференции*. — Том Часть 2. — Уфа, 2023.
4. Утяшев И.М. Определение закона изменения сечения стержня по собственным частотам колебаний. / И.М. Утяшев, А.А. Аитбаева, А.А. Юлмухаметов // *Известия уфимского научного центра РАН*. – 2020. № 4. 19-24 с.
5. H Yu, Y Yuan, A Bobet. Seismic analysis of long tunnels: A review of simplified and unified methods.// *Underground Space*. — 2017. — Vol. 2, Iss. 2. — P. 73–87 — <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2017.05.003>.

DIAGNOSTICS OF TUNNEL STRUCTURE CONDITION THROUGH ANALYSIS OF CHANGES IN THE SPECTRUM OF NATURAL VIBRATIONS

Semyon Valerevich Andrianov, Tatiana Andreevna Mingaleva
Research, Design and Survey Institute Lenmetrogiprotrans, Saint Petersburg

Summary. The article discusses the application of spectral analysis methods of natural vibrations for monitoring the condition of tunnel structures. The study is based on the measurement of microseismic signals in the frequency range from 2 to 15 Hz. A comprehensive analysis was conducted in conjunction with geodetic monitoring data of tunnel sections, which allowed identifying a dependency between the dynamic characteristics of the structure and its physical condition. The developed methodology demonstrated high sensitivity to lining defects and changes in the properties of surrounding soils. The research results have practical significance for ensuring the safe operation of tunnel structures.

Key words: tunnel, subway, frequency spectrum, natural frequencies, monitoring.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреианов Семён Валерьевич

andrianovsemen@gmail.com

АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, зав. лабораторией геофизических исследований

Мингалева Татьяна Андреевна

tatiana.mingaleva@bk.ru

АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, с.н.с.

УДК 550.834

РАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ С ЦЕЛЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ НАСЕЛЁННОГО ПУНКТА НА ПРИМЕРЕ ГОРОДСКОГО ОКРУГА Г. СОЧИ

*Бабуркин Иван Александрович, Крячков Иван Вячеславович,
Андреев Дмитрий Олегович
ИГЭ РАН, г. Москва*

Аннотация. Доклад содержит сведения о проведённом комплексе инженерно-геофизических исследований в рамках работ по обеспечению водоснабжения населённого пункта на территории городского округа г. Сочи.

Ключевые слова: сейсмическое микрорайонирование, ВЭЗ, блуждающие токи, комплекс, микросейсмы, обстановка, коррозионная агрессивность.

Объект изысканий находится на территории Краснодарского края, муниципального образования городского округа города-курорта Сочи. На объекте предусматривается строительство сети водоснабжения и канализации, а также площадки очистных сооружений, что в свою очередь требует выполнения комплекса геофизических методов для проведения сейсмического микрорайонирования с целью обеспечения процесса проектирования информацией о сейсмических воздействиях на площадке строительства.

Задачей сейсмического микрорайонирования является оценка влияния местных условий (грунтовых, геоморфологических, гидрологических и геофизических) на ожидаемое сейсмическое воздействие [2].

Инженерно-геофизические исследования проводились для целей СМР, в частности для получения скоростных характеристик грунтов, необходимых для расчетов. В свою очередь, геофизические методы являются одним из видов исследований при инженерно-геологических изысканиях на этапах проектирования и строительства. Поэтому кроме определения скоростных характеристик массива грунтов инженерно-геофизические исследования решали ряд задач для целей инженерно-геологических изысканий:

1. Получение информации о скоростях продольных и поперечных волн в разрезе для целей сейсмического микрорайонирования;
2. Установление мощности, состава и условий залегания пород в разрезе;
3. Изучение рельефа подстилающих скальных пород;
4. Определение степени разрушенности пород, установление зон разуплотнения, дробления и тектонических нарушений, зон разуплотнения дисперсных покрывающих пород и других аномальных зон;
5. Уточнение инженерно-геологической и гидрогеологической обстановки;
6. Определение коррозионной агрессивности грунтов [4];
7. Определение наличия блуждающих токов в земле.

Рациональный комплекс геофизических методов для решения вышеприведённой задачи включает в себя:

1. Запись микроколебаний (микросейсм) сейсмологическими станциями;
2. Сейсморазведка МПВ при возбуждении колебаний ударами кувалды;
3. Электроразведка методом вертикальных электрических зондирований;
4. Измерение блуждающих токов.

Сейсморазведочные исследования проводились методом преломленных волн МПВ-ОГП на поперечных горизонтально-поляризованных и продольных волнах. Регистрация колебаний производилась сейсмической косой длиной 46 м, общая протяженность одного сейсмозондирования равнялась 46 м. Шаг приёма составлял 2 метра. Пункты возбуждения упругих колебаний располагались на косе и были организованы выносные удары. В качестве регистрирующей аппаратуры применялась 24-канальная цифровая сейсморазведочная станция «Geode» фирмы «Geometrics» (США).

Схематично система наблюдения, применявшаяся при проведении полевых сейсморазведочных работ показана на рисунке 1.

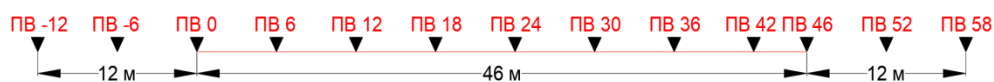


Рис. 1. Схема системы наблюдения

Для получения поперечных волн использовался механический источник - кувалда, удары осуществлялись в направлении перпендикулярно профилю (схема Y-Y). На каждом пункте возбуждения совершались две серии из 10 разнонаправленных ударов для реализации методики плюс/минус. Для получения продольных волн удары производились в вертикальном направлении. Окончательный результат обработки полевых данных представляется в виде временных (рис. 2) и глубинных разрезов (рис. 3).

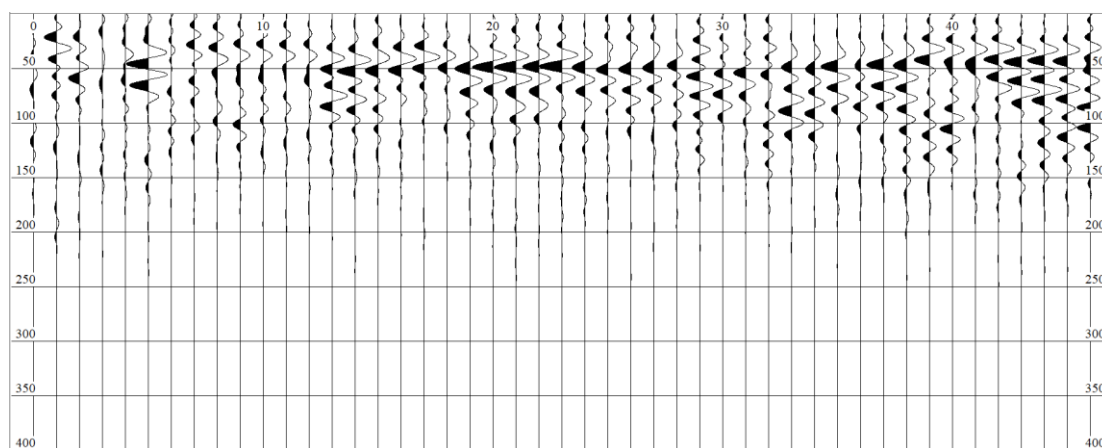


Рис. 2. Пример временного разреза

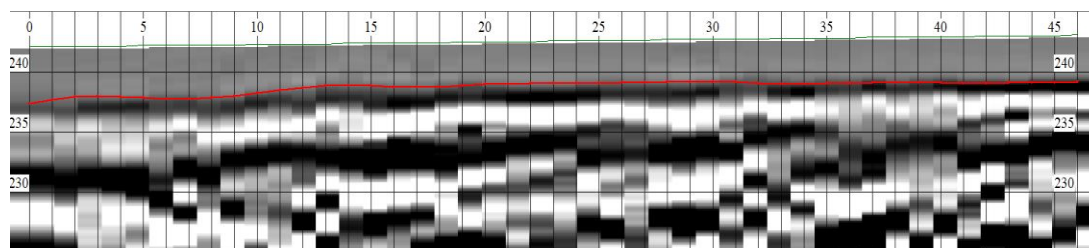


Рис. 3. Пример глубинного разреза

Регистрация микросейсм является полезным вспомогательным методом определения увеличения амплитуд колебаний за счет влияния местных инженерно-геологических, геоморфологических и других условий, а также для оценки доминантных периодов [3]. Методика полевых наблюдений за микросейсмами основывается на

регистрации трех компонент колебаний. В качестве регистрирующей аппаратуры применялся четырехканальный регистратор сейсмических сигналов «Дельта-Геон-02».

Сейсмологические наблюдения производились следующим образом: комплект аппаратуры выставлялся на требуемую точку. После установки акселерометра к комплекту подключается источник питания (аккумуляторная батарея) и производилась запись. На каждой точке наблюдения производилась запись в течении 10-15 - минут.

Также на объекте были проведены электроразведочные работы методов вертикальных электрических зондирований, позволившие получить информацию о составе и мощности рыхлых четвертичных отложений, определить глубину залегания подстилающих скальных пород, а также уточнить инженерно-геологическую и гидрогеологическую обстановку.

Измерения выполнялись симметричной установкой Шлюмберже, схематично изображенной на рисунке 4. Установка состоит из 2 питающих заземлений, через которые в землю пропускается постоянный ток, и 2 измерительных заземлений, между которыми измеряется разность потенциалов. Для измерения разности потенциалов и силы тока, пропускаемого через землю, применяются переносная измерительная аппаратура или специальные электроразведочные станции (состоящие из измерительной аппаратуры и источника тока) [1].

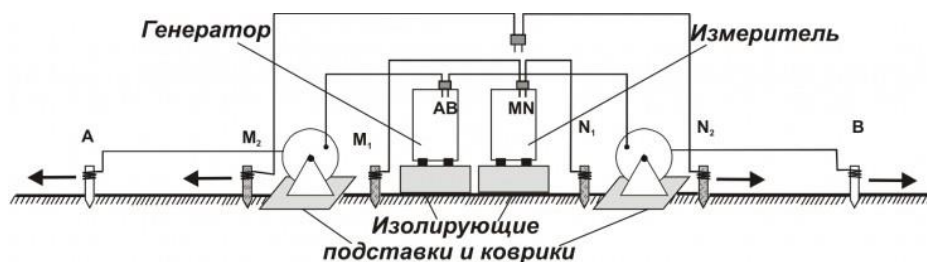


Рис. 4. Схематичное изображение электроразведочной установки (симметричная установка «Шлюмберже»)

Величины разноса АВ изменялись от 3.2 до 53.2 м. На каждом разнесе измерялось значение тока в АВ и напряжения в линии MN. Результаты измерений записывались в память измерительной аппаратуры и в полевой журнал.

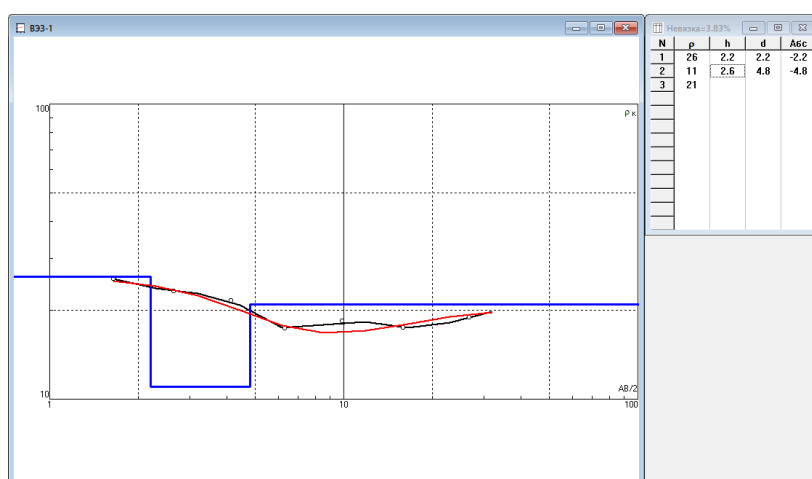


Рис. 5. Пример кривой ВЭЗ

В качестве измерительной аппаратуры для электроразведочных работ был применён низкочастотный компьютеризированный электроразведочный прибор Электротест С. Конечным результатом обработки данных ВЭЗ является кривая ВЭЗ (рис. 5).

В качестве заключающего метода было проведено измерение блуждающих токов. Метод заключается в измерении разности потенциалов ΔU между двумя электродами по двум взаимно перпендикулярным направлениям при разnose электродов на расстояние 100 м. Измерение потенциалов БТ было выполнено мультиметром АКПП-2203. В работе использовались неполяризующиеся электроды.

Результатом измерения блуждающих токов является график изменения ΔU (рис. 6).

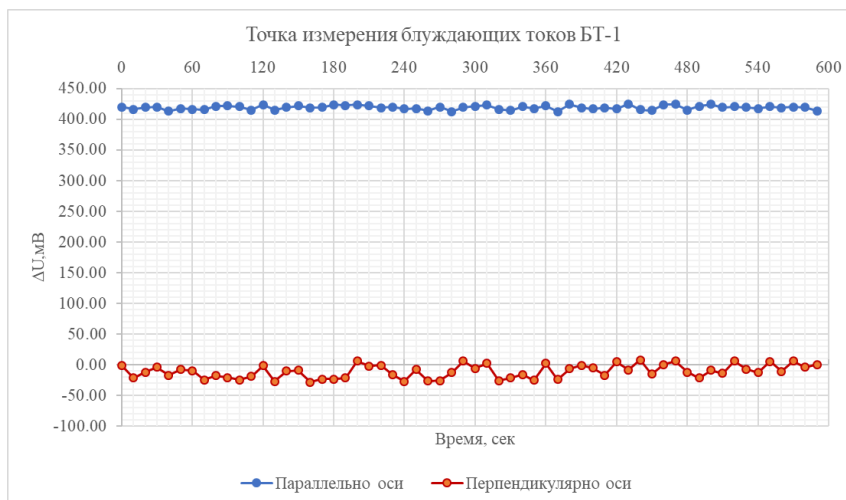


Рис. 6. Пример графика изменения ΔU во времени

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.А. Шевнина, А.А. Бобачева. ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА. Пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей - 2013.
2. Шебалин Н. В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука. — 1968.
3. Семенова Ю.В. Моделирование реакции грунта при сейсмическом микрорайонировании строительных участков // Геофизический журнал. — 2015. — Т. 37, № 1.
4. СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии».

A RATIONAL COMPLEX OF GEOPHYSICAL METHODS FOR CARRYING OUT SEISMIC MICROZONATION WITH THE PURPOSE OF ENSURING WATER SUPPLY TO A POPULATION AREAS USING THE EXAMPLE OF THE CITY DISTRICT OF SOCHI

*Baburkin Ivan Aleksandrovich, Kryachkov Ivan Vyacheslavovich,
Andreev Dmitry Olegovich
IGE RAS, Moscow*

Annotation. The report contains information about the complex of engineering and geophysical studies carried out as part of the work to ensure the water supply of a settlement in the territory of the Sochi city district.

Keywords: seismic microdistricting, EEZ, stray currents, complex, micro-seisms, environment, corrosive aggressiveness.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабуркин Иван Александрович

Ivan.mine999.0@mail.ru

ИГЭ РАН, г. Москва, инженер

Научный руководитель: Кауркин Михаил Дмитриевич, к.г.-м.н.

Крячков Иван Вячеславович

pudov0100@mail.ru

ИГЭ РАН, г. Москва, инженер

Андреев Дмитрий Олегович

andreevdmol@gmail.com

ИГЭ РАН, г. Москва, инженер

УДК 550.8.052

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИ ПОИСКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА КАРЛИНСКОГО ТИПА

^{1,2}*Банадысева Мария Дмитриевна, ²Мирошниченко Юлия Владимировна,*
³*Шаянова Регина Вадимовна, ²Осипов Алексей Сергеевич*
¹*СПбГУ, г. Санкт-Петербург*
²*ООО «СЗГГК «Геокомплекс», г. Санкт-Петербург*
³*УГНТУ, г. Уфа*

Аннотация. В период летнего полевого сезона 2024 г. компанией ООО «СЗГГК «Геокомплекс» были выполнены геофизические работы в пределах участка недр «Островная площадь» (Свердловская область). Геофизические работы проводились методами магниторазведки, электроразведки (ВП-СГ) и гамма-спектрометрии. В ходе проведения обработки данных как дополнительный инструмент использовался модуль анализа растровых изображений ArcGIS Pro. В данной статье представлены результаты комплексных геофизических работ и опыт использования картографического инструмента для дополнительного анализа данных.

Ключевые слова: магниторазведка, удельное электрическое сопротивление, гамма-спектрометрия, классификация методом максимального подобия.

С каждым годом задачи, решаемые в области поисковой геологии, в том числе рудной геофизики, становятся сложнее. Вследствие чего наблюдаются такие тенденции как: увеличение глубины исследований, усложнение методики и техники работ, использование БПЛА [2]. Машинное обучение (МО) используется в качестве дополнительного инструмента на этапе обработки и интерпретации полученных данных. Использование подобных технологий помогает не только сократить время, затрачиваемое на анализ, но и также выявить скрытые закономерности в геологических данных [1].

Существует несколько алгоритмов машинного обучения: обучение с учителем, обучение без учителя, активное обучение и полуконтролируемое обучение. В работе представлен опыт использования классификации для уточнения перспективных площадей для поиска золота на месторождениях карлинского типа.

Классификация – распределение объектов к определенным классам. Данный алгоритм используется в медицине, данных социальных сетей, картографии, геологии. Алгоритм относит объект к классу и определяет достоверность классификации [4]. В качестве примера решения задач геофизики можно привести работу Леляева П.А. [3]. Авторы представили классификацию пород Воронежского кристаллического щита по двум параметрам, где использовался классификатор Байеса. Разработчики ГИС также активно внедряют модули аналитики с использованием МО для более глубокого анализа данных, категоризации непрерывных данных.

Силами ООО «СЗГГК «Геокомплекс»» на участке были проведены комплексные геофизические работы, включающие: магниторазведку, электроразведку, гамма-спектрометрию.

Перспективные участки, проиллюстрированные на рисунке 1, на обнаружения золоторудной минерализации по данным данных магниторазведки были выделены на основе следующих маркеров: приуроченность к области вблизи высокомагнитного объекта; близость интрузивных тел, отражающихся в магнитном поле как изометричные или

линейные тела низкого или отрицательного магнитного поля, зачастую по периферии тел выделяется магнетитовый шпир; области пересечения разнонаправленных разломов; рудовмещающие кварц-карбонатные жилы не должны отличаться высокими значениями магнитного поля, но видимо, по ввиду их размеров, они не вносят значимых значений в общий фон магнитного поля.

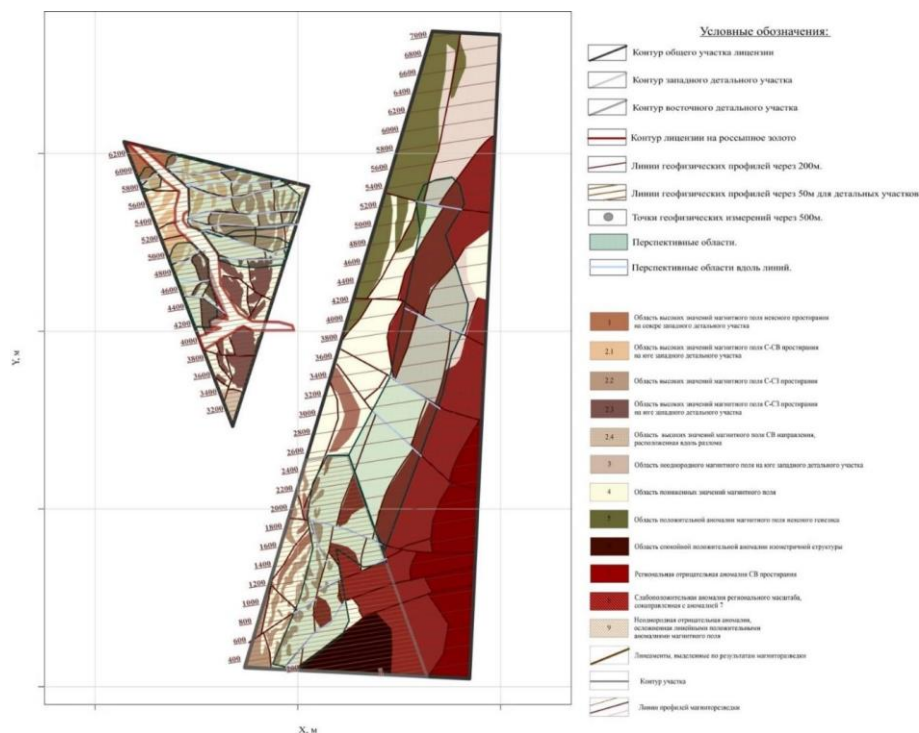


Рис. 1. Структурно-интерпретационная схема для участка работ по данным магниторазведки с выделением перспективных участков

По результатам электроразведки также был выделен ряд рудоперспективных участков (рис. 2), сложенных несколько различными литолого-формационными комплексами. Выявленные особенности геофизических полей над рудоконтролирующими структурами, комплексами пород и самими рудными телами позволяют дополнить геологопоисковую модель следующими геофизическими критериями: области повышенных (более 2 %) значений поляризуемости (далее η_k) – соответствуют ореолам пород с сульфидной вкрапленностью, в пределах которых могут находиться золоторудные проявления; небольшие локальные повышения значений η_k на картах ВП-СГ – обусловлены зонами гидротермально-метасоматической проработки пород с вкрапленной сульфидной минерализацией; линейные структуры субмеридионального простирания на картах удельного сопротивления ρ_k , зоны контакта пород с разным уровнем значений ρ_k (относительно высокие: от нескольких сотен до нескольких тысяч Ом·м – маркируют протяженные зоны разломов, к которым могут быть приурочены золоторудные проявления. На разрезах электротомографии ВП представлены контрастными крутопадающими зонами, либо изометричными аномалиями повышенных значений η и пониженных значений ρ ; высокие значения поляризуемости вблизи рудоконтролирующего разлома.

По данным гамма-спектрометрии области, выделенные темно-красным цветом (рис. 3), представляют наибольший интерес – зоны крупного метасоматоза калиевой и/или калий-урановой природы с пониженным значением концентрации ториевой компоненты.

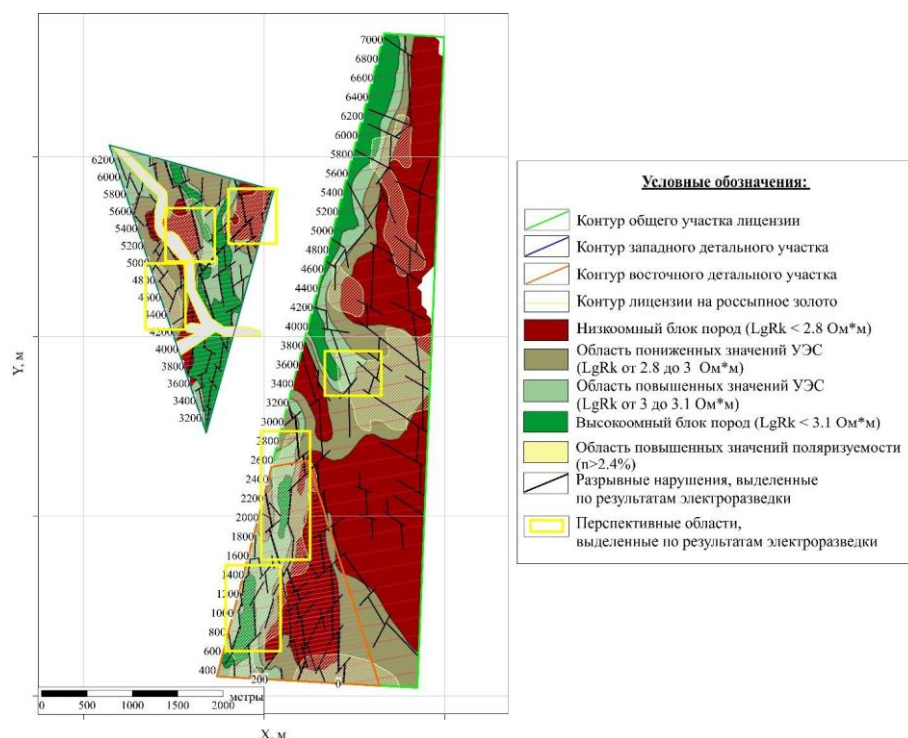


Рис. 2. Структурно-интерпретационная схема для участка работ по данным электроразведки с выделением перспективных участков

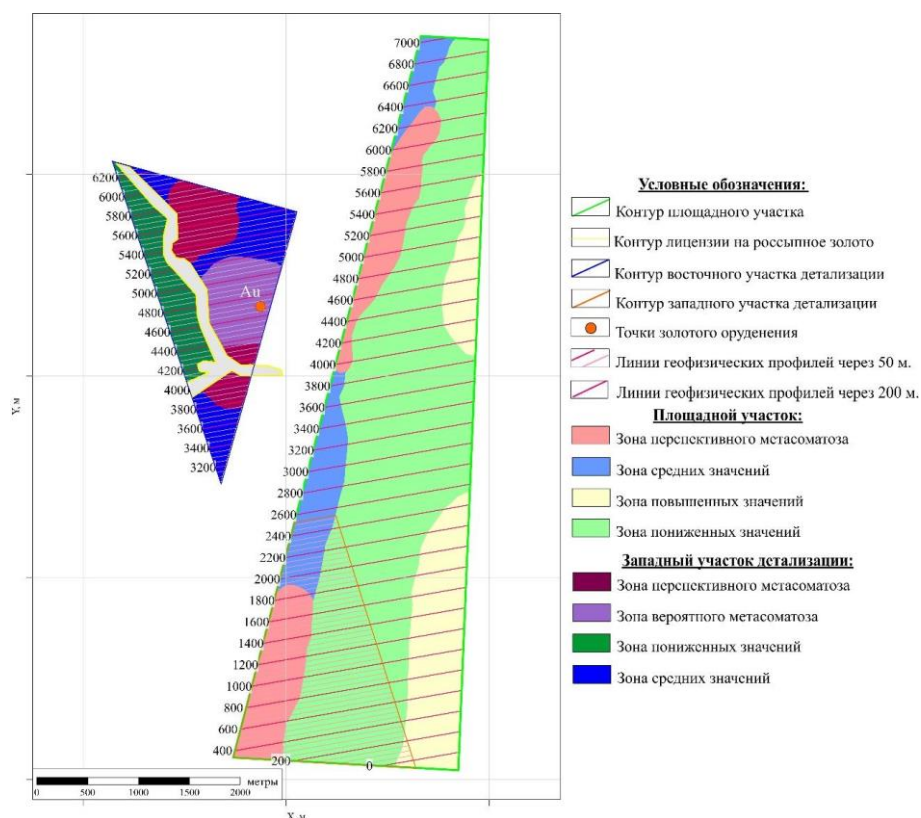


Рис. 3. Структурно-интерпретационная схема для участка работ по данным гамма-спектрометрии с выделением перспективных участков

Выделенные области были обобщены и разбиты на категории по перспективности:

Участки первой очереди – это области пересечения всех перспективных областей по трем разным методам – магниторазведки, электроразведки и гамма-спектрометрии.

Участки второй очереди – это области пересечения результатов магниторазведки и электроразведки.

Минерализация в данной области представлена преимущественно магнетитом и пиритом, реже отмечается гематит; среди нерудных минералов широко распространены кварц, карбонат и эпидот, менее распространены – хлорит, гидрослюда и глинистые минералы». Области, насыщенные сульфидной или скарново-магнетитовой минерализацией (а отдельные, возможно, и с золотосульфидной), обеспечивают значительное повышение поляризуемости вмещающих пород.

Участки третьей очереди – это области пересечения контуров перспективных по результатам магниторазведки и областей повышенных значений поляризуемости.

Для работы использовался модуль ArcGIS Image Analyst. Разделение на классы выполнялось методом максимального подобия. Для этого выполняются следующие условия: значения ячеек в каждом классе подчиняются закону нормального распределения, используется теорема Байе (теория принятия решений).

В классификации использовались 6 нормализованных матриц: матрица аномального магнитного поля, поляризуемости, удельного электрического сопротивления, надфоновое содержание ^{40}K , надфоновое содержание ^{232}Th и рельефа. Далее данные нормализуются, затем проводится кластеризация для формирования файла сигнатур (ключ для классификации). Выходной набор растровых данных доверия показывает 14 уровней достоверности классификации.

Поскольку участки первой очереди связаны с перспективными областями всех 3 методов, то часть участков второй очереди, представляющих интерес по всем методам, была добавлена к участкам первой очереди.

Таким образом, расширенный комплексный анализ растровых изображений дал возможность провести пространственный анализ нескольких параметров и скорректировать геометрию интересующих областей. Работа с анализом изображений и распознаванием образов может использоваться как вспомогательных инструмент при комплексировании методов геофизики, поскольку помогает обнаружить возможные скрытые закономерности. Также категоризация данных может быть полезна при изучении геологических обстановок и зональности распределения геофизических, геохимических полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архив открытого доступа Санкт-Петербургского государственного университета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hdl.handle.net/11701/42473> (дата обращения 09.02.2025).
2. Гурин Г.В., Пантеев И.А., Ткачук П.В. Глубинная электротомография с 2D, 2.5D и 3D системами наблюдения в сложнопостроенных геоэлектрических разрезах (по данным математического моделирования) // Инженерная и рудная геофизика 2024. Инженерная и рудная геология 2024. Материалы 20-й научно-практической конференции и выставки. – Москва: ООО “Геомодель Развитие”, 2024. – С. 319-323.
3. Леляев П.А., Салтыковский А.Я., Семенов М.Е., Мацковский В.В. Классификатор Байеса в решении задачи вероятностного прогноза вещественного состава глубоких горизонтов земной коры по геофизическим данным // Геофизические исследования. №1 (13). – 2012. – С. 23–28
4. Pedregosa F. Scikit-learn: machine learning in python / Pedregosa F et al. // J Mach Learn Res, 2011. – № 12:2825-30. –Р. 234–265

USE OF CLASSIFICATION TO IDENTIFY PERSPECTIVE AREAS IN THE SEARCH FOR KARLIN-TYPE GOLD DEPOSIT

^{1,2}*Banadyseva Maria*, ²*Miroshnichenko Yulia*, ³*Shayapova Regina*, ²*Osipov Alexey*
¹*SPbU, Saint-Petersburg*
²*LLC “NWGGC “Geocomplex”, Saint-Petersburg*
³*USPTU, Ufa*

Summary. During the summer field season 2024, LLC “NWGC “Geocomplex” performed geophysical works within the subsoil area of the “Ostrovnyaya Ploshchad” (Sverdlovsk Region). The geophysical work was carried out using magnetic prospecting, electrical prospecting (EP-SG) and gamma-spectrometry methods. In the course of data processing as an additional tool raster image analysis module was used as an additional tool in ArcGIS Pro. This article presents the results of complex geophysical works and the experience of using the mapping tool for additional data analysis.

Key words: magnetic surveying, electrical resistivity, gamma-spectrometry, maximum likelihood classification.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Банадысева Мария Дмитриевна

mariyabanadyseva@gmail.com

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, студент

ООО “СЗГГК “Геокомплекс”, г. Санкт-Петербург, техник-геофизик

Мирошниченко Юлия Владимировна

jul.mrsh@gmail.com

ООО “СЗГГК “Геокомплекс”, г. Санкт-Петербург, геофизик

Шаяпова Регина Вадимовна

УГНТУ, г. Уфа, студент

Осипов Алексей Сергеевич

ООО “СЗГГК “Геокомплекс”, г. Санкт-Петербург, техник-геофизик

УДК 550.832

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА ОБЪЁМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

*Бирюлин Сергей Викторович
ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург*

Аннотация. Изучение аномальных изменений концентраций Rn получило широкое распространение. Установлено, что в период наблюдений на станции в городе Южно-Курильске с 2011 по 2023 годы 267 событиям из 289 с геодинамическим критерием больше или равно 2.0 предшествовали аномалии ОАР (93%). Однако наблюдения в иных геодинамических условиях в силу различных причин не всегда позволяют чётко идентифицировать Rn в качестве предвестника землетрясений.

Ключевые слова: землетрясение, радон, ОАР.

Аномальные изменения концентраций Rn вызывают интерес учёных по всему миру. Изменениями концентраций Rn занимался ряд авторов, специализирующихся на измерениях радона в почвенном газе: King C.Y., Kuo T., Mogro-Campero A., Fleischer R.L., Planinic J., Ramola R.C., Singh S., Virk H.S., Reddy D.V., Walia V., Zmazek B., Martinelli G., в грунтовых водах исследования радона проводили Favara R., Gregoric A., Vaupotic J., Heinicke J., в приземной атмосфере Albarello D.; Oh Y., Kim G., Omori Y., Yasuoka H., Nagahama Y. Радон в качестве индикатора изменений напряженного состояния горных пород, приводящих к тектоническим землетрясениям широко применялся и применяется многими исследователями, в том числе: Уткиным В.И., Юрковым А.К., Фирстовым П.П., Макаровым Е. О., Aumento F.; Chang W., Lin Y.-Y., Dubinchuk V. T., Hatuda Z., Kasahara K., King C.Y., Igarashi G., Saito H., Wakita H., Teng T [1].

Однако результаты проведённых исследований не во всех случаях однозначны и не всегда чётко позиционируют радон, как вероятный предвестник тектонического землетрясения. Это объясняется использованием разной аппаратуры, методик и способов, различными условиями измерений.

Способы измерений объёмной активности радона в подземных водах и приземном слое атмосферы, распространённые среди исследователей, в отличие от измерений в почвенном воздухе, зачастую искажают реальную информативность радона, как прогностического критерия тектонического события.

Измерения радона, растворённого в воде, фактически определяют динамику движения подземных вод, обусловленную изменением напряженного состояния горных пород. То есть радон переносится вместе с подземной водой и повышение концентрации может быть связано с поступлением более радононасыщенных вод в горизонт, в котором выполняются измерения. Если же рассматривать увеличение содержания Rn в точке измерения за счёт его поступления из вмещающих пород, то процесс его поступления в воду, растворения в ней, является медленным и скорее всего будет неоднозначно отражать изменения геодинамической обстановки при наблюдении процесса подготовки землетрясения. Измерения радона в приземном слое воздуха подвержены влиянию метеофакторов. В этом случае получить повторяющиеся результаты проблематично. Измерения радона в почвенном воздухе лишены вышеперечисленных недостатков, поэтому представляются наиболее информативными.

В большинстве случаев при измерениях объемной активности радона (ОАР) для доставки почвенного радона к измерительному прибору применяют диффузионный способ [2, 3, 4]. Создается полость в исследуемой среде, в которую помещается детектор радона (рис. 1). Создание полости приводит к локальному искажению существующего напряженно-деформированного состояния геологической среды. Исходя из вертикального распределения ОАР измеряемая объемная активность зависит от объема и глубины созданной полости. Изменения ОАР в полости будут происходить медленнее, учитывая ее объем, незначительную скорость диффузионного поступления радона и его период полураспада по сравнению с неискаженной средой. Радон поступает из небольшого объема горных пород, окружающих полость. Наличие полости обуславливает хорошую связь с атмосферой, что приводит к существенному влиянию на величину ОАР метеорологических факторов, таких как атмосферное давление, влажность и температура. Тем не менее, при мониторинговых исследованиях диффузионный способ доставки радона к детектору по-прежнему достаточно широко используется.

Способ принудительной доставки радона к детектору применяется с конца восьмидесятых годов прошлого века при изучении процесса подготовки горных ударов на шахтах Средне-Уральского бокситового рудника [5]. В настоящее время все мониторинговые наблюдения на радоновых станциях Института геофизики УрО РАН проводятся в режиме принудительной доставки. Он заключается в принудительной откачке и доставке почвенного воздуха к детектору с помощью воздушного насоса через зонд с перфорацией на нижнем конце с глубины не менее 70 см (рис. 1). Это позволяет существенно увеличить информативный объем исследуемых горных пород, из которого извлекается радон. Небольшой диаметр (8-10 мм) зонда не искажает существующее напряженно-деформированное состояние среды. На глубине 70 см практически отсутствует влияние изменений атмосферного давления, температура среды остается постоянной (суточная волна температуры проникает на глубину в пределах 25-30 см), влажность практически не меняется (если над зондом сделать крышу для устранения влияния дождевых осадков), измерительный прибор с насосом можно разместить в удобном месте, регулируя длину гибкого шланга от зонда.

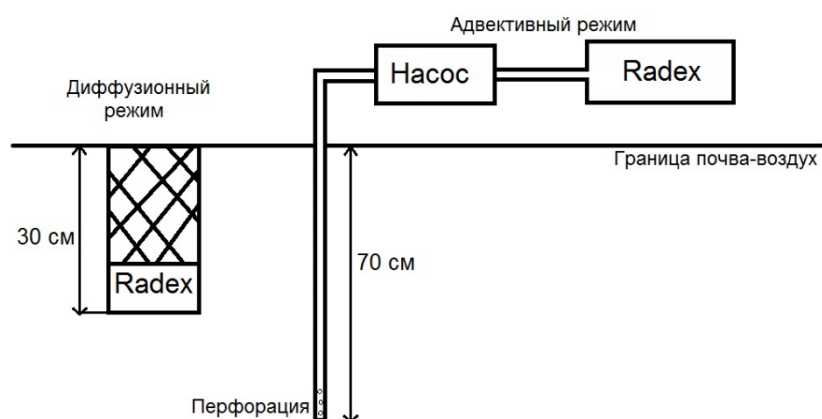


Рис. 1. Схема проведения измерений ОАР в диффузионном и адвективном режимах

На сегодняшний день Институтом геофизики УрО РАН совместно и при поддержке коллег проводится непрерывный мониторинг объемной активности радона в различных регионах. Станции радонового мониторинга находятся в Южно-Курильске (о. Кунашир), с. Петропавловское (о. Сахалин), п. Коуровка (Средний Урал), п. Кармадоне (Северном Кавказе), г. Владикавказе, г. Кызыле (р. Тыва), Кыргызстане, Казахстане и Крыму.

На станции в Южно-Курильске практически непрерывные измерения проводятся с 2011 года. Применялось отношение магнитуды землетрясения к логарифму расстояния от станции мониторинга до события (геодинамический критерий К). Зона проявления предвестников ограничена радиусом 500 км от пункта наблюдения. Рассматривались события с магнитудой больше 4 и К больше 2 (рис. 2).

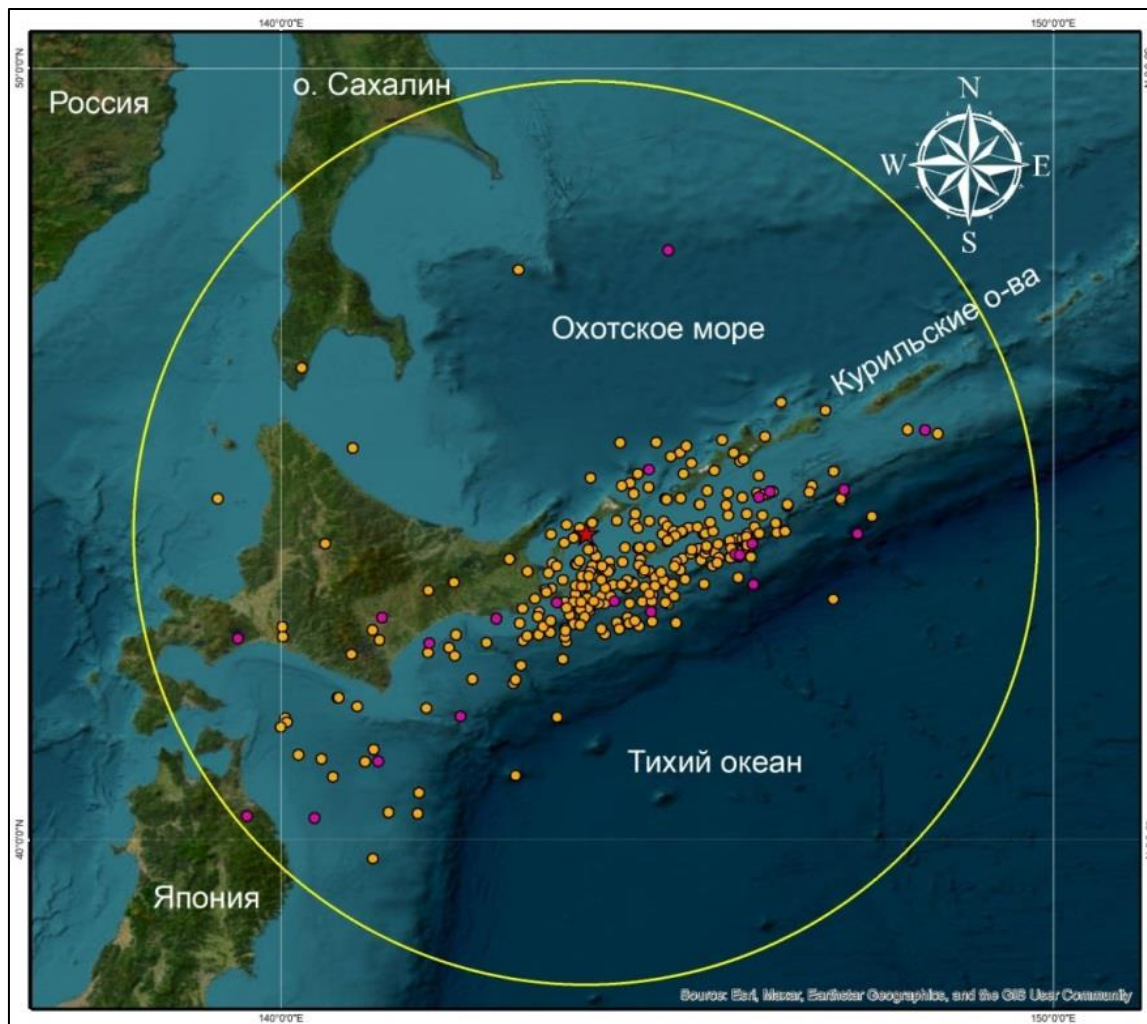


Рис. 2. Местоположение станции радонового мониторинга в Южно-Курильске и проанализированные землетрясения за 2011-2023 в радиусе 500 км от станции мониторинга. Красной звездой обозначена станция радонового мониторинга. Жёлтые точки – землетрясения, которым предшествовала аномалия ОАР. Красные точки – землетрясения, которым не предшествовала аномалия ОАР. Жёлтая линия – граница исследуемой области

За период 2011 по 2023 гг. произошло 289 землетрясений с магнитудой более 4 в радиусе 500 км от станции Южно-Курильск (рис. 2). Значительная часть землетрясений не соответствовала критерию больше или равно 2.5, но в поле радона отразилась. Поэтому были применено соотношение и $K \geq 2$. Таким образом, по результатам обработки мониторинговых наблюдений за 2011-2023 годы было установлено, что 267 событиям из 289 с геодинамическим критерием больше или равно 2.0 предшествовали аномалии ОАР (что составляет 93%) (рис. 3).

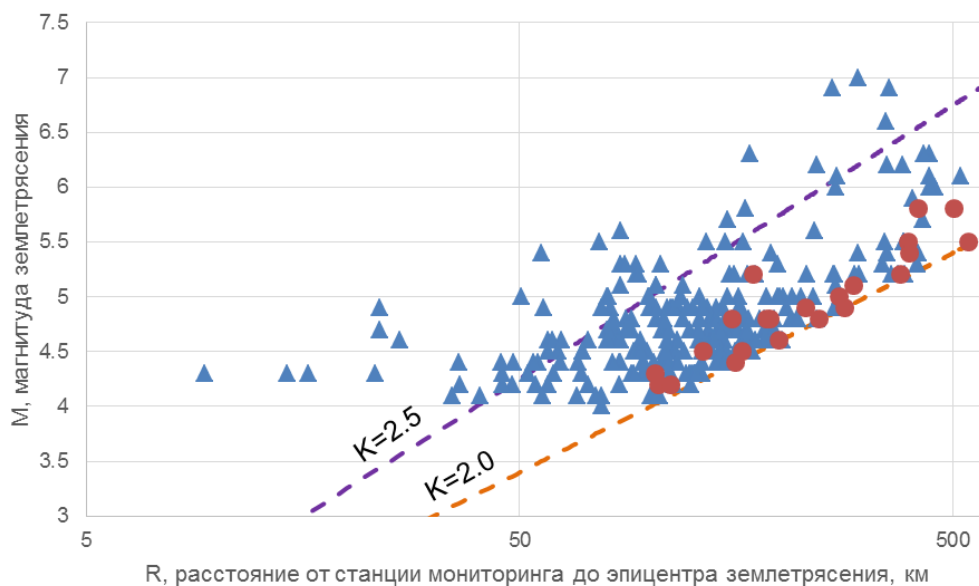


Рис. 3. Отражение землетрясений в поле ОАР по наблюдениям за 2011-2023 (треугольник — землетрясения, которым предшествовала аномалия ОАР, точка — землетрясения, которым не предшествовала аномалия ОАР)

В связи с различными факторами, связанными, в том числе с соблюдением методики измерений в режиме принудительной доставки почвенного воздуха к детектору на данный момент не со всех станций удаётся получить данные, позволяющие уверенно идентифицировать изменения объёмной активности радона в качестве предвестника землетрясений.

Станция в городе Владикавказе размещена в цокольном этаже Геофизического Института ВНИЦ РАН. Зонд установлен в валунно-галечных отложениях. Измерения на данной станции искажают техногенные помехи. Наблюдаемые землетрясения сложно соотнести с аномальными изменениями ОАР.

Станция в городе Кызыле находится в пойменных и русловых отложениях реки Ка-Хем (Малый Енисей). Зонд установлен в грубообломочных пролювиальных отложениях, которые слабо передают возникающие деформации.

Станции в Кызыле и Владикавказе расположены в местах, где плохо передаются деформации. В обоих случаях измерения в режиме принудительной доставки почвенного воздуха к детектору не позволяют получать качественные данные, позволяющие чётко сопоставлять аномалии ОАР с последующими землетрясениями.

Станция в Кыргызстане находится в пределах километра от реки Иссык-Ата в зоне складчато-разрывного сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины. В подвале павильона Научной станции РАН установлена квадратная труба с перфорированным основанием на глубине 60 см. В трубе находится зонд с трубкой к детектору. Такой способ установки зонда не соответствует режиму принудительной доставки. Дополнительный объём, создаваемый внешней квадратной трубой, приводит к искажению измерений. Регистрация аномалий затруднена, вариации ОАР неприменимы для интерпретации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюлин С.В. Автореферат диссертации. 2022. Екатеринбург, 24 с.
2. Фирстов П.П., Макаров Е.О. Динамика подпочвенного радона на Камчатке и сильные землетрясения. Монография. 2018. 148 с.

3. Giuliani G.G. et al. Radon observations by gamma detectors PM-4 and PM-2 during the seismic period (January-April 2009) in L'Aquila Basin // Abstr. AGU Fall Meeting, December 14–18, San-Francisco 1. 2009. P. 3.
4. King C. Y., King B. S., Evans W. S., Zhang W. Spatial radon anomalies on active faults in California // Applied Geochemistry. 1996. V. 11. P. 497-510.
5. Булашевич Ю.П., Уткин В.И., Юрков А.К., Николаев В.Н. Изменение концентрации радона в связи с горными ударами в глубоких шахтах. // Доклады РАН. 1996. Т. 345. № 2. С. 245-248.

FEATURES OF MONITORING THE VOLUME RADON ACTIVITY IN VARIOUS GEODYNAMIC CONDITIONS

Biryulin Sergey
IGF UB RAS, Yekaterinburg

Summary. The study of anomal changes in Rn concentrations has become widespread. It was found that during the observation period at the Yuzhno-Kurilsk station from 2011 to 2023, 267 out of 289 events with a geodynamic criterion greater than or equal to 2.0 were preceded by VRA anomalies (93%). However, observations in other geodynamic conditions for various reasons do not always make it possible to clearly identify Rn as a precursor to earthquakes.

Key words: earthquake, radon, VRA.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бирюлин Сергей Викторович

serrega2009@gmail.com

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, с.н.с.

Научный руководитель: Юрков Анатолий Константинович, к.г.-м.н.

УДК 550.837.311

ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ВЭЗ МЕТОДОМ ЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Бухтеев Евгений Михайлович
ПГНИУ, г. Пермь
ООО «ПКБЗ», г. Пермь

Аннотация. Решение прямой задачи является определяющим алгоритмом для интерпретации полевых данных, полученных методом вертикального электрического зондирования. В работе описаны алгоритм решения прямой задачи методом линейной фильтрации и реализующая его программа, разработанная автором, выполнена оценка быстродействия программы и приведено сравнение результатов ее работы с существующими аналогами.

Ключевые слова: электроразведка, вертикальное электрическое зондирование, алгоритм, прямая задача, линейная фильтрация.

Решение прямой задачи геофизики является основополагающим элементом для классических методов обработки и интерпретации данных, полученных с помощью вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), и применяется как для моделирования разрезов кажущихся сопротивлений, так и в классических методах решения обратной задачи методом подбора. Большинство опубликованных программ интерпретации данных ВЭЗ имеют закрытый исходный код, что ограничивает возможности их использования. С целью создания эффективного способа решения прямой задачи с удовлетворительной скоростью работы, было принято решение разработать собственную программу, используя язык программирования Python.

В основе используемого алгоритма лежит метод линейной фильтрации, при численной реализации которого значение одной функции (кажущихся электрических сопротивлений, в рассматриваемом алгоритме) определяется как линейная комбинация дискретных значений другой функции, а дискретизация проводится с постоянным шагом по оси абсцисс [3].

Метод предполагает наличие линейного фильтра, необходимого для расчетов и представляющий собой набор следующих параметров:

- 1) Коэффициенты фильтра G , с указанием порядка, в котором они приводятся.
- 2) Число коэффициентов i , соответственно, абсцисс фильтра (длина фильтра) - KF .
- 3) Число точек фильтра, приходящихся на декаду оси абсцисс (модуль логарифмического бланка) KTM , а так же связанная с ним величина коэффициента геометрической прогрессии q , вычисляемая по формуле:

$$q = 10^{\frac{1}{KTM}} \quad (1)$$
- 4) Сдвиг α , характеризующий сдвиг абсцисс фильтра относительно ближайших узлов сетки разносов установки ВЭЗ.
- 5) Положение центрального коэффициента фильтра, а также число так называемых коэффициентов памяти M и коэффициентов предсказания L , расположенных соответственно до и после центрального коэффициента.

Расчет кажущихся сопротивлений ρ_k проводится по рекуррентной формуле. По заданным параметрам среды (мощности h и удельные сопротивления ρ слоев, а также их число N) и установки (разносы $г$ линии АВ и их число j) рассчитываются значения

кernels-функции R , используемые в дальнейшем для расчетов кажущегося сопротивления:

$$\rho_k(r_j) = \rho_1 \sum_{k=1}^{KF} R(X_{k+j-1}) * G(k) \quad (2)$$

где X – набор абсцисс, рассчитываемый динамически для каждого разноса установки, ρ_1 – сопротивление верхнего слоя. Абсцисса первого коэффициента фильтра рассчитывается по формуле:

$$X = r * \alpha / q^M \quad (3)$$

Остальные абсциссы возрастают в геометрической прогрессии с коэффициентом q . Стоит отметить, что если разносы установки так же возрастают в геометрической прогрессии с коэффициентом q , то для расчета кажущихся сопротивлений для NR разносов потребуется $KF+NR-1$ значений абсцисс, так как для каждого, следующего за первым, разноса можно будет использовать уже рассчитанные для предыдущего разноса значения R , за исключением первого. Это можно использовать для повышения производительности алгоритма за счет предотвращения расчетов, уже выполненных ранее.

Значения kernels-функции или трансформанты сопротивления $T=\rho_1 R$ для слоя i могут быть рассчитаны по рекуррентным формулам Ваньяна:

$$R_N = 1 \quad (4)$$

$$R_i(X_j) = \frac{1 - F_{i+1}}{1 + F_{i-1}} \quad (5)$$

$$F_{i+1} = \frac{1 - \frac{p_{i+1}}{p_i} * R_{i+1}}{1 + \frac{p_{i+1}}{p_i} * R_{i+1}} * \exp\left(\frac{-2h_i}{X_j}\right) \quad (6)$$

Используемый фильтр является основным элементом вычислительной схемы, определяющим скорость и точность решения прямой задачи, поэтому подбор оптимального фильтра является одним из основополагающих условий конкурентоспособности реализуемого алгоритма решения прямой задачи ВЭЗ. В процессе исследований было апробировано множество фильтров для различных типов установок, опубликованных различными авторами [1,2,4]. Рассмотренные фильтры имеют существенные отличия как в параметрах, так и в результатах их применения. В некоторых случаях возникают сомнения в корректности опубликованных фильтров, так как для их практического применения в используемых формулах либо отсутствуют необходимые параметры, либо получаемые результаты сильно отличаются от результатов, получаемых большинством фильтров.

Разработанная программа VES-Forward оптимизирована с помощью компилятора Numba. В случае совпадения шага геометрической прогрессии разносов и абсцисс фильтра, программа работает по отдельной схеме (сокращенному варианту), позволяющей дополнительно сократить количество вычислений. Для финального тестирования было отобрано 2 фильтра для установки Шлюмберже за авторством Е. Ш. Абрамовой [2] и группы авторов из Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ) [1]. Отобранные фильтры имеют схожие параметры: $KF=15$, $KTM=7$, $M=9$. Сдвиг α не указан для фильтра Абрамовой, поэтому принят за единицу.

Тесты точности фильтров проводились путем сравнения значений кажущихся сопротивлений, полученных с использованием разработанной автором программы, и результатов решения прямой задачи в комплексе программ В.П. Колесникова “ЗОНД”, принятых за эталон. Расхождение между кривыми оценивалось путем вычисления процентной погрешности σ по следующей формуле:

$$\sigma = \sum_{i=1}^j \frac{|\rho_i^B - \rho_i^3|}{\rho_i^{max}} * 100 \quad (7)$$

где ρ_i^B , ρ_i^3 , ρ_i^{max} – соответственно вычисленное, эталонное и наибольшее между вычисленным и эталонным кажущиеся сопротивления.

Оценки точности сопровождались визуальным сравнением кривых, и проводились для основных трехслойных типов кривых ВЭЗ (Н, К, Q, A), а также для высококонтрастных пятислойных моделей среды (рис. 1). Результаты сравнения представлены в таблице 1.

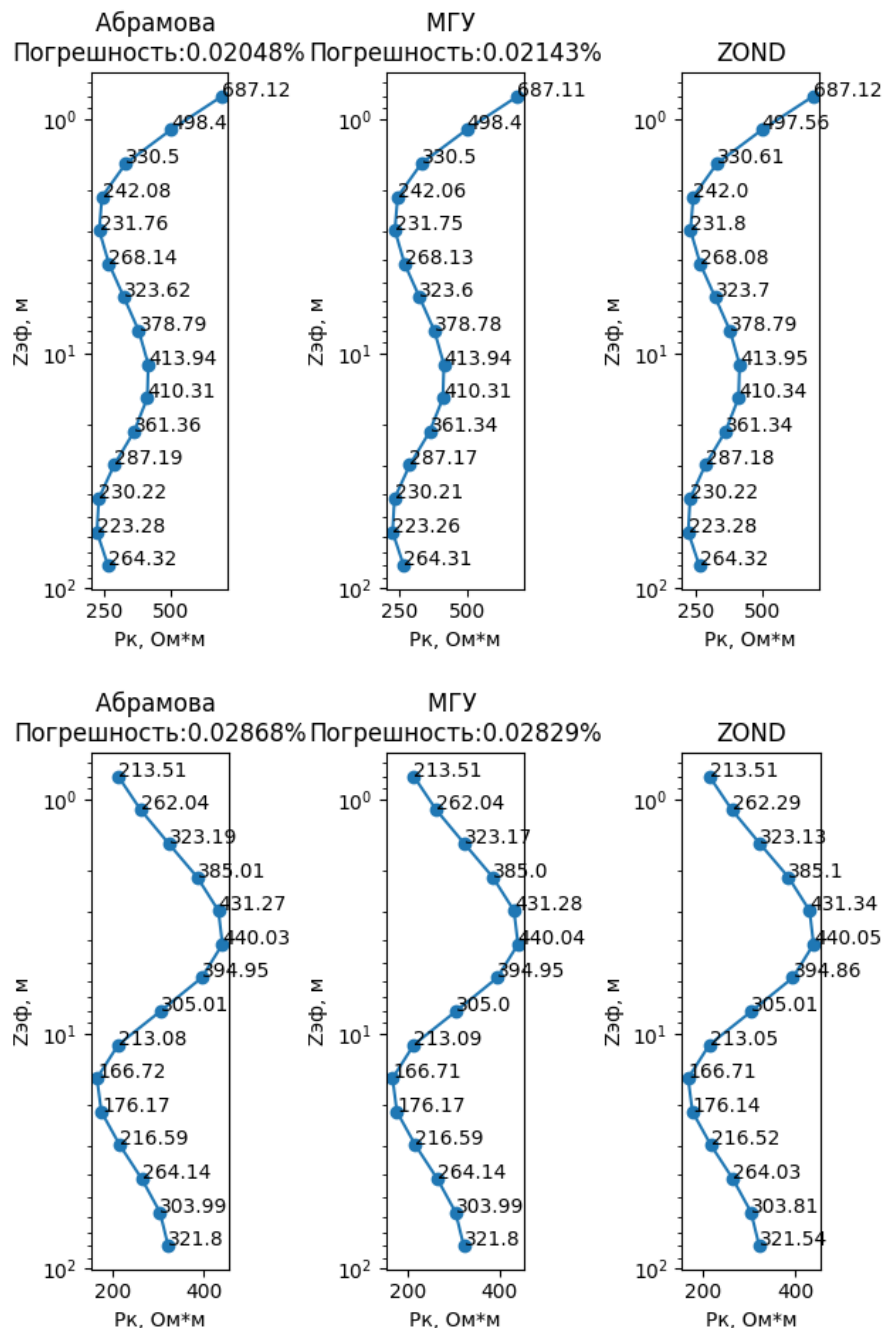


Рис. 1. Сравнение кривых КС для высококонтрастных пятислойных моделей геоэлектрической среды

Таблица 1

Результаты сопоставления эталонных и модельных кривых КС

№ модели	Параметры геоэлектрического разреза						Погрешность, %	
							Фильтр Абрамовой	Фильтр МГУ
1	h, м	1.0	2.5	∞			0.020	0.022
	p, Ом*м	20.0	150.0	300.0				
2	h, м	1.0	2.5	∞			0.027	0.023
	p, Ом*м	300.0	150.0	20.0				
3	h, м	1.0	2.5	∞			0.003	0.003
	p, Ом*м	150.0	200.0	150.0				
4	h, м	1.0	2.5	∞			0.022	0.023
	p, Ом*м	150.0	20.0	150.0				
5	h, м	1.0	3.5	10.0	45.0	∞	0.021	0.021
	p, Ом*м	1000.0	150.0	1000.0	100.0	1000.0		
6	h, м	1.0	3.5	10.0	45.0	∞	0.029	0.028
	p, Ом*м	150.0	1000.0	50.0	1050.0	100.0		

Скорость работы программы зависит от фильтра, разносов питающей линии АВ, количества слоев геоэлектрической модели. Так как тестируемые фильтры имеют одинаковое количество коэффициентов, разницы во времени работы программы при их применении нет. Измерения скорости приведены в таблице 2.

Таблица 2

Затраты времени на работу программы для различных входных условий

Число слоев	Время работы программы, мкс					
	Количество разносов, с шагом:					
	равным q			не равным q		
	10	15	20	10	15	20
2	2.9	2.9	2.9	7.9	7.9	8.0
3	2.9	2.9	3.0	7.9	8.0	8.1
4	3.0	3.0	3.0	7.9	8.0	8.1
5	3.0	3.1	3.1	7.9	8.0	8.1

По результатам сравнения видно, что время работы сокращенного варианта программы для одной и той же модели среды при увеличении числа разносов практически не изменяется, а стандартного – заметно увеличивается. Кроме того, сокращенный вариант работы программы за счет предотвращения выполнения уже выполненных расчетов (в случае совпадения шага геометрической прогрессии разносов и абсцисс фильтра) в любом случае работает как минимум в 2.5 раза быстрее стандартного варианта.

Разработанная программа опубликована в открытом доступе на GitHub [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акуленко С.А., Березина С.А., Бобачев А.А., Большаков Д.К., Горбунов А.А., Игнатова И.Д., Любчикова А.В., Марченко М.Н., Модин И.Н., Перваго Е.В., Рыжов А.А., Симонс М.М., Смирнова Т.Ю., Шевкин В.А., Яковлев А.Г. Электроразведка методом сопротивлений М.: Изд-во МГУ, 1994. – 160 с.
2. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований М.: Научный мир, 2007. – 248 с.
3. Куфуд О. Зондирование методом сопротивлений. – Пер. с англ. М.: Недра
4. O'Neill, D.J., Merrick, N.P. A digital linear filter for resistivity sounding with a generalized electrode array Geophysical Prospecting 32, 1984. – 105-123 с.
5. Репозиторий GitHub с опубликованной программой VES-Forward [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/Kocherga228/VES-Forward> (дата обращения: 13.02.2025)

ALGORITHM FOR SOLVING THE FORWARD VES PROBLEM BY LINEAR FILTRATION METHOD

Bukhteev Evgeniy

PSU, Perm

Anti-karst and coastal protection LLC, Perm

Summary. Solving a forward problem is a key algorithm for interpretation of data obtained by vertical electrical sounding method (VES). The paper describes an algorithm for solving a forward problem by linear filtering method, a program implemented it developed by the author, and presents measuring the developed program`s running time and comparison of work results with existing analogues.

Key words: vertical electrical sounding, forward problem, linear filtering, electrical exploration, algorithm.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бухтеев Евгений Михайлович

buxteev03@mail.ru

ООО “ПКИБЗ”, г. Пермь, помощник инженера

Научный руководитель: Долгаль Александр Сергеевич, д.ф.-м.н.

УДК 550.8.013

СРАВНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

*Годунова Анна Сергеевна, Рахматуллин Вадим Сергеевич,
Ахметшин Руслан Рустемович, Баранов Денис Сергеевич
КФУ, г. Казань*

Аннотация. Процесс построения геологической модели месторождения и последующий подсчет запасов выполняются с использованием специализированного программного обеспечения, и выбор подходящей платформы играет решающую роль в эффективности работы геологов и геофизиков. В современном мире, умение работать с различными программными продуктами приобретает критическое значение. Санкции и ограничения, накладываемые на использование определенного программного обеспечения, становятся всё более распространенным явлением, создавая необходимость в гибкости и адаптивности специалистов. Поэтому способность быстро и эффективно переключаться между различными платформами является не просто преимуществом, а настоящей потребностью для успешной профессиональной деятельности. В данном проекте представлены результаты построения геологической модели для подсчета запасов в таких программных обеспечениях как Petrel – являющейся зарубежной программой, и tNavigator – российской программой.

Ключевые слова: геологическое моделирование, программное обеспечение, модель, подсчет запасов, куб насыщения, пористости и фаций.

Современные трехмерные геологические модели нефтегазовых месторождений представляют собой детальные трехмерные двойники месторождений, которые включают в себя результаты комплексных исследований всех геологических аспектов месторождений: данные геофизических исследований скважин; данные о геологии и седиментологии отложений, слагающих залежь; данные палеонтологических, минералогических, литологических исследований каменного материала; результаты интерпретации данных сейсморазведки [2].

Основной целью геологической модели месторождения является создание основы для дальнейшего моделирования движения флюидов в пределах моделируемого месторождения. Также важным аспектом моделирования является возможность подсчета геологических запасов.

Технология геологического моделирования 3D включает в себя следующие этапы:

1. Сбор, анализ и подготовка необходимой информации, загрузка данных.
2. Структурное моделирование (создание каркаса).
3. Создание сетки (3D-грида), осреднение (перенос) скважинных данных на сетку.
4. Фациальное (литологическое) моделирование.
5. Петрофизическое моделирование.
6. Подсчет геологических запасов.

В связи со сложившейся ситуацией в мире стала очень актуальной проблема импортозамещения – замена иностранного программного обеспечения (ПО) на отечественные.

Основной задачей данной работы является построение геологической модели в двух программных продуктах и сопоставление их результатов. В ходе исследования, были сопоставлены результаты подсчета запасов, с целью выявления сходств и различий в расчетных параметрах отечественного и зарубежного программных продуктах, а также определения преимуществ и недостатков каждого ПО.

В качестве отечественного ПО был выбран tNavigator. В 2017 году tNavigator включён в реестр отечественного программного обеспечения Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.

Структура ПО tNavigator представляет собой единый программный пакет, в котором можно создавать геологические и динамические модели нефтегазовых месторождений, модели PVT свойства, поверхностную сеть, производить расчёт модели, а также анализировать неопределённости в рамках единого интерфейса [5].

Программную платформу Petrel разрабатывает компания Schlumberger, которая помимо консалтинга и разработки IT решений предоставляет различные нефтесервисные услуги [4]. Petrel является программным пакетом, который позволяет клиентам строить модель пласта от SEG-Y куба до масштабированной сетки со свойствами для экспорта в имитационную модель [2]. В данном ПО интегрированы рабочие процессы для коллективной работы, объединяющие в единую технологическую цепочку геофизику, геологию и разработку месторождений, и открывающие путь к описанию резервуаров в режиме реального времени [6].

Сравнение различных параметров. Геологическое моделирование в программных продуктах Petrel и tNavigator имеет свои особенности, связанные с функциональностью, подходом к моделированию и интеграцией с другими инструментами. Вот основные различия, которые были отмечены в ходе исследования:

1. Разработчики и экосистема:

- Petrel: разработан компанией Schlumberger. Это мощный инструмент, интегрированный в экосистему Schlumberger, включая решения для сейсмической интерпретации, гидродинамического моделирования и анализа данных.
- tNavigator: разработан компанией Rock Flow Dynamics (RFD). Это более специализированное решение, ориентированное на эффективное моделирование и симуляцию, с акцентом на высокую продуктивность и удобство использования.

2. Подход к моделированию:

- Petrel: предлагает комплексный подход к геологическому и гидродинамическому моделированию. Включает широкий набор инструментов для построения структурных моделей, сеток, фациального и петрофизического моделирования. Petrel часто используется для сложных проектов, где требуется интеграция сейсмических данных и детальное моделирование.
- tNavigator: делает упор на скорость и эффективность расчетов. Поддерживает современные методы моделирования, такие как адаптивные сетки и параллельные вычисления. tNavigator часто выбирают для проектов, где важна скорость моделирования симуляции и обработки больших объемов данных.

3. Производительность:

- Petrel: может быть ресурсоемким, особенно при работе с большими моделями и сложными расчетами. Однако он предлагает широкие возможности для детализации и анализа.
- tNavigator: известен своей высокой производительностью благодаря оптимизированным алгоритмам и поддержке GPU-ускорения. Это позволяет быстрее

выполнять симуляции и обрабатывать большие объемы данных.

4. Интеграция с другими инструментами:

- Petrel: хорошо интегрирован с другими продуктами Schlumberger, такими как Eclipse (гидродинамическое моделирование) и Techlog (анализ данных ГИС). Это делает его удобным для комплексных проектов.

- tNavigator: также поддерживает интеграцию с другими инструментами, но его основное превосходство – это гибкость в использовании.

5. Пользовательский интерфейс и обучение:

- Petrel: имеет сложный интерфейс, требующий обучения для эффективного использования. Однако он предоставляет больше возможностей для кастомизации и детального анализа.

- tNavigator: интерфейс более интуитивный и удобный для пользователей, что сокращает время на обучение и внедрение.

6. Цена и лицензирование:

- Petrel: обычно дороже из-за широкого функционала и интеграции с другими продуктами Schlumberger.

- tNavigator: доступная стоимость для большинства организаций, особенно для небольших компаний или проектов.

7. Поддержка и сообщество:

- Petrel: имеет большое сообщество пользователей и обширную документацию, что облегчает поиск решений и обучение.

- tNavigator: сообщество меньше, но разработчики активно поддерживают пользователей, а продукт постоянно обновляется.

Итог:

- Petrel подходит для комплексных проектов, где требуется детальное моделирование и интеграция с другими инструментами.

- tNavigator выбирают для проектов, где важны скорость моделирования и простота использования.

Выбор между ними зависит от конкретных задач, бюджета и предпочтений пользователя.

Для сравнительного анализа геологического моделирования в двух ПО было выбрано нефтяное месторождение, расположенное на юго-востоке Республики Татарстан. В геологическом строении рассматриваемой площади по данным бурения принимают участие породы кристаллического фундамента архейско-раннепротерозойского возраста и осадочного чехла, представленного отложениями девонской, каменноугольной, пермской и четвертичной систем. Нефтяные залежи выделяются в отложениях верхнего и среднего карбона.

Ниже представлены геологические кубы, построенные в двух программных продуктах, с целью их качественного сравнения.

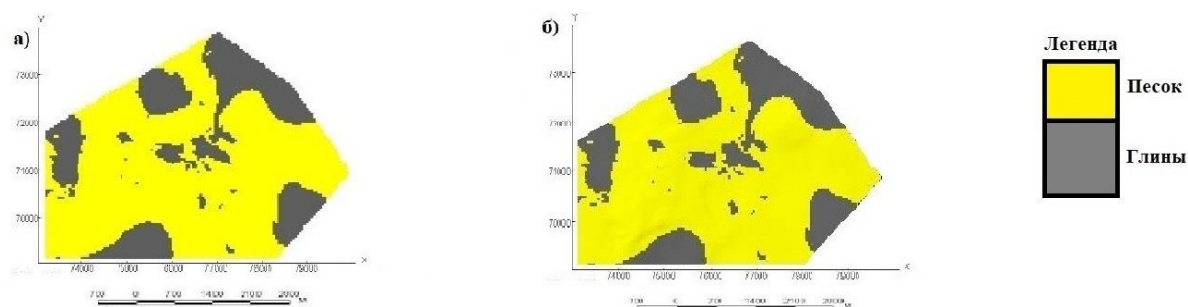


Рис. 1. Куб фаций в 2D window: а) tNavigator; б) Petrel

Определение запасов начинается с создания дискретного куба литофаций, который позволяет детально проанализировать строение и определить наиболее перспективные зоны залегания. Сравнение результатов фациального моделирования отображено на рисунке 1.

После моделирования литологий с учетом пространственных закономерностей распределения каждой фации строятся непрерывные кубы пористости, проницаемости, которые должны достоверно воспроизвести пространственное распределение петрофизических свойств [3]. Визуальное сравнение кубов пористости показано на рисунке 2.

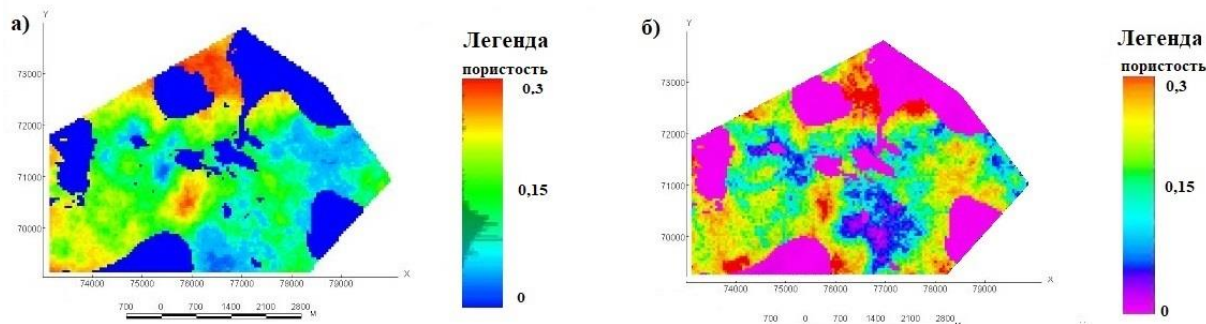


Рис. 2. Куб пористости в 2D window: а) tNavigator; б) Petrel

Для подсчета запасов еще одним необходимым параметром является коэффициент нефтенасыщенности. Для расчета использовали J-функцию Леверетта, чтобы учесть переходную зону. Результаты моделирования нефтенасыщенности в 2D окне приведено на рисунке 3.

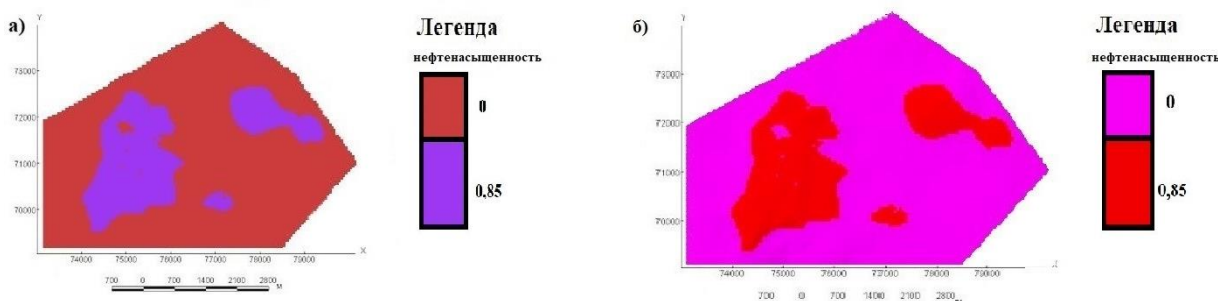


Рис. 3. Куб нефтенасыщенности в 2D window: а) tNavigator; б) Petrel

Таблица 1
Сравнение объемов запасов нефти месторождения N в ПО Petrel и tNavigator

ПО	tNavigator	Petrel	Расхождения, %
Общий объём породы, ст. м ³	81562896	79479261	2.5
Эффективный объём продуктивной части пласта, ст. м ³	74325877	72167939	2.9
Поровый объём, ст. м ³	13051531	12817027	1.7
Начальные геологические запасы нефти (в ст. усл.), ст. м ³	10808584	10406916	0.04

Одним из ключевых назначений геологической модели является количественная оценка геологических запасов. Таблица 1 демонстрирует результаты подсчета запасов с

использованием детерминистических методов в двух программных продуктах и их сравнительный анализ.

В результате построения и сравнения геологических моделей в отечественном и зарубежном ПО были выделенные следующие преимущества и недостатки Petrel и tNavigator.

1. Преимущества Petrel:

1. Интуитивно понятный интерфейс для пользователей.
2. Широкие возможности для визуализации данных.
3. Поддержка интеграции с различными источниками данных и инструментами.
4. Множество встроенных функций для геологического моделирования и симуляции.

2. Недостатки Petrel:

1. Высокая стоимость лицензии.
2. Требуется значительных ресурсов для работы.
3. Может быть сложным для новичков.

3. Преимущества TNavigator:

1. Эффективные алгоритмы симуляции для повышения производительности.
2. Хорошо подходит для крупных проектов с большими объемами данных.
3. Поддержка различных типов моделей и сценариев.

4. Недостатки TNavigator:

1. Менее интуитивный интерфейс по сравнению с Petrel.
2. Ограниченные возможности визуализации.
3. Может потребовать больше времени на обучение для пользователей.

Результаты исследования. В ходе геологического моделирования выбранного объекта исследования в двух ПО Petrel и tNavigator и подсчета запасов в них было выявлено, что объемы запасов получились примерно равными (разница составляет 401668 ст. м³ (0.04 %)). Расхождения вполне объясняются стохастикой и параметрами настроек вариограмм.

Выбор программы для моделирования зависит от конкретных задач и требований проекта. Если необходима высокая детализированность и интеграция с другими инструментами и большая функциональность, лучше выбрать Petrel. В случаях, когда необходима высокая производительность при работе с большими объемами данных и симуляцией, то tNavigator будет более подходящим.

Несмотря на отмеченные недостатки, ПО tNavigator – отечественная программа, имеющая поддержку на русском языке, что является преимуществом для решения задач, поставленных в данном исследовании. При актуальной проблеме импортозамещения необходимо продолжать исследовать продукты для геологического моделирования по другим параметрам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков Е.А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа: учебное пособие / Е.А. Гладков; Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 99 с.
2. Закревский К. Е., Попов В. Л. История развития трехмерного геологического моделирования как метода изучения залежей нефти и газа. Текст: электронный // Известия ТПУ. 2021. № 5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-razvitiya-trehmernogo-geologicheskogo-modelirovaniya-kak-metodaizucheniya-zalezhey-nefti-i-gaza> (дата обращения: 06.02.2025).

3. Перевертайло, Т. Г. Основы геологического 3D-моделирования в ПК Petrel «Schlumberger»: учебное пособие / Т. Г. Перевертайло. — Томск: ТПУ, 2017. — 112 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа (для авториз. Пользователей): <https://e.lanbook.com/book/106749> (дата обращения: 10.02.2025) С. 70.
4. Рогожнева, В. О. Актуальные направления развития цифровых технологий в геологическом моделировании / В. О. Рогожнева // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных : Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, приуроченной к празднованию 300-летия Российской академии наук, Омск, 25–26 апреля 2024 года. — Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2024. — С. 586-590. — EDN KINEDZ.
5. Rock Flow Dynamics. Техническое руководство tNavigator. — сентябрь 2021. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://rfdyn.com/> (дата обращения: 10.02.2025)
6. Schlumberger | Software [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://digital.slb.ru/products/petrel/>. (дата обращения: 12.02.2025)

COMPARISON OF THE PRINCIPLES OF CONSTRUCTION AND THE RESULTS OF GEOLOGICAL MODELING USING DOMESTIC AND FOREIGN SOFTWARE

*Godunova Anna Sergeevna, Rakhmatullin Vadim Sergeevich,
Akhmetshin Ruslan Rustemovich, Baranov Denis Sergeevich
KFU, Kazan*

Summary. The process of constructing a geological model of a deposit and the subsequent calculation of reserves is often performed using specialized software, and choosing the appropriate platform plays a crucial role in the efficiency of geologists and geophysicists. In today's world, the ability to work with various software products is of critical importance. Sanctions and restrictions imposed on the use of certain software are becoming more common, creating the need for flexibility and adaptability of specialists. Therefore, the ability to quickly and efficiently switch between different platforms is not just an advantage, but an urgent need for successful professional activity. This project describes and applies techniques for calculating stocks in software such as Petrel, which is a foreign program, and tNavigator, a Russian program.

Key words: geological modeling, software, model, inventory calculation, saturation cube, porosity and facies.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Годунова Анна Сергеевна

godunchik18@gmail.com

КФУ, г. Казань, магистрант 2 года обучения

Рахматуллин Вадим Сергеевич

r.vadim0108@gmail.com

КФУ, г. Казань, магистрант 2 года обучения

Ахметшин Руслан Рустемович

aruslan2110@gmail.com

КФУ, г. Казань, магистрант 2 года обучения

Баранов Денис Сергеевич

list.denis.list1@mail.ru

КФУ, г. Казань, магистрант 2 года обучения

Научный руководитель: Ячменёва Екатерина Анатольевна, к. г.-м. н.

УДК 550.34.013.2

**АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРОЦЕССА ИНТРУЗИИ
ПЕРЕД ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА АВГУСТИНА 2006-ГО ГОДА**^{1,2}*Греков Евгений Михайлович*¹*ИТПЗ РАН, г. Москва*²*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

Аннотация. В работе анализируется сейсмический режим землетрясений, наблюдавшихся перед извержением вулкана Августина на Аляске, которое длилось с 11.01.2006 по 16.03.2006. Известно, что этому извержению предшествовал длинный рой сейсмических событий, оканчивающийся интрузией магмы по дайке и извержением. В данной работе уделяется особое внимание анализу группирования сейсмических событий в период интрузии.

Ключевые слова: вулканическая сейсмичность, группирование сейсмичности, метод ближайшего соседа.

Работа посвящена исследованию сейсмичности, предвещающей извержения вулкана Августина 2006-го года на Аляске. Основная идея заключается в том, чтобы использовать вулканическую сейсмичность, как инструмент для исследования закономерностей землетрясений в целом. Интрузию в каком-то смысле можно представить, как разрушение пород под влиянием сильного относительно локального воздействия – давление магмы. В таком случае интересно исследовать сейсмический режим такого процесса. Особый интерес представляет группирование событий. Для тектонической сейсмичности хорошо известно явление афтершоковой активности, однако механизм этого явления пока не в полной мере ясен. Также нет однозначного мнения насчет того, что влияет на интенсивность афтершоковой активности в том или ином случае (например, известно, что она падает с глубиной [1]). Существует гипотеза, что это сильно зависит от степени «подготовленности» среды к разрушению [2]. В таком случае изучение группирования событий при «форсированном» разрушении внешним по отношению к среде воздействием (интрузия) может дать новую информацию об этих проблемах.

Для анализа мы используем данные каталога вулканической обсерватории Аляски (AVO) [3], который покрывает период с 1989 по 2018 годы. В работе [4] был проведен анализ этой сейсмичности, в результате которого было выявлено начала процесса сейсмической активизации вулкана 30.04.2005. Все события сфокусированы в узкой круговой области на малой глубине под вулканической постройкой. С началом сейсмической активизации появились радиальные деформации вулканической постройки, которые можно смоделировать сферическим источником [5]. Сейсмичность на этой фазе довольно однородная, имеет относительно малые магнитуды и высокое значение наклона (b) частотно-магнитудного распределения [6]. Затем характер деформаций меняется, считается, что это знаменует начало процесса интрузии [5], сейсмический режим также меняется: растет число и магнитуды событий, а значение b падает. В данной работе граница двух фаз проведена по дате 21.11.2005 на основе изменений сейсмического режима. Вторая фаза оканчивается датой 10.01.2006 с последующим извержением (рис. 1).

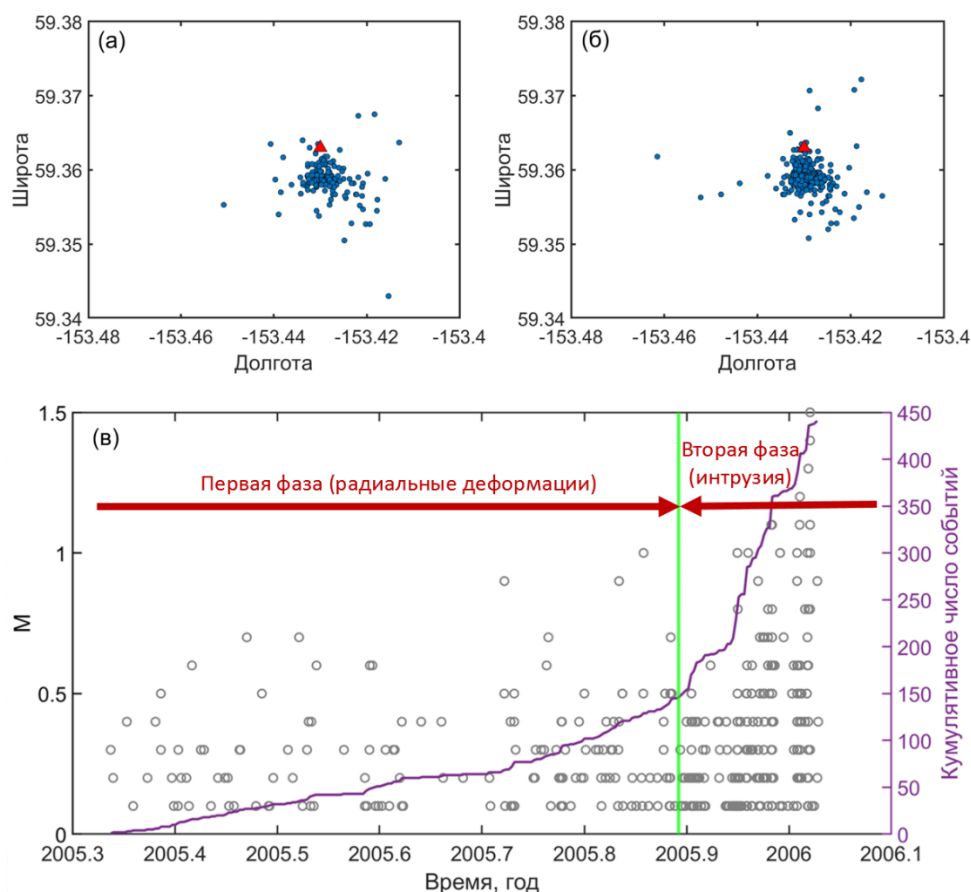


Рис. 1. Распределение событий выше порога представительности ($M_c = 0.1$) в пространстве и времени для исследуемого в работе участка. Пространственное распределение: (а) – для первой фазы (до 21.11.2005), (б) – для второй фазы (после 21.11.2005). Синие кружки – эпицентры землетрясений, красный треугольник – примерное место извержения вулкана Августина 2006-го года. (в) – распределение событий во времени. Кружки – землетрясения, фиолетовая линия – кумулятивное число событий. Вертикальная линия соответствует дате 21.11.2005, разделяющей две фазы длинного роя

Для анализа группирования сейсмичности в этой работе используется метод ближайшего соседа Бен-Зиона–Заляпина [7, 8]. Этот метод широко применяется для выделения афтершоков в тектонической сейсмичности. Его суть заключается во введении обобщенного расстояния между землетрясениями, зависящего от временного и пространственного расстояния между событиями и их магнитуд. Далее с помощью такой метрики для каждого события определяется его ближайший сосед в пространстве время-расстояние-магнитуда и строится распределение расстояний до ближайшего соседа. Если рассматриваемая сейсмичность неоднородна, то есть в ней присутствуют процессы с разными масштабами обобщенных расстояний, то на распределении мы увидим несколько мод. Так в случае тектонической сейсмичности часто наблюдается две моды, моду с меньшими обобщенными расстояниями обычно соотносят с афтершоковой активностью, поэтому далее события разделяют на связанные (кластеризованные) и несвязанные (фоновые). Должна ли афтершоковая мода выделяться при изучении вулканической сейсмичности, является открытым вопросом.

В данной работе из-за высокой концентрации событий в небольшой области пространства пришлось исключить из функции близости влияние пространственного расстояния между событиями. После применения метода было обнаружено, что во время

первой фазы афтершоковая мода практически отсутствует, распределение расстояний до ближайшего соседа одномодально и совпадает с распределением перемешанного каталога, что можно использовать как свидетельство отсутствия группирования [9]. Во время же второй фазы (интрузии) сейсмичность оказалась неоднородна, проявляя две моды, то есть можно сказать, что в фазе выделяются кластеры событий. После разделение событий на две соответствующие группы, оказалось, что группа с большими обобщенными расстояниями (несвязанные) схожа по параметрам с сейсмичностью первой фазы, вторая же (кластеризованные) имеет более высокие магнитуды событий и более низкое значение b . То есть можно предположить, что одна часть сейсмичности связана с радиальными деформациями, которые вероятно вызваны общим повышением давления в магмовой камере, она некластеризованна, имеет высокое значение b и малые магнитуды, а вторая связана именно с разрушением в результате интрузии.

Таблица 1

Параметры сейсмических режимов первой фазы и двух групп событий во второй фазе

	b	M_{max}	Средняя магнитуда
Первая фаза	1.822	1	0.2766
Несвязанные второй фазы	1.906	1.1	0.2726
Кластеризованные второй фазы	0.989	1.5	0.4401

При более подробном рассмотрении кластеризованной части второй фазы можно увидеть, что сами кластеры тоже объединяются в серии, между которыми происходит затишье (рис. 2).

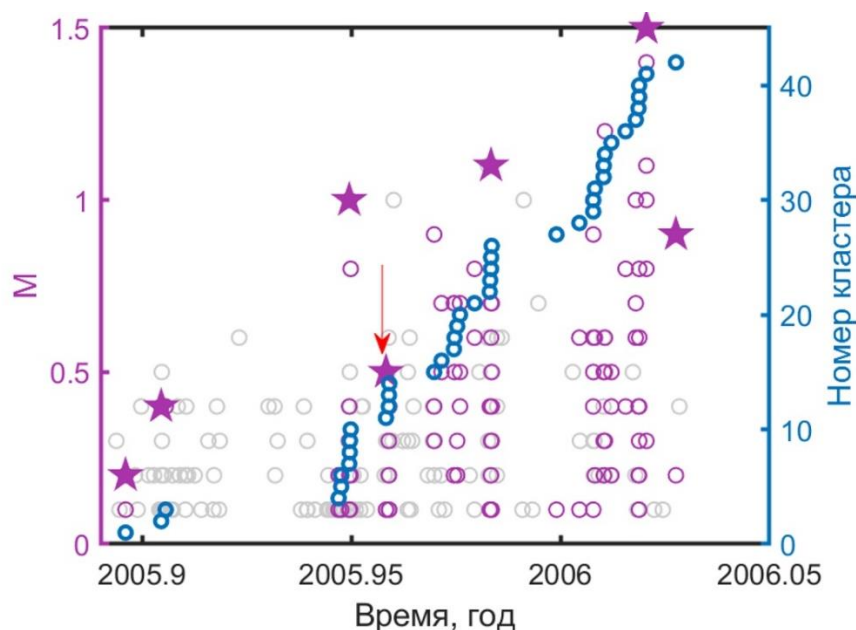


Рис. 2. Распределение кластеров второй фазы во времени. Синие кружки – среднее положение событий кластера во времени, при этом значение по вертикали – порядковый номер кластера. Фиолетовые кружки – события, входящие в кластеры, серые – остальные, несвязанные события; фиолетовыми звездами показаны сильнейшие события в сериях кластеров. Красной стрелкой отмечена серия, выпадающая из общей закономерности

Причем большая часть таких серий оканчивается наиболее сильным событием в серии. Это можно объяснить следующей обобщенной схемой: для разрушения среды необходимо накопить достаточное количество напряжений, которые постепенно копятя под давлением магмы (затишье), затем происходит постепенное развитие макроразрушения, начинающегося с малых масштабов, после разрушения напряжения сбрасываются и начинают копиться заново.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V. Earthquake productivity law // *Geophys. J. International*. 2020. V. 222. Iss. 2. P. 1264–1269. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252>
2. Narteau C., Shebalin P., Holschneider M. Temporal limits of the power law aftershock decay rate // *J. Geophys. Res.* 2002. 107(B12), 2359, DOI:10.1029/2002JB001868.
3. Power J.A., Friberg P.A., Haney M.M., Parker T., Stihler S.D., Dixon J.P. A unified catalog of earthquake hypocenters and magnitudes at volcanoes in Alaska—1989 to 2018 // U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report. 2019, 2019–5037, 17 p., DOI: <https://doi.org/10.3133/sir20195037>. Available at: <https://pubs.usgs.gov/publication/sir20195037>
4. Jacobs K., McNutt S. Using seismic b-values to interpret seismicity rates and physical processes during the preeruptive earthquake swarm at Augustine Volcano 2005–2006. // *US Geological Survey Professional Paper*. 2010. P. 59–75.
5. Cervelli P. F., Fournier T., Freymueller J., Power J. A. Ground deformation associated with the precursory unrest and early phases of the January 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska // *Geophys. Res. Lett.* 2006, 33, L18304, DOI:10.1029/2006GL027219.
6. Gutenberg B., Richter C. Frequency of earthquakes in California // *Nature*. – 1944. – Vol. 156 – P. 371–371.
7. Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V.I., Wong H. Clustering analysis of seismicity and aftershock identification // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. 018501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.018501
8. Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2013. V. 118. P. 2847–2864, DOI: 10.1002/jgrb.50179
9. Баранов С.В., Шебалин П.Н. Закономерности постсейсмических процессов и прогноз опасности сильных афтершоков, М.: РАН, 2019. 218 с.

ANALYSIS OF THE SEISMIC REGIME OF THE INTRUSION BEFORE THE ERUPTION OF AUGUSTINE VOLCANO IN 2006

^{1,2}*Grekov Evgenii*

¹*IEPT RAS, Moscow*

²*MSU, Moscow*

Summary. The seismic regime of earthquakes observed before the eruption of the Augustine volcano in Alaska, which lasted from 11.01.2006 to 16.03.2006, is analyzed in the paper. It is known that this eruption was preceded by a long swarm of seismic events ending with the magma dike intrusion and the eruption. This paper is focused on the analysis of the grouping of seismic events during the intrusion.

Key words: volcanic seismicity, clustering of seismicity, nearest neighbor method.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Греков Евгений Михайлович

grekov.em16@physics.msu.ru

ИТПЗ РАН, м.н.с.

МГУ им. Ломоносова, аспирант

УДК 550.8.052

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПОВТОРЯЮЩИХСЯ ТРЕХМЕРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

*Добровольская Александра Егоровна
МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

Аннотация. Создание графа обработки (кросс-эквализации) повторяющихся наземных сейсмических данных, который обеспечивает выделение 4D сигнала, на примере сухопутных сейсмических данных Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. Разработка методики, которая позволяет устранить факторы, связанные с влиянием геологических особенностей, выделив только фактор флюидонасыщения.

Ключевые слова: сейсморазведка повторяющийся съемок, сейсмический мониторинг, Time Lapse, 4D сигнал, обработка данных сейсморазведки, крос-эквализация.

Сейсморазведка повторяющийся съемок, также известная как сейсморазведка 4D, сейсмический мониторинг и Time Lapse, является эффективным инструментом для контроля замещения пластового флюида [2] и заключается в обработке повторных 3D съемок для отображения изменений потока подземных флюидов с течением времени. Поскольку на сегодняшний день 3D сейсморазведка сама по себе является единственным надежным способом пространственного картирования свойств залежей углеводородов в межскважинном пространстве, сейсмический 4D мониторинг способен значительно увеличить производительность, оптимизировать процесс и снизить затраты на освоение месторождения за счет выявления и прогнозирования процессов, происходящих в залежах во время их эксплуатации, и продлить срок жизнь самого месторождения.

Поскольку морские 3D работы отличаются высокой производительностью и низкой стоимостью работ по сравнению с наземными съемками, сегодня технология 4D применяется преимущественно к морским исследованиям. Однако акваторные 4D данные имеют важный недостаток, который заключается в трудностях обеспечения совпадения физических наблюдений не только в масштабе времени мониторинга, но и в масштабе времени самой съемки. Для буксируемых кос и донных станций пространственное положение пунктов приема в каждый момент времени взрыва изменяется не систематически. В случае же наземных съемок несмотря на то, что повторные съемки могут иметь различную, но строго определенную и повторяющуюся, геометрию наблюдений, изменения приборов в пространственном положении каждой съемки и относительно друг друга являются систематическими, что делает обработку данных более оптимальной.

Данное исследование нацелено на разработку графа обработки наземных данных повторяющихся съемок для выделения 4D сигнала, несущего информацию о флюидонасыщении на примере материалов Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения, которое находится в активной эксплуатации.

Обработка 4D данных состоит из специальных методов обработки изображений, применяемых к двум или более кубам сейсмических данных разных лет. Алгоритмы предназначены для минимизации различий в изображениях, вызванных несовершенством повторяющимися сейсмическими съемками [3] и выделению так называемого 4D-сигнала, который несет в себе информацию об изменении потока флюида [1]. Однако, в силу относительной новизны технологии наземного 4D мониторинга, в отрасли пока что не разработан стандартный граф обработки повторяющихся съемок.

Алгоритмы обработки сейсмических данных 4D предназначены для минимизации амплитудных, фазовых, временных и частотных различий. Кросс-эквилизация – это термин, обозначающий общий набор процедур, устраняющих систематические различия между съемками, которые предположительно возникают из-за несовпадения сейсмических съемок или обработки [4].

Перед применением кросс-эквилизации данные съемок 2007 и 2022 годов были выгружены в ПО в виде сейсмических кубов данных сейморазведки ОГТ, обработанных до этапа миграции включительно. Была проведено бинирование, проверка правильности ввода геометрии, оценка качества данных с помощью некоторых атрибутов и введена поправка за рельеф.

Сам граф обработки включает в себя коррекцию линейных и перекрестных сдвигов во времени и фазе, статических временных сдвигов трассировки; амплитудно-частотную балансировку; фазовую коррекцию. Финальной частью является адаптивное вычитание для выделения 4D сигнала. В более детальном рассмотрении граф обработки данных представляет из себя следующий набор функций:

- Сопоставление кубов данных для определения постоянных линейных, перекрестных, временных и фазовых сдвигов, поиск их оптимальных комбинаций, которые приведут к наилучшему выравниванию
- Вычисление и применение временных сдвигов трассировки, которые лучше всего выравнивают оба набора данных
- Расчет огибающей амплитуды в качестве первого шага в процессе перекрестного выравнивания амплитуд между двумя наборами данных
- Балансировка амплитудных спектров для создания общего амплитудного спектра с целью оптимизации дальнейшей обработки перекрестной коррекцией.
- Вычисление и применение фазовых сдвигов трассировок, которые лучше всего выравнивают два набора данных.
- Вычисление единого коэффициента усиления, который минимизирует разницу амплитуд между двумя наборами данных.
- Адаптивное вычитание одного набора данных из другого, получение 4D-сигнала

На рисунках ниже представлены фрагменты временных кубов до кросс-эквилизации (рис. 1) и после, а также выделенный 4D сигнал (рис. 2). Можно наблюдать очевидное улучшение спектральных характеристик и приведение их к единому виду наряду с эффектом коррекции различных сдвигов. Из правого рисунка видно, что после кросс-эквилизации и адаптивного вычитания на разрезе осталась преимущественно сигнал, указывающий на изменения в залежи.

На рисунке 3 представлен фрагмент временного куба (2022 г.) после кросс-эквилизации с наложением 4D сигнала (красное – положительные амплитуды, зеленое – отрицательные) Исходя из нефтегазоносности данного района, на глубине примерно 600 мс находится газоконденсатная залежь, приуроченная к сеноманскому горизонту отложений углеводородов. Данная иллюстрация показывает, что 4D сигнал несет в себе информацию практически исключительно о флюидонасыщении. Это говорит о том, что после применения разработанного графа было устранено подавляющее количество «геологического шума».

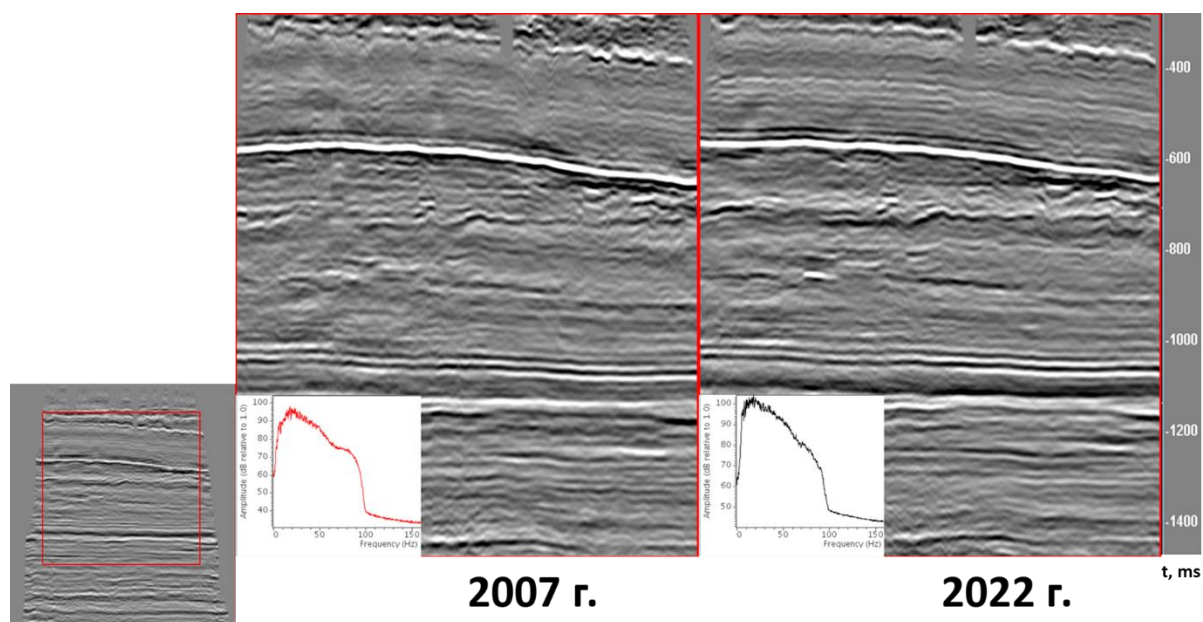


Рис. 1. Фрагменты временных кубов до кросс-эквализации

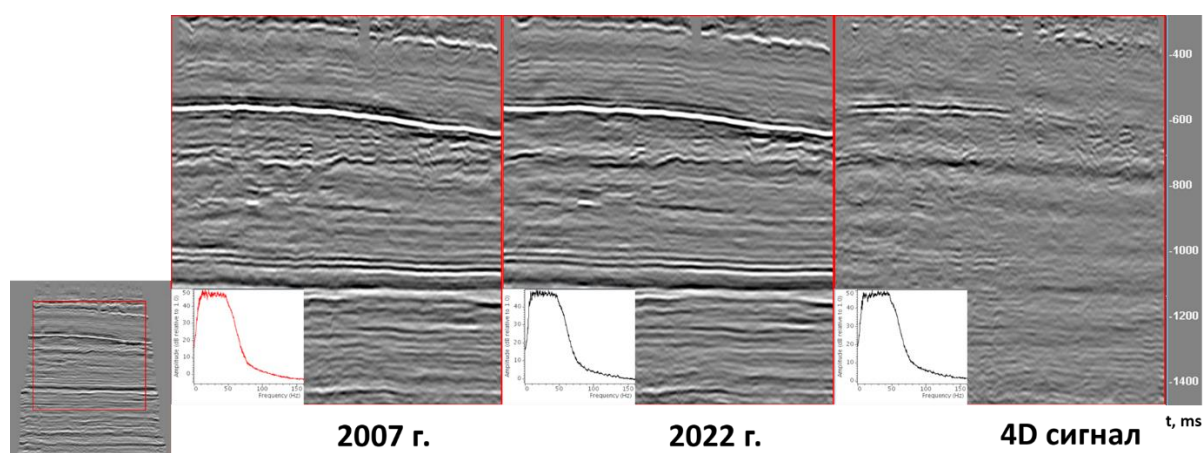


Рис. 2. Фрагменты временных кубов после кросс-эквализации

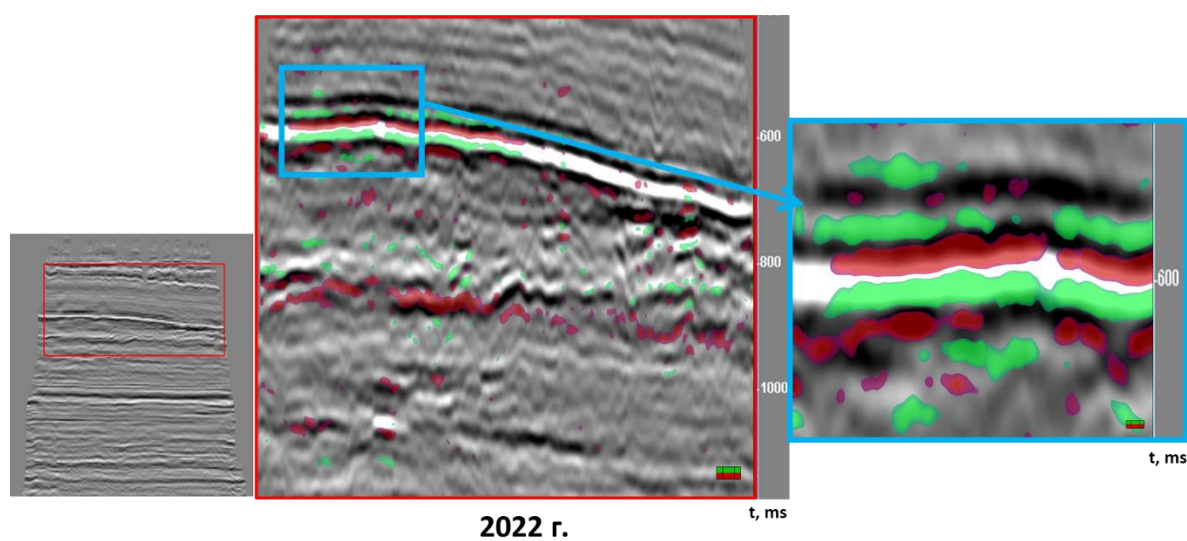


Рис. 3. Фрагмент временного куба (2022 г.) после кросс-эквализации с наложением 4d сигнала

В ходе исследования был составлен граф обработки повторяющихся сейсмических, который обеспечивает выделение 4D сигнала. Исходя из результатов, была выработана методика, которая позволяет устранить все факторы, связанные с влиянием геологических особенностей, выделив только фактор флюидонасыщения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lumley D. 4D Seismic Monitoring of Subsurface Fluid Flow // CSEG Recorder. 2009. Vol. 34. № 8. P. 16-18.
2. Phung K.T. Nguyen, Myung Jin Nam, Chanh Park. A review on time-lapse seismic data processing and interpretation // Geosciences Journal. 2015. Vol. 19. No. 2. P. 375-392.
3. Rickett J., Lumley D. A cross-equalization processing flow for off-the-shelf 4-D seismic data // Stanford Exploration Project. 1998. № 97. P. 265-275.
4. Rickett J., Lumley D., Martin H. An amplitude bias correction for 4D seismic cross-equalization // Stanford Exploration project. 1997. №95. P. 195-204.

REPEATED 3D SURVEYS: PECULIARITIES OF PROCESSING DATA

*Dobrovolskaya Alexandra
MSU, Moscow*

Summary. Creation of a seismic processing graph (cross-equalization) of repetitive land seismic data, which ensures the allocation of a 4D signal, using the example of land seismic data of the Bovanenkovo oil and gas condensate field. Development of a technique that allows eliminating factors associated with the influence of geological features, identifying only the fluid saturation factor.

Key words: seismic exploration repetitive surveys, seismic monitoring, Time Lapse, 4D signal, seismic exploration data processing, cross-equalization.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Добровольская Александра Егоровна
Dobrovolskaya007@yandex.ru

МГУ им. М.В. Ломоносова, аспирант

Научный руководитель: Жуков Александр Петрович, д.т.н.,

Коротков Илья Петрович, к.т.н.

УДК 551.243, 550.8.04

**ЛИНЕАМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ЮЖНОЙ ЧАСТИ
ПЕЧОРО-КОЖВИНСКОГО МЕГАВАЛА**

*Езимова Юлия Евгеньевна
ИГ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар*

Аннотация. В статье представлены результаты линеamentного анализа южной части Печоро-Кожвинского мегавала. Исследование включает как визуальное, так и автоматизированное выделение линеamentов. Сопоставление результатов показывает, что линейные зоны сгущения линеamentов чаще соответствуют долинам рек и границам болот, реже – поднятиям высотой до 150 м. По направлению преобладают линеamentы северо-восточного и субмеридионального простираний, что отличается от северо-западной ориентировки рифейских разломов. Радоновые аномалии интенсивностью 300–2000 Бк/м³ регистрируются над линеamentами различного простирания и узлами их пересечения.

Ключевые слова: разломы фундамента, линеamentы, объемная активность радона, автоматизированный линеamentный анализ.

Печоро-Кожвинский мегавал (ПКМ) – инверсионная структура первого порядка в составе Печоро-Колвинского авлакогена (ПКА), который в свою очередь протягивается в северо-западном направлении в центральной части Тимано-Печорской плиты. Печоро-Кожвинский мегавал имеет размеры 350 x 50 км. В фундаменте он представляет собой грабен, разбитый разломами на ряд ступенчатых блоков. Фундамент сложен метаморфическими породами протерозоя. Осадочный чехол представлен породами палеозойского и мезозойского возраста. Западная граница мегавала проходит по Припечорской системе глубинных разломов, отделяя его от Ижма-Печорской впадины. На юге и востоке ПКМ граничит с Денисовской впадиной, на юге и юго-востоке – со структурами Предуральского прогиба [1].

Печоро-Кожвинский мегавал и прилегающие территории характеризуются высокой геолого-геофизической изученностью. Систематические исследования начались во второй половине XX века и были направлены на поиск нефти и газа. В настоящее время на юге мегавала разрабатываются Северо-Кожвинское, Южно-Терехевейское, Кыртаельское, Печорогородское и др. месторождения нефти и газа (рис. 1).

Изучение и выделение разломов имеет важное значение для поиска, разработки и эксплуатации месторождений углеводородов. При изучении платформенных территорий на первый план выходят геофизические методы, такие как сейсморазведка, гравиразведка и магниторазведка для изучения разломов, не выходящих на поверхность.

Помимо геолого-геофизических методов для выделения разломов применяются дистанционные методы, включающие дешифрирование спутниковых снимков и цифровых моделей рельефа. Цель исследований сводится к выделению линеamentов в зоне сочленения Печоро-Кожвинского мегавала, Ижма-Печорской впадины и Предуральского прогиба и установлению их связи с разломами фундамента, выделенными по геофизическим данным [2].

В административном отношении район исследований расположен в бассейне рек Кожва и Печора. Размеры участка 75 x 80 км. Линеamentный анализ территории включает трассирование визуальных линеamentов на основе топокарт, цифровых моделей рельефа, космоснимков и автоматизированный – в программе LEFA.

В процессе выделения визуальных линеаментов использовались геоморфологические (прямолинейные участки речных русел, коленообразные изгибы рек, смещение гидросети вдоль протяженной линии, линейное расположение заболоченных участков; прямолинейные резкие границы между различными формами рельефа или природными ландшафтами) и геоботанические (резкая смена растительности) признаки. В результате визуального дешифрирования выделено 40 линейных структур, ориентированных по четырём направлениям: субмеридиональные – 14, субширотные – 4, северо-восточное – 14, северо-западное – 8 линеаментов. Длина составляет 7–58 км (рис. 1).

Поскольку визуальное выделение линеаментов зависти от опыта исследователя, то для корректного выделения линеаментов возможно применение автоматизированного компьютерного анализа [3]. За основу взята цифровая модель рельефа ArcticDEM с пространственным разрешением 100 м, что оптимально для выделения региональных линеаментов протяженностью 5–10 км и более. Предварительная обработка снимка осуществлялась в программе QGIS и включает обрезку, перепроцирование сглаживание, изменение контрастности, яркости. В качестве алгоритма обнаружения линейных элементов (штрихов) применялся метод Canny. Выделение линеаментов осуществляется методом вероятностного преобразования Хафа, который основан на разбивке и спрямлении элементов границ изображения. Штрихи объединяются в линеаменты на основании их коллинеарности. Параметры для обнаружения линейных границ выбирались из предложенных в программе, а именно preset “medium” для выделения штрихов и preset “fault def” – для линеаментов [3]. По результатам автоматизированного анализа построена схема плотности линеаментов. Области с аномально высокой плотностью линеаментов прослеживаются на всем участке исследований, особенно на востоке и юго-востоке. В рельефе эти зоны чаще соответствуют долинам рек и границам болот, реже поднятиям высотой до 150 м.

Наложение результатов визуального и автоматизированного анализа демонстрирует хорошую сходимость. Линеаменты проводятся по осям максимумов или ограничивают их. Таким образом, применение этих двух методов позволяет наиболее достоверно выделять линеаменты на местности.

Как показывают результаты (рис. 1), линеаменты располагаются в зоне влияния разломных систем фундамента, но не совпадают с ним. Разломы фундамента, сформированные на этапе байкальского тектогенеза, протягиваются в северо-западном направлении, что отличается от ориентации линеаментов, обусловленной современными тектоническими движениями.

На территории исследования проводилась профильная радоновая съемка как в поперечном, так и в продольном направлении линеаментов (рис. 1). Объемная активность радона (ОАР) измерялась в почвенном воздухе из устья скважины глубиной 0.5 м и диаметром 0.1 м. Замеры проводились с шагом 1–2 км вдоль профилей. В качестве примера на рисунке 2 представлен график изменения ОАР по профилю II-II', где исследования проводились в 2019 и 2024 гг. Некоторые участки профиля расположены вдоль линеаментов (рис. 1). Аномальными значениями ОАР считаются те, которые превышают среднее арифметическое по профилю. Вдоль профиля на фоне низких значений отмечается три области с аномальными показателями ОАР (пункты наблюдения 7–16, 24–44, 53–75). Под графиком представлен профиль рельефа местности, на котором вынесены выделенные линеаменты и разломы фундамента. Радоновые аномалии приурочены к участкам с высокой плотностью линеаментов, что объясняется повышенной проницаемостью пород в зонах разломов и активной миграцией радона по трещинам.

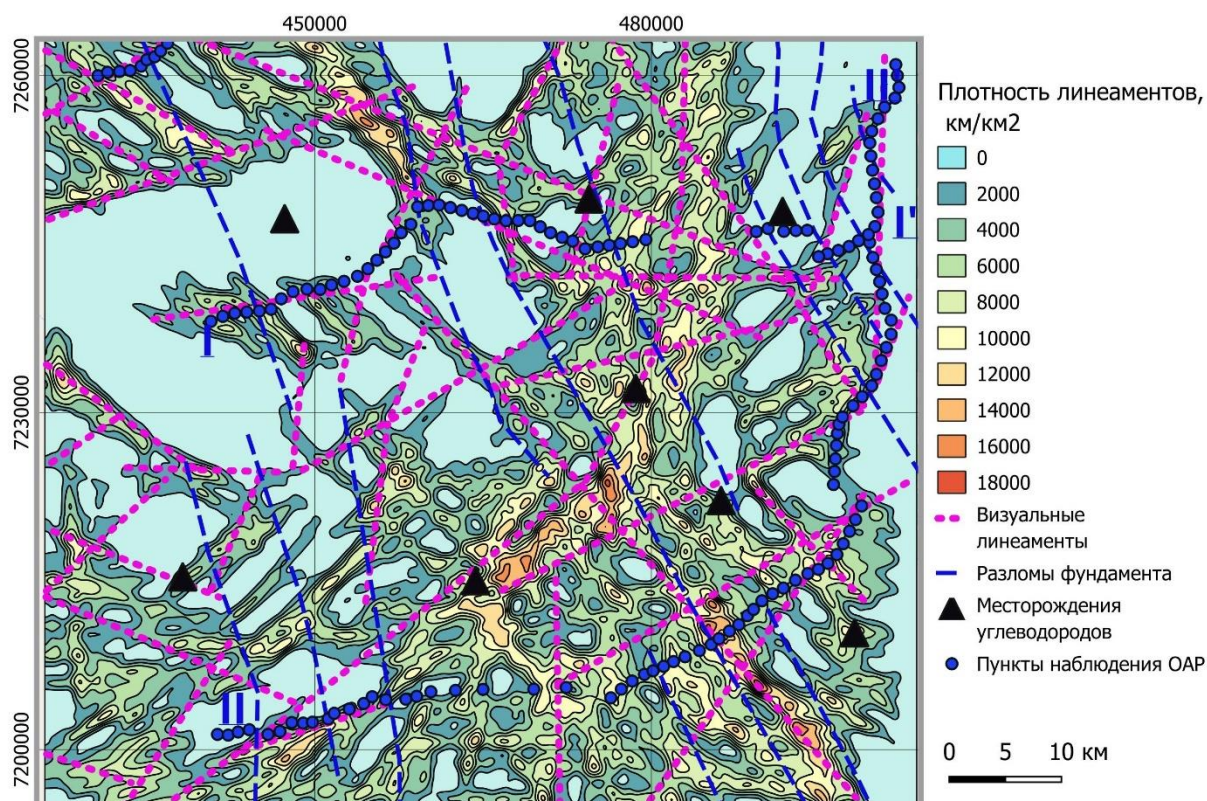


Рис. 1. Схема плотности линеаментов, составленная на основе результатов автоматизированного линеаментного анализа в программе LEFA на основе ЦМР ArcticDEM

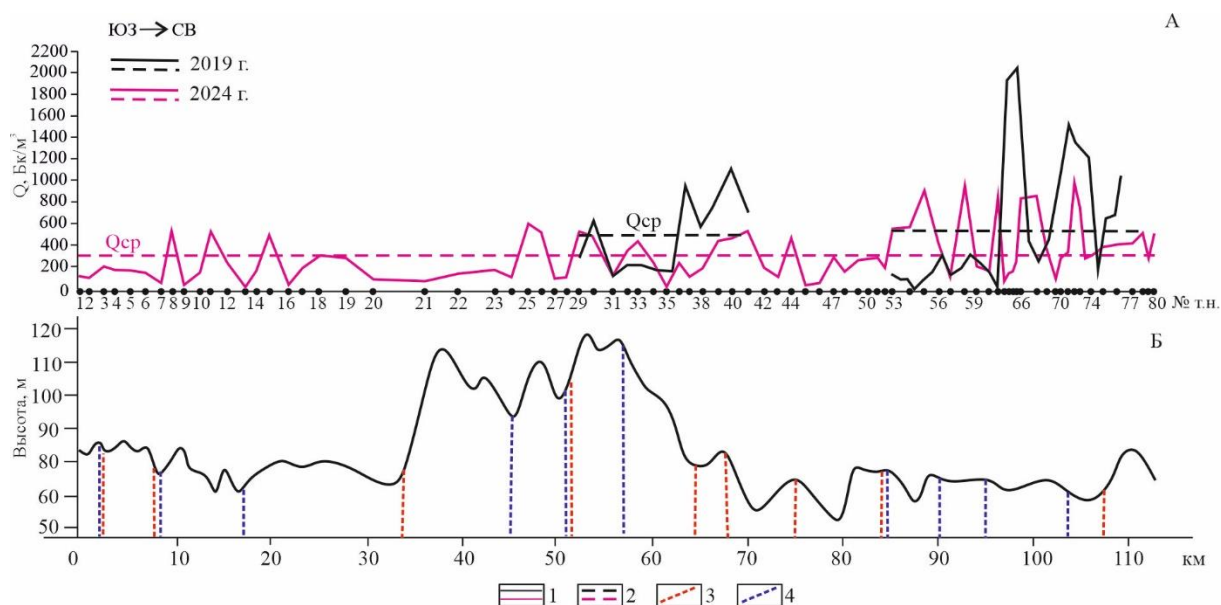


Рис. 2. Результаты радоновой съемки по профилю II-II': А – график изменения ОАР по профилю, Б – изменения высота рельефа вдоль профиля II-II'; 1 – кривая изменения ОАР по профилю, 2 – уровень среднего значения ОАР, 3 – линеаменты, 4 – разломы фундамента

Таким образом, совместное применение линеаментного анализа и радоновой съемки позволяет выделять зоны с повышенной геодинамической активностью, для

которых характерно наличие участков с раздробленными породами, которые служат каналами для транспортировки флюидов, в том числе углеводородов.

Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю к.г.-м.н. В.В. Удоратину за помощь в проведении полевых исследований и рекомендации по написанию представленных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прищепа О.М., Богацкий В.И., Макаревич В.Н., Чумакова О.В., Никонов Н.И., Куранов А.В., Богданов М.М. Новые представления о тектоническом и нефтегазогеологическом районировании Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т.6. № 4. С. 1–32.
2. Езимова Ю.Е., Удоратин В.В., Магомедова А.Ш. Закономерности проявления разломов Печоро-Колвинского авлакогена в поле радона // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2022. №67(1). С. 20–49.
3. Шевырев С.Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде MATLAB // Успехи современного естествознания. Т. 10. 2018. С. 138-143.

LINEAMENT ANALYSIS OF THE SOUTHERN PART OF THE PECHORA-KOZHVINSKY MEGAVAL

Ezimova Yulia
IG Komi SC UB RAS, Syktyvkar

Summary. The article presents the results of a lineament analysis of the southern part of the Pechora-Kozhvin sky megaswell. The research includes both visual and automated identification of lineaments. A comparison of the results shows that linear zones of lineament concentration most often correspond to river valleys and swamp boundaries, and less frequently to uplifts with heights of up to 150 m. Lineaments with northeastern and submeridional orientations dominate, differing from the northwestern orientation of the Riphean faults. Radon anomalies with intensities of 300-2000 Bq/m³ are detected above lineaments of various orientations and their intersection nodes.

Keywords: basement faults, lineaments, radon volume activity, automated lineament analysis.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Езимова Юлия Евгеньевна

ezimova89@mail.ru

ИГ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, м. н. с.

Научный руководитель: Удоратин Валерий Вячеславович, к.г.-м.н.

УДК 550.8

**ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ
ЧАРВАКСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА УЗБЕКИСТАНА**

*Жабборов Улугбек Чори угли, Хамидов Лутфулла Абдуллаевич
Институт сейсмологии АН РУЗ, г. Ташкент, Республика Узбекистан*

Аннотация. В работе изложены результаты анализа геолого-геофизической изученности зоны влияния Чарвакского водохранилища, расположенной в Чаткал-Кураминской горной зоне части Тянь-Шаньского орогена Узбекистана. Результаты необходимо при проведении современных сейсмологических наблюдений на указанной территории и исследовании проявления техногенных землетрясений.

Ключевые слова: каталог, водохранилище, кластер, землетрясения, магнитуда

Геологическая изученность

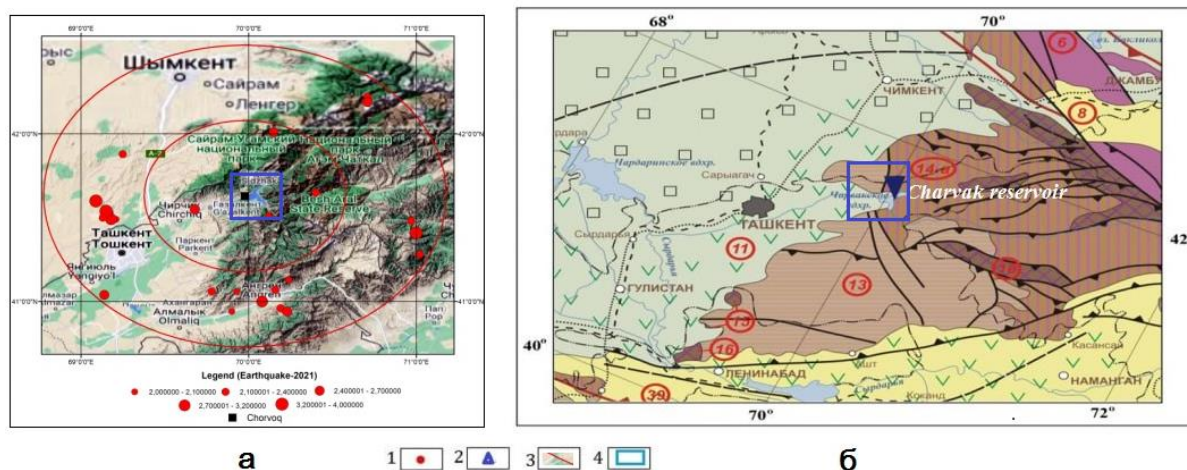
Если до недавнего времени было мало публикаций теоретических и экспериментальных работ в области устойчивости и локальной сейсмичности гидротехнических сооружений, то в последние годы теоретическое направление получило успешное развитие и, как результат исследований можно привести, например: ряд фундаментальных работ [1,2,3,4]. С 1972 года расчеты гидротехнических сооружений официально перешли на позицию динамической теории устойчивости, основанной на прямых сейсмометрических наблюдениях, основанных на спектральном изображении воздействия сейсмических сил [3,5].

До недавнего времени полевые наблюдения за поведением гидротехнических сооружений во время землетрясений выражались в двух методах исследований: первый - визуальное (макросейсмическое) изучение последствий сильных и разрушительных землетрясений с целью сбора, анализа и обобщения фактических данных; второй заключается в исследовании поведения геологической среды вокруг гидротехнического сооружения при слабых динамических воздействиях, таких как микросейсмы, сейсмические взрывные волны и землетрясения силой не более трех баллов.

В связи с этим сейсмологические исследования были ограничены эпизодическими инструментальными наблюдениями. Анализ геологических и геофизических данных, собранных в этом направлении, может позволить полностью изучить результаты исследования и в дальнейшем усовершенствовать мониторинг сейсмичности.

По сути, началось внедрение в практику полевых наблюдений третьего метода исследования, основанного в проведении непрерывных инженерно-сейсмометрических наблюдений. То есть, организация локального мониторинга сейсмичности в зонах воздействия гидротехнических сооружений различных категорий, расположенных в сейсмически активных районах с интенсивностью колебаний грунта от восьми баллов и более. Организация целенаправленного мониторинга сейсмичности требует предварительного анализа физических и геологических условий районов, в которых проводятся данные наблюдения. Поэтому, прежде всего, рассмотрим физико-геологические условия на примере зоны Чарвакского водохранилища.

Чарвакское водохранилище расположено в Ташкентской области, которая считается густонаселенным, промышленно развитым районом. Этот район характеризуется сложной структурой, возникшей в результате взаимодействия различных геологических периодов развития орогенной Чаткаль-Кураминской подзоны (рис. 1).



Условные обозначения (а): 1 - эпицентры землетрясений с магнитудой 3,5 за период 2021 год; 2 - местоположение створа резервуара; 3 - зоны радиусом 50 км и 100 км от створа водохранилища; 4 - зона водохранилища; (б): 5 - швы; 6 - сдвиги; 7 - толчки; 8 - основные разломы; 9 - гранитоидные; 10 - границы между структурными элементами

Рис. 1. Пространственно-временное распределение землетрясений в зоне Чарвакского водохранилища и сравнение со структурами на разрезе карты “Тектоническая карта Узбекистана и прилегающих территорий” [8]

В дополнение к региональным разломам Кенколь и Кумбель, существуют тектонические нарушения более низкого порядка (Ишак-Купрюк, Чарвак, Бричмулла), которые образуют границу бассейна водохранилища. Западная граница совпадает с разрывом Чарвак (амплитуда смещения 800 м), северная граница проходит в направлении Каржантау (амплитуда 2 км) – одной из крупнейших разломов в регионе.

Восточная часть проходит по направлению к Бричмулле (амплитуда 2 км), южная граница замыкается направлением на Чимган (амплитуда 1 км). Чаша Чарвакского водохранилища и его боковые стенки, расположенные в пределах впадины Бручмулла, состоят из неоген-меловых отложений и четвертичных отложений. Мощность третичных отложений в пределах впадины составляет 1300-1500 м. Они представлены толщей переслаивающихся глин, песчаников и алевролитов, покрытых конгломератами. На эрозированной поверхности четвертичных отложений залегают четвертичные отложения толщиной до 30 м (гравий, конгломераты, известняковые почвы). Обе толщи залегают поверх кайнозойских известняков [4, 5].

По своему литологическому составу горные породы впадины делятся на два слоя. Массивные, слабо растрескавшиеся известняки толщиной 200 м и "каранкулиты", тонкослойные растрескавшиеся известняки, на которых расположены тела пород силикатного состава (разновидности кремний-глинистых).

Глубина залегания мелких каранкулитовых тел составляет 30-80 м, крупные обнаружены не были. Каранкулиты и их состав свидетельствуют о влиянии циркулирующих гидротермальных растворов под давлением (до 28°C) на слои известняка в зонах тектонических нарушений и разрежения. Палеозойские известняки имеют свободно текущий водоносный горизонт на глубине 20-150 м.

Подземные воды в четвертичных отложениях приурочены к скалам и делювиальным дюнам и залегают в водостойких породах третичного периода. Гидрогеологические исследования не выявили прямой утечки воды из третичных отложений. В районах, где сформировались третичные отложения, фильтрация воды из водохранилища исключена. В районе плотины, где дно и борта водохранилища сложены из палеозойских известняков, наблюдается сильная фильтрация из-за увеличения зон разрыва, карстования и

каранкулитовых образований. Запасенный водный горизонт простирается на 20-25 км от плотины.

Исторически сложилось так, что с 1969 года в этом районе проводились систематические высокоточные геодезические наблюдения для изучения деформации земной коры.

За определенные периоды шесть раз вокруг водохранилища проводилось нивелирование II категории (1969, 1970, 1972, 1974-1975, 1976-1980, 1984-1985 годы). Результаты показали, что заполнение водохранилища до толщины $N=90$ м (в 1973-1974 годах) привело к опусканию поверхности земли на 2 см в северо-восточной части водохранилища и поднятию на 2 см в западной части водохранилища. Погружение восточной и северо-восточной частей водохранилища было зафиксировано в ходе геодезической съемки в 1980 году, что может быть связано с повышением уровня воды до 145 м. Измерения, проведенные в 1969-1974 годах, показали, что горные хребты, окаймляющие водохранилище, деформируются со скоростью 0.2 см/год [5,6].

Изучение природно-исторических условий Центральной Азии, включая территорию исследования, началось в первой половине XIX века и продолжается по настоящее время

Геофизико-сейсмологические исследования

Район, где расположено Чарвакское водохранилище, характеризуется высокой сейсмической активностью, где происходили сильные землетрясения. Изучение сейсмической обстановки в районе, где расположено водохранилище, представляет интерес с точки зрения двух аспектов: обеспечения безопасности сооружения и определения влияния водохранилища на сейсмический режим.

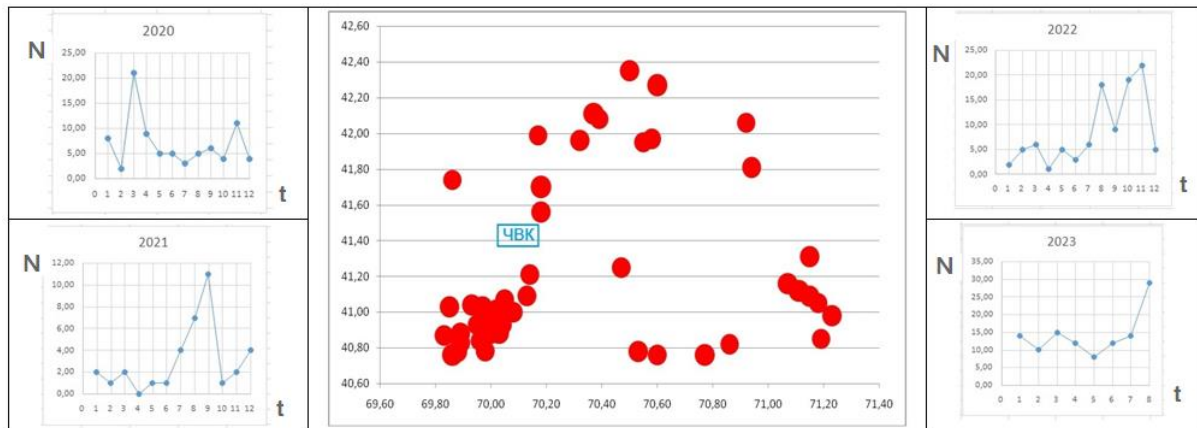
В течение длительного времени в этом районе проводились детальные сейсмологические исследования, в результате которых были достигнуты определенные результаты. Мы продолжили эти исследования, поскольку уникальность Чарвакского водохранилища и его плотины, а также его огромное значение для экономики республики требуют более тщательного изучения непрерывного сейсмического мониторинга и сейсмических процессов, связанных с водохранилищем (рис. 2).

Размер зоны, где сейсмические процессы могут повредить водохранилище, как описано в нормативных документах, включает территорию вокруг него радиусом 50-100 км [6,7]. Но было бы не корректно ограничиваться изучением только этого района, поскольку с тектонической точки зрения это не отдельный сейсмогенный район, а часть более крупной тектонической структуры в земной коре. В связи с этим изучаются активные тектонические структуры Чаткало-Кураминской части Тянь-Шаньского орогена и зона воздействия Чарвакского водохранилища как ее составной части.

Исторически в этом районе были единичные региональные сейсмические станции, которые регистрировали сильные землетрясения. В 1960 году в районе хребтов Чаткало-Курама была открыта дополнительная сеть сейсмических станций, число которых увеличилось до 10-15, что позволило зафиксировать землетрясение энергетического класса $K=8-9$. С этого момента в районе началось регулярное изучение сейсмичности. Был построен региональный годограф сейсмических волн, который позволил повысить точность определения эпицентров землетрясений. Энергетические характеристики получены по классификации Т.К. Раутиан.

В дальнейшем Л.М. Плотникова, Б.С. Нуртаев, а также другие авторы рассчитали долгосрочные сейсмические параметры с учетом репрезентативности (достоверности) землетрясений разных классов в разные периоды [1,5]. С 1968 года были получены следующие репрезентативные периоды для территории Приташкентского района: с 1968 года было получено $K \geq 14$, с 1929 года - $K \geq 13$, с 1951 года - $12 \leq K \leq 10$, с 1960 года - $K=9$, с 1961 года - $K=8$. Это позволило рассчитать параметры средне- и долгосрочной

сейсмичности. В результате было установлено, что угловой коэффициент наклона графика повторяемости γ для землетрясений $K=8-14$ был средним значением за многолетний период $\gamma=0.46\pm0.04$ при уровне сейсмической активности $A_{10}=0.04$.



Условные обозначения: N - количество землетрясений; t - месяцы года

Рис. 2. Очаги землетрясений в районе Чарвакского водохранилища в расстоянии до 150 км и их частота с 2020-2023 гг.

На основании всех имеющихся данных отмечены средние периоды повторения выделения сейсмической энергии на разных уровнях (таблица 1).

Таблица 1

Энергетический класс землетрясений ($K=\lg E$, E-в джоулях) и средние периоды повторяемости (T, годы)

$K=\lg E$	15	14	13	12	11	10	9	8
T	33.7	25.25	10.25	3.17	0.86	0.33	0.11	0.04

Для разных временных интервалов в зависимости от региона отображаются разные значения параметра A_{10} . Диапазон значений этих параметров различается для разных частей региона. Для горной части Ташкентской области, где расположено Чарвакское водохранилище, А.И.Захаровой рассчитаны значения параметров сейсмичности γ [5]. Землетрясение $K=8-11$ в 1960-1968 годах имело значение $\gamma=0.52\pm0.02$; для платформенной части в 1951-1973 годах имели значение $\gamma=0.58\pm0.03$ [8.9]. По нашим исследованиям в юго-западной части области влияния водохранилища землетрясение $K=7-11$ в 2011-2023 годах γ имело значение $\gamma=0.591\pm0.82$, на рисунке 2 показана частота землетрясений по годам в 2020-2023 годах.

Графики накопления сейсмической энергии с течением времени, т.е. графики Бениоффа, были изучены с целью определения того, как группы землетрясений различной энергии ведут себя с течением времени и связаны ли они с сильными сейсмическими событиями в этом районе. В частности, были построены отдельные графики для всей области региона, орогенной части и орогенно-платформенной переходной части. В этом случае в площади зоны воздействия Чарвакского водохранилища не наблюдалось значительные выделения сейсмической энергии. За этот же период было отмечено, что процесс высвобождения сейсмической деформации для возвышенной части в районе, удаленном от воздействия водохранилища, происходил равномерно [1,5].

В результате был сделан вывод, что прочность горных пород в этом районе была несколько выше, чем прочность горных пород в районе, удаленном от воздействия водохранилища. В выбранном диапазоне сейсмические события происходили неравномерно

во времени и пространстве, и сейсмическая энергия высвобождалась в некоторой степени, то есть большие порции энергии обменивались меньшим. Из-за сильных землетрясений высвобождается наибольшее количество энергии. Самым крупным было землетрясение в Бричмулле (1959 год), за которым последовало Ташкентское землетрясение (1966 год).

Таким образом, можно объяснить, что природные геологические и геофизические условия зоны влияния Чарвакского водохранилища имеет довольно сложную структуру, а сейсмический режим территории быстро меняется. Сейсмическое изменение района с таким сложным геолого-геофизическим строением, в свою очередь, может позволить исследовать проявление влияния изменения гидрологического режима водохранилища Чарвак на окружающую геологическую среду, а также на геофизические поля.

Исследования поддержаны финансированием гранта No.AL-582205639 «Агентства по инновационному развитию» Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плотникова Л.М., Нуртаев. Б.С., Фленова М.Г. К вопросу о механизме техногенных землетрясений. // Геология и минеральные ресурсы. 1999. №1. С.54-58.
2. Хасанов.А., Гулямов П.Н., Каюмов А.А. Природная география Узбекистана. - Ташкент, Узбекский национальный университет, 2009, 161 с.
3. Уразбаев М.Т. Сейсмостойкость упругих и гидроупругих систем. - Ташкент: Фан, 1966, 254 с.
4. Головкин В.П., Нурматов У.А., Нармирзаев Ф.А. Современные движения земной коры и сейсмичность. Ташкент, Фан. 1990. 179 с.
5. Плотникова Л.М., Уломов В.И., Махмудова В.И. Влияние Чарвакского водохранилища на параметры сейсмического режима //Экспериментальная сейсмология в Узбекистане. Ташкент: Фан. 1983. С.31-43.
6. Хамидов Л.А. Линейная модель концентрации напряжений в разломах земной коры, находящихся в ближней зоне деформационного влияния крупных водохранилищ // Seysmologiya va muammolari. Ташкент. 2019. №1. С.41-51.
7. Хамидов Л.А., Анварова С.Г., Жабборов У.Ч. Распределение землетрясений в разломах близких к Чарвакскому водохранилищу // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический аспект, Всероссийская конференция с участием приглашенных исследователей из других стран, 16–20 сентября 2024, Иркутск. С.124-125.
8. Тектоническая карта Узбекистана и прилегающих территорий. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://avatars.mds.yandex.net/i?id=9b6a7c4aea9b928165d422f394b7debe_1-5205562-images-thumbs&n=13 (дата обращения 10.01.25)

GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL KNOWLEDGE OF THE ZONE OF INFLUENCE OF THE CHARVAK RESERVOIR

*Zhabborov Ulugbek Chori ugli, Khamidov Lutfulla Abdullaevich
Institute of Seismology, Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan*

Summary. The paper presents the results of an analysis of the geological and geophysical study of the Charvak reservoir impact zone, located in the Chatkal-Kuramin mountain zone of the Tien Shan orogen of Uzbekistan. The results are necessary when conducting modern seismological observations in the specified area and studying the manifestation of man-made earthquakes.

Key words: catalogue, reservoir, cluster, earthquakes, magnitude.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Жабборов Улугбек Чори угли

jabborovulugbek341@gmail.com

Институт Сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан, ведущий инженер (магистр)

Хамидов Лутфулла Абдуллаевич

hamidov_l@mail.ru

Институт Сейсмологии им. Г.А.Мавлянова Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан, г.н.с.

УДК 550.838.4

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОЙ КАРТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТЕРРИТОРИИ ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

*Жидких Ольга Сергеевна, Булучевская Полина Александровна,
Сотников Антон Александрович
ФГБОУ ВО ВГУ, г. Воронеж*

Аннотация. Создание синтетической карты магнитного поля территории Воронежского кристаллического массива (ВКМ) выполняется на основе объединения результатов наземной съемки масштаба 1:50 000 (карта вертикальной составляющей ΔZ_a) и данных аэромагнитной съемки масштаба 1:200000 (карта приращения модуля полного вектора магнитной индукции ΔT_a), представленных в виде сводной карты масштаба 1:500000 на бумажном носителе. На первом этапе исходные данные были оцифрованы и проверены с помощью программы Easy Trace, а затем откорректированы в программе Surfer для минимизации возможных ошибок. Полученные цифровые данные будут использованы для формирования синтетической карты магнитного поля.

Ключевые слова: Воронежский кристаллический массив, векторизация данных, Easy Trace, Surfer, магнитное поле.

Для изучения разломно-блоковой тектоники Воронежского кристаллического массива (ВКМ) на основе геофизических данных была поставлена задача формирования синтетической карты магнитного поля [2, 5-7].

Исходные данные. В качестве исходных данных были использованы:

- Сводная карта вертикальной составляющей полного вектора магнитной индукции ΔZ_a , сформированная по результатам наземной магнитной съемки масштаба 1:500000.
- Карта приращения модуля полного вектора магнитной индукции ΔT_a , составленная по результатам аэромагнитной съемки масштаба 1:200000, выполненной на высоте $H = 150$ м.

Методика. Векторизация исходных данных осуществлялась с применением программного обеспечения Easy Trace [3].

На первом этапе проводилась автоматическая трассировка изолиний с последующим присвоением цифровых значений. Для обеспечения качества оцифровки и валидации данных были использованы два метода проверки.

Первый метод заключался в анализе топологии оцифрованной карты с использованием возможностей программы Easy Trace. В результате анализа были выявлены возможные ошибки, такие как самопересечение изолиний, пересечения (кресты, перекрытия, вершины), висячие узлы и псевдо-узлы, пересечения полилиний с полигонами, незамкнутые полилинии, незамкнутые контуры (рис.1), ошибки присвоения значений.

Для второго метода использовались программы Excel и Surfer. Второй метод заключался в экспорте данных в формат CSV и последующим построении карты в программном обеспечении Surfer. Визуальное сравнение построенной в программе Surfer карты с оцифрованной картой позволило выявить и исправить ошибки в присвоении значений изолиниям, обусловленных погрешностями ввода. Данный подход обеспечил корректность присвоения значений изолиниям.

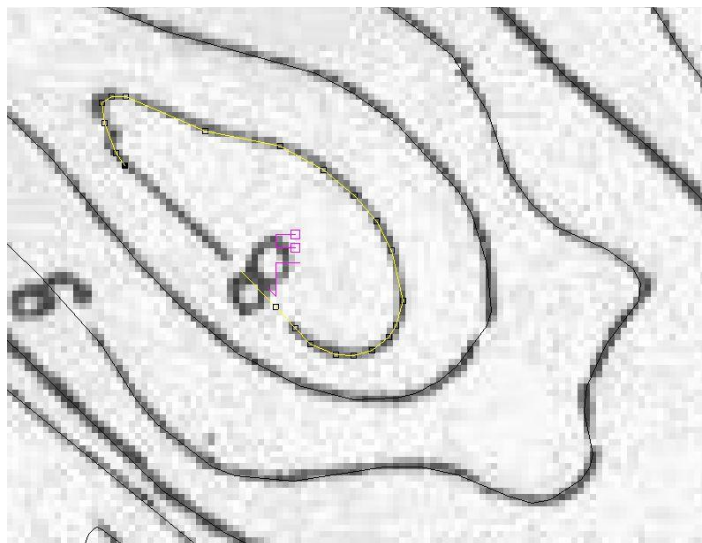


Рис. 1. Проверка оцифрованной карты на возможные ошибки: розовым символом обозначен незамкнутый контур

В результате была получена цифровая версия сводной (ΔZ_a и ΔT_a) магнитной карты [1,4]. Фрагмент карты показан на рисунке 2.

На следующем этапе исследований предполагается решить следующие задачи: Приведение составных частей карты к единому уровню.

- Решение обратной задачи для тонкого слоя на поверхности с учетом разнородности исходных данных и модели нормального поля.
- Решение прямой задачи расчета магнитного поля от эквивалентного слоя, что даст возможность получения всех компонент синтетического магнитного поля для территории ВКМ.

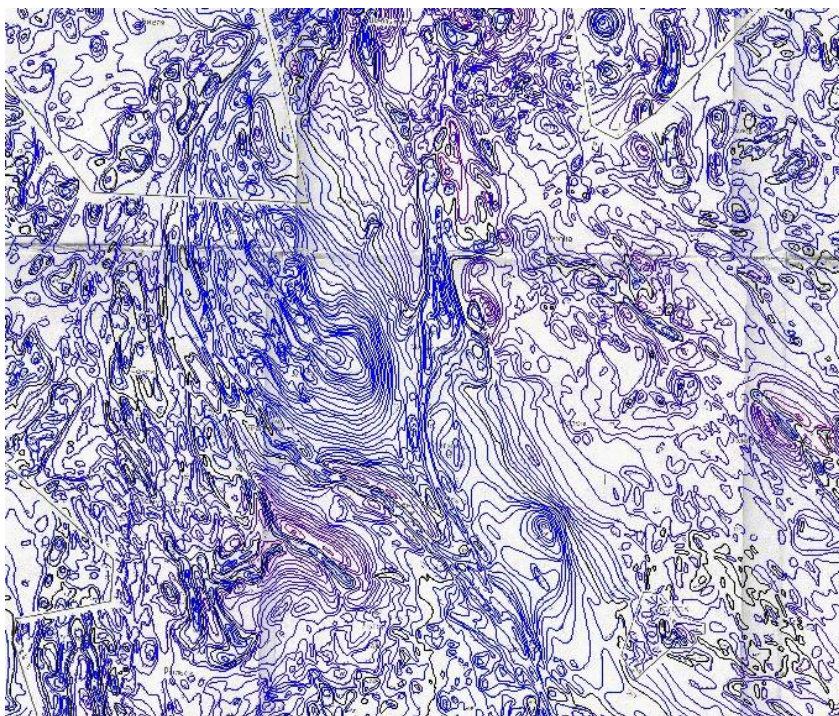


Рис. 2. Фрагмент цифровой версии магнитной карты

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блох Ю.И. Решение прямых задач гравиразведки и магниторазведки / Ю. И. Блох. - М.: МГГА, 1993. - 79 с.
2. Муравина, О.М. Методика формирования петромагнитной модели Хоперского мегаблока Воронежского кристаллического массива / О.М. Муравина, М.В. Долганова // Материалы XX Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М. : ИФЗ РАН. - 2019. - С. 252-254.
3. Муравина, О.М. Методика анализа петромагнитных параметров структурно-вещественных комплексов Воронежского кристаллического массива / О.М. Муравина, Р.А. Терентьев, О.С. Жидких, Н.В. Ляшенко // Материалы 50-й юбилейной сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». М.: ИФЗ РАН. - 2024. - С. 249-250.
4. Никифоров, А. Г. Применение магнитометрии в геологии. Казань: Изд-во КГУ, 2023.
5. Колошина Г.В. Применение программного продукта Easy Trace для векторизации данных: учебно-методическое пособие к лабораторным и практическим занятиям. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2017. — 31 с.
6. Антонова И.Ю. Методика построения ГИС-карт на примере создания ГИС-модели магнитного поля Воронежского кристаллического массива / И.Ю. Антонова, П.С. Иванков // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей : материалы 43 сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского (Воронеж, 26-30 января 2016 г.) .— Воронеж, 2016 .— С. 19-21 .— 0,2 п.л. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. – 535 с.
7. Кузнецов, С. П. Профессиональная работа с картами в Easy Trace. М.: Atlas, 2021.

DATA PROCESSING METHODOLOGY FOR CREATING A SYNTHETIC MAP OF THE MAGNETIC FIELD OF THE VORONEZH CRYSTAL MASSIF TERRITORY

*Zhidkikh Olga Sergeevna, Buluchevskaya Polina Alexandrovna,
Sotnikov Anton Alexandrovich,
VSU, Voronezh*

Summary. The creation of a synthetic map of the magnetic field of the territory of the Voronezh crystalline massif (VCM) is carried out on the basis of combining the results of ground survey of a scale of 1:50 000 (map of the vertical component ΔZ_a) and aeromagnetic survey data of a scale of 1:200 000 (map of the increment of the module of the total magnetic induction vector ΔT_a), presented in the form of a summary map of a scale of 1:500 000 on paper. At the first stage, the source data was digitized and checked using the Easy Trace program, and then adjusted in the Surfer program to minimize possible errors. The resulting digital data will be used to generate a synthetic map of the magnetic field.

Key words: Voronezh crystalline array, data vectorization, Easy Trace, Surfer, magnetic field.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Жидких Ольга Сергеевна

olga.z2003@mail.ru

ФГБОУ ВО ВГУ, г. Воронеж, магистрант 1 курса

Булучевская Полина Александровна

barashunka@gmail.ru

ФГБОУ ВО ВГУ, г. Воронеж, студентка 3 курса бакалавриата

Сотников Антон Сергеевич

Anton.sotnikov.01@mail.ru

ФГБОУ ВО ВГУ, г. Воронеж, магистрант 2 курса

Научный руководитель: Антонова Ирина Юрьевна, Муравина Ольга Михайловна,
д.т.н.

УДК 550.8; 552.08

АНАЛИЗ ДАННЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ТЕРМИЧЕСКОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НА ОБРАЗЦЫ МЕТАМОРФИЗИРОВАННЫХ ПЕСЧАНИКОВ

^{1,2}*Индаков Глеб Сергеевич, ²Казначеев Павел Александрович*¹*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва*²*ИФЗ РАН, г. Москва*

Аннотация. Для анализа процесса термического разрушения горных пород в лабораторных условиях необходимо учитывать данные различной природы. В работе рассматриваются методы расчета статистических параметров потока импульсов термостимулированной акустической эмиссии на основе данных экспериментов с образцами метаморфизированных горных пород Северного Приладожья и методы оценки размеров зерен слагающих породу минералов по оптическим фотографиям шлифов. Среди предложенных для анализа параметров активность акустической эмиссии, параметр наклона графика повторяемости, параметры волновых форм импульсов и параметры распределения зерен горной породы по размерам.

Ключевые слова: горные породы, термическое воздействие, акустическая эмиссия, b-value, микроструктура, размеры кристаллов

На сегодняшний день одной из приоритетных задач в области наук о Земле является исследование процессов разрушения горных пород. В то время как разрушение под действием механической нагрузки исследовано достаточно широко, особенности температурного воздействия на породу остаются менее изученными. Породы могут подвергаться воздействию высоких температур также в природных условиях при контакте с магмой или геотермальными системами, под влиянием естественной радиоактивности и в результате тектонических процессов [1, 2], а также в шахтах и карьерах при добыче твердых полезных ископаемых, в скважинах и коллекторах при углеводородной добыче, в инженерных сооружениях при пожарах, в местах захоронения радиоактивных отходов. Распространенным методом отслеживания процессов разрушения в породе в ходе нагрева является регистрация термически стимулированной акустической эмиссии (ТАЭ), которая вызывается, главным образом, развитием микротрещин под действием термических напряжений.

Данная работа посвящена исследованию особенностей термическим стимулированного разрушения образцов метапесчаников в лабораторных условиях на основе статистики импульсов ТАЭ и микроструктурных фотографий шлифов образцов. Исследуемые образцы метапесчаников представляют собой цилиндрические керны метатерригенных горных пород, взятых в пяти зонах отбора в районе озера Янисъярви в Северном Приладожье (Карелия, Россия), различавшихся условиями первичного метаморфизма. Предполагается, что исходные осадочные породы схожего состава и происхождения (кварц-полевошпат-слюдистые породы) претерпели разные тектоно-термальные преобразования на различных глубинах и температурах. Средняя плотность пород составляет 2.77 ± 0.07 г/см³. Наблюдается увеличение порфириобластов, рост общей деформации и структурных изменений матрицы в породах с увеличением давления и температуры, испытанных породами в период метаморфизма. Отмечается влияние испытанных условий метаморфизма на размер кристаллических фаз минералов [3].

Предполагается возможность наличия взаимосвязи между физически различными статистическими параметрами, характеризующими разрушение, и микроструктурой горных пород. Статистическими параметрами ТАЭ, рассмотренными в работе, являются активность акустической эмиссии, параметр наклона графика повторяемости (b -value), приведенный к величине, рассчитываемой по энергиям событий для возможности сравнения с натурными данными [4], а также параметры волновых форм – отношение RA длительности нарастания сигнала к его максимальной амплитуде («Rise Time To Amplitude») и отношение AF числа пересечений порогового уровня к общей длительности сигнала («Average Frequency»).

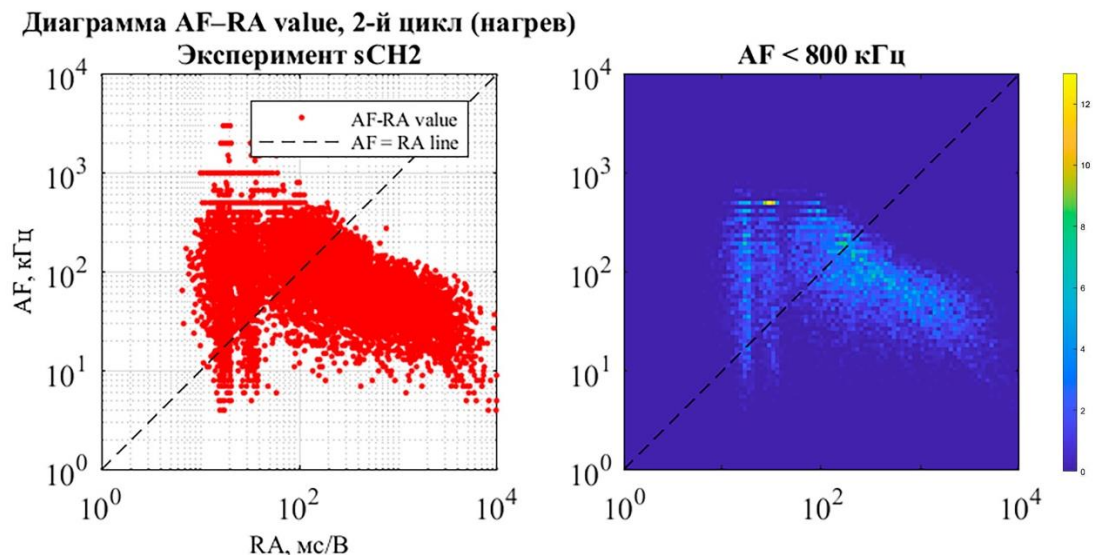


Рис. 1. Распределение событий в пространстве параметров AF-RA и соответствующая плотность событий в сетке 100x100 ячеек для эксперимента sCH2 (нагрев до 729°C)

Сдвиговые трещины характеризуются, в целом, более продолжительным сигналом (низкие значения AF) и длительными временем нарастания (высокие значения RA), в то время как трещины растяжения, напротив, характеризуются высокими AF и малыми RA [5]. Так как для больших значений AF возможно присутствие высокочастотных помех, интерес представляют данные в области $AF < 800$ Гц, что обусловлено особенностями регистрирующей системы. Распределение значений AF-RA в одном из циклов нагрева показано на диаграмме на рисунке 1. На рисунке 2 показаны интегральные значения параметров средней активности и b -value на этапах нагрева.

Объектом исследования при изучении микроструктуры является зернистая структура горной породы как совокупность зерен, характерные величины каждого из которых измеримы, что позволяет оценить статистические параметры распределения величин. В данной работе был использован метод пересечения опорных линий [6] для анализа оптических микрофотографий шлифов горной породы. В соответствии с методом на изображение наносится N равно отстоящих друг от друга параллельных линий и отмечаются все их пересечения с границами зерен породы. Полученное распределение длин отрезков в пикселях в соответствии с масштабом снимка пересчитывается в распределение размеров зерен. Реальное распределение аппроксимировалось логнормальной функцией [7] (рис. 3). Оценивались такие статистические параметры распределения величин, как квантили 0.85-0.95, мода, медиана и средний размер зерна [8].

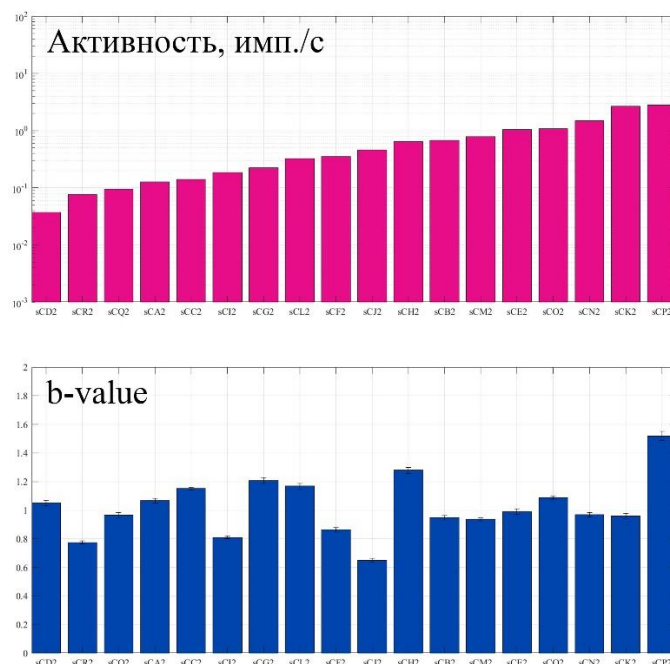


Рис. 2. Средняя активность и b-value, рассчитанные за весь цикл нагрева для каждого из образцов метапесчаников. Образцы упорядочены по возрастанию значения средней за нагрев активности

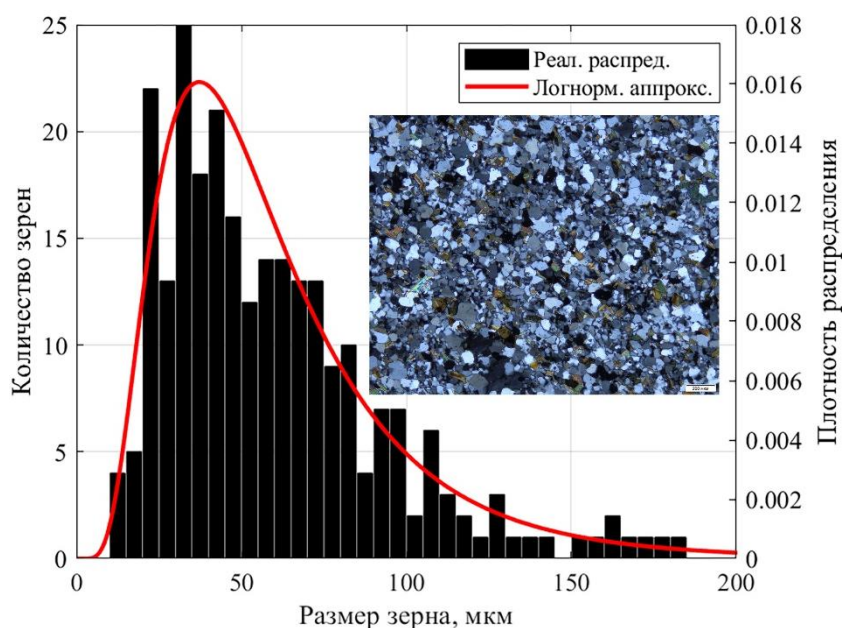


Рис. 3. Оценка размеров зёрен методом пересечения опорных линий по данным оптической микроскопии для образца ЛВ1356: микрофотография масштаба 200 мкм и соответствующее ей распределение зёрен по размерам. Столбчатая диаграмма отображает реальное распределение зерен по размерам с шагом 5 мкм, красная кривая соответствует логнормальной аппроксимации

В работе сопоставлены перечисленные статистические и микроструктурные параметры, отмечены особенности характера термически стимулированного разрушения в динамике развития и в целом за нагрев для каждого из образцов. Валидация оценки размеров зерен проведена методом акустической спектроскопии [3]. Перспективным

продолжением исследований является составление представительного набора данных на основе рассчитанных параметров образцов, для анализа которого возможно применение методов машинного обучения, в частности, деревьев решений, метода главных компонент, а также рекуррентных нейронных сетей для обработки временных последовательностей.

Экспериментальные данные получены в рамках гос. задания ИФЗ РАН, работа выполнена в рамках программы «Научное наставничество ИФЗ РАН».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heuze F.E. High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks – A review // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1983. V. 20, no. 1. – Pp. 3-10.
2. Шкуратник В.Л., Вознесенский А.С., Винников В.А. Термостимулированная акустическая эмиссия в геоматериалах. – М.: изд. "Горная книга", 2015. – 241 с.
3. Подымова Н.Б., Пономарев А.В., Казначеев П.А., Багдасарян Т.Э., Матвеев М.А., Индаков Г.С. Количественная оценка характерных размеров зерен лабораторных образцов горных пород методом широкополосной оптико-акустической спектроскопии // *Физика Земли*. 2024. № 4. – с. 93–111.
4. Индаков Г.С., Казначеев П.А. Оценка статистических параметров потока импульсов термически стимулированной акустической эмиссии в лабораторных экспериментах // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. 2021. № 1:2110501.
5. Cui Y., Xue L., Zhai M., Xu C., Bu F., Wan L. Experimental investigation on the influence on mechanical properties and acoustic emission characteristics of granite after heating and water-cooling cycles // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2023. V. 9, no. 88.
6. ASTM E112-13. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. ASTM, 2021. – 11 p.
7. Higgins M.D. Quantitative textural measurements in igneous and metamorphic petrology. Cambridge University Press, 2006. – 265 p.
8. Казначеев П.А., Индаков Г.С., Подымова Н.Б., Пономарев А.В., Матвеев М.А., Майбук З.-Ю.Я., Краюшкин Д.В. Методы оценки размеров зерен горных пород: обзор и сравнение // *Наука и технологические разработки*. 2024. Т. 103. № 2. – с. 3–23.

ANALYSIS OF LABORATORY EXPERIMENT DATA ON THERMAL TREATMENT OF METAMORPHOSED SANDSTONE SAMPLES

^{1,2}*Gleb Indakov, ²Pavel Kaznacheev*

¹*MSU, Moscow*

²*IPE RAS, z. Moscow*

Summary. To analyze the process of thermal destruction of rocks in laboratory conditions, it is necessary to take into account data of various nature. This paper considers methods for calculating statistical parameters of the pulse flow of thermally stimulated acoustic emission based on experimental data with samples of metamorphosed rocks of the Ladoga Karelia region and methods for estimating the sizes of minerals composing the rock using optical photographs of thin sections. Among the parameters proposed for analysis are the activity of acoustic

emission, the slope parameter of the Gutenberg-Richter law, the parameters of the waveforms of pulses and the parameters of the distribution of rock grains by size.

Key words: rocks, thermal treatment, acoustic emission, b-value, microstructure, grain sizes.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Индаков Глеб Сергеевич

indakov.gs16@physics.msu.ru

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, аспирант

ИФЗ РАН, г. Москва, инженер-исследователь

Научный руководитель: Смирнов Владимир Борисович, д.ф.-м.н.

Научный наставник по программе «Научное наставничество ИФЗ РАН»:

Казначеев Павел Александрович, к.т.н.

Казначеев Павел Александрович

p_a_k@mail.ru

ИФЗ РАН, г. Москва, с.н.с., к.т.н.

УДК 550.834

ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМНЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДАННЫХ

*Кирсанов Станислав Константинович
ГИ УрО РАН, г. Пермь*

Аннотация. Проведен анализ динамических характеристик сейсмических данных за определенный промежуток времени. Выявлена зависимость от времени проведения исследования. Разработаны рекомендации при проектировании режима сейсморазведочного мониторинга.

Ключевые слова: сейсморазведка, Верхнекамское месторождение солей, отношение сигнал/помеха.

На Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС) проводится большое количество мониторинговых работ [1, 2], направленных на контроль состояния породного массива и приповерхностных отложений с целью обеспечения безопасности как самих шахт, где ведется добыча, так и совмещенных с ними градопромышленных агломераций. Контроль за устойчивостью верхней части разреза и водозащитной толщи помогает предотвращать опасные явления, которые могут возникнуть из-за активной разработки. В комплексе геофизических методов [3], применяемых для изучения и оценки объектов такого типа, сейсморазведка выделяется как наиболее информативный подход.

При постановке режимных мониторинговых исследований стоит задача выбора оптимального режима проведения полевых сейсморазведочных наблюдений в течение года. Ее решение возможно на основании оценки данных ежемесячного сейсморазведочного мониторинга, выполняемого в пределах городе Березники. Например, в работе [4] показано, что максимальное повышение качества волновых картин наблюдается при отрицательных температурах окружающей среды, что, по-видимому, связано с промерзанием приповерхностных отложений.

Можно предположить, что выбор оптимального времени проведения наблюдений также может быть основан на анализе связи динамических характеристик первичных сейсмических материалов с возможными изменениями свойств верхней части разреза, за счет изменения уровня грунтовых вод (УГВ).

Для оценки подобных закономерностей взят один из мониторинговых сейсморазведочных профилей, заложенный для режимных наблюдений в зоне интенсивных изменений физико-геологических особенностей разреза в связи затоплением рудника БКРУ-1.

Для оценки динамических характеристик первичных сейсмограмм по всему профилю с помощью программного комплекса «SPS-PC» [5] производилось вычисление отношения сигнал-помеха (S/N), ширины амплитудного спектра и средней амплитуды во временном окне 0-200 мс (рис. 1).

В этом временном интервале присутствуют все классы волн, на характеристики которых может оказывать влияние верхняя часть разреза: поверхностные, преломленные, отраженные. Причем наибольшая амплитуда колебаний фиксируется на удалениях до 200 м.

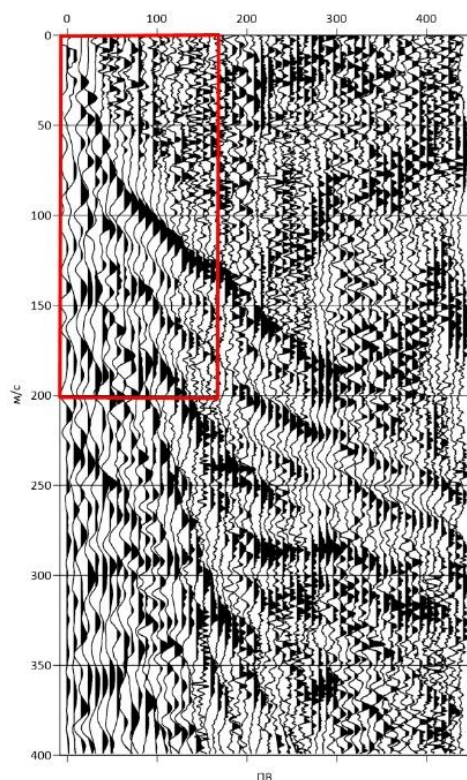


Рис. 1. Сейсмограмма общего пункта возбуждения (красным – окно динамического анализа)

Для корректного сравнения волновые поля приводились к единому виду за счет минимальной цифровой обработки: ARN (Automatic Regulation of Noise) – центрирования трасс в скользящем окне 100 д/с; ARU (Automatic Regulation Unit) – автоматическая регулировка усиления трасс в окне 1000 д/с; FILTER – полосовая фильтрация 20-170 Гц. Предполагается, что в этом окне наиболее явно проявятся влияние верхней части разреза на динамику волн.

Как видно из оценок динамических параметров (рис.2–4) наблюдается повышение качества сигнала (S/N) в зимнее время (декабрь-январь). Однако данные за один и тот же месяц зимой не всегда совпадают, что указывает на влияние дополнительных факторов. Также в апреле наблюдаются наивысшие значения сигнал-помехи (рис. 2), но не в каждый год. В летний период оценки S/N снижаются и остаются стабильными на протяжении всего летнего периода. По данным оценок ширины спектра (рис. 3) в летний период наблюдаются наивысшие значения. Показания средней амплитуды (рис. 4) не показывают значимых изменений в течение года.

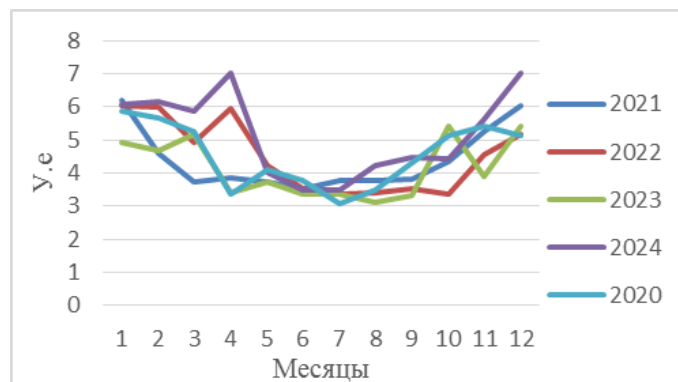


Рис. 2. Отношение S/N за период 2020-2025 гг.

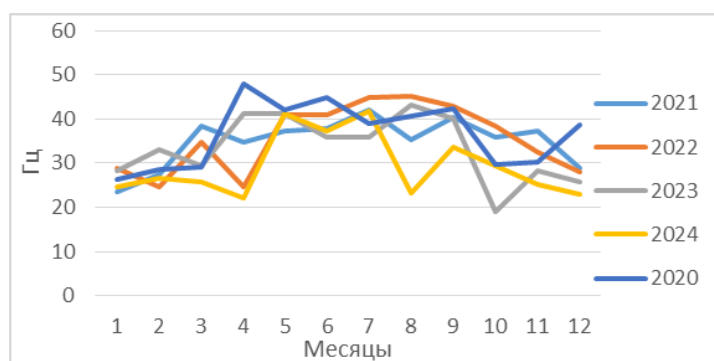


Рис. 3. График ширины спектра за период 2020-2025 гг.

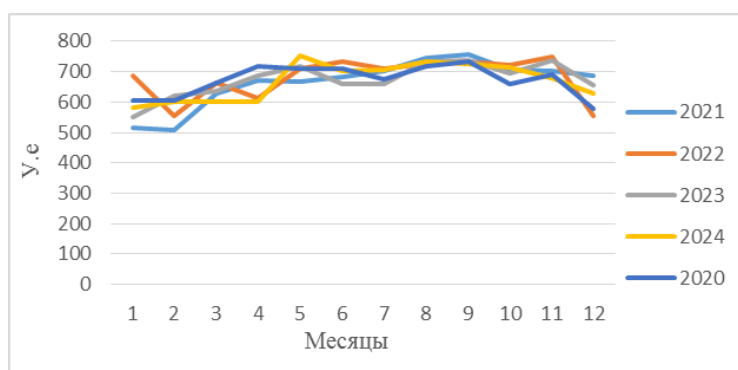


Рис. 4. График средней амплитуды за период 2020-2025 гг.

Предположено, что изменения в представленных оценках могут быть связаны с изменениями УГВ. На рисунке 5 представлены данные об изменениях УГВ в ближайшей к данному профилю гидронаблюдательной скважине глубиной – 70.0 м. Абсолютная отметка устья скважины – 151.91 м. Измерения в ней проводятся каждые две недели.

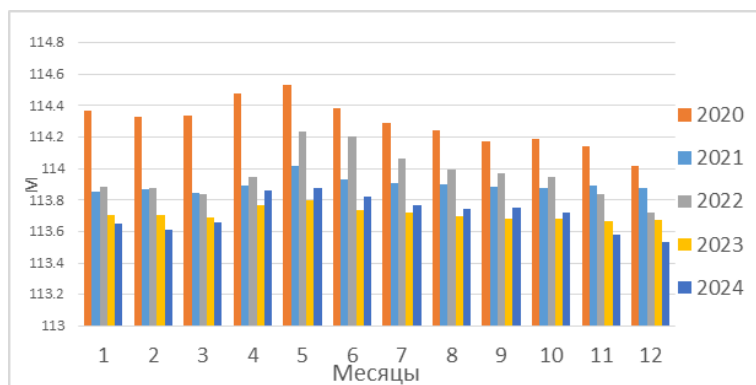


Рис. 5. Уровень грунтовых вод за период 2020-2025 гг.

Из графиков, полученных по изменению УГВ (рис. 5) видно, что минимальные значения достигаются в зимний период (декабрь-январь). Можно предположить, что в это же время происходит и максимальное промерзание грунтов возле земной поверхности. При замерзании грунта происходит увеличение скорости распространения сейсмических волн и снижение их затухания, что может улучшить качество регистрируемого сигнала.

Максимум УГВ приурочен к весеннему периоду. Из-за таяния снега и увеличения количества осадков происходит насыщение грунта водой, увеличивается скорость распространения сейсмических волн, изменяется акустический импеданс, что может

усиливать полезный сигнал, но одновременно повышает затухание высокочастотных составляющих и усиливает поверхностные волны. По имеющейся корреляции отношения S/N и УГВ в весенний период, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным временем для проведения работ является – май.

Летом происходит стабилизация как УГВ, так и динамических параметров, однако их показатели не самые высокие.

Таким образом на основании проведенных расчетов можно сделать вывод, что при проектировании режима сейсморазведочного мониторинга или при переводе мониторингового профиля из разряда ежемесячного в полугодовой, сейсморазведочные наблюдения оптимально проводить в два этапа: декабрь-январь и май-июнь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санфи́ров И. А., Чугаев А. В., Трапезникова А. Б., Тезиков А. Д. Направления развития сейсморазведочного мониторинга водозащитной толщи действующих соляных Горный журнал. – 2023. – № 11 – 535 с.
2. Санфи́ров И.А., Степанов Ю.И., Фаткин К.Б., Герасимова И.Ю., Никифорова А.И. Малоглубинные геофизические исследования на Верхнекамском месторождении калийных солей. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 6. С. 71-77.
3. Санфи́ров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ. Екатеринбург, УрО РАН, 1996.
4. Бобров В. Ю. Влияние климатического фактора на качество сейсмической записи.
5. Санфи́ров И.А., Ярославцев А.Г., Жи́кин А.А., Никифорова А.И., Байбакова Т.В. Особенности цифровой обработки в инженерной сейсморазведке МОГТ // Геофизика. 2012. №5. С. 35-41.

JUSTIFICATION OF REGULAR SEISMIC SURVEY OBSERVATIONS BASED ON DATA QUALITY ASSESSMENT

*Kirsanov Stanislav
MI UB RAS, Perm*

Summary. An analysis of the dynamic characteristics of seismic data over a specific period was conducted. A dependence on the timing of the survey was identified. Recommendations for designing a seismic monitoring regime were developed.

Key words: seismic survey, Verkhnekamsk salt deposit, signal-to-noise ratio.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кирсанов Станислав Константинович

Stas.kirsanov.85@mail.ru

ГИ УрО РАН, г. Пермь, инженер

Научный руководитель: Санфи́ров Игорь Александрович, д.т.н.

УДК 550.83.042

ВЫЯВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ УЧАСТКОВ ПРИ КОНТРОЛЕ СОСТОЯНИЯ ЦЕЛИКОВ И ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ НА ГИПСОВЫХ РУДНИКАХ

*Кокшаров Владимир Владимирович, Набатов Владимир Вячеславович
НИТУ МИСИС, г. Москва*

Аннотация. В статье рассматривается проблема контроля состояния целиков и водозащитной толщи на гипсовых рудниках, для предотвращения обрушений и поступления воды в выработки. В качестве основного метода контроля предлагается использование геофизического метода, а именно регистрации электромагнитной эмиссии (ЭМИ).

Ключевые слова: гипсовые рудники, контроль состояния целиков, водозащитная толща, электромагнитная эмиссия, геофизический метод, трещинообразование, геологическое строение.

Одной из проблем контроля на гипсовых рудниках является оценка состояния водозащитной потолочины и целиков. Вышележащие толщи обычно обводнены и в случае нарушения в этих элементах вода может начать поступать в выработки. Также обрушение может быть неожиданным, что может привести к порче оборудования и быть опасным для персонала. Распространённым решением здесь является использование геофизического контроля. Основными задачами являются: контроль состояния потолочины и целиков; а также контроль геометрических параметров водозащитные толщи (потолочины), которые могут меняться из-за воздействия БВР, а также вследствие изменения геологического строения участка.

В научных публикациях можно встретить различные способы обследования состояния горных массивов, и, в частности, гипсовых толщ, с помощью геофизических методов [1]. Для исследования состояния разреза могут применяться сейсморазведочные методы, однако по отдельности сейсмические методы имеют свои ограничения, которые можно преодолевать, используя несколько видов сейсмических методов, при этом не меняя для их проведения расстановки [2]. Самой заметной проблемой является низкое разрешение методов.

Активно используется метод георадиолокации [1, 3]. Достоинством метода является высокая разрешённость результатов, что позволяет выявлять зоны нарушенной целостности на небольшой глубине. Однако, как показано в исследованиях, проводимых в сложных горно-геологических условиях, георадиолокация сталкивается с рядом проблем, включая сложности в доступе к измеряемым объектам, необходимость накопления большого количества экспериментальных данных, что влечёт рост трудоёмкости и времени проведения работ. Довольно часто возникает проблема высокого затухания георадиолокационного сигнала. В таких условиях метод теряет свою эффективность, как это было продемонстрировано на гипсовых карьерах [3], где результаты исследований показали необходимость дополнительного использования других методов для точной оценки состояния массива. Вместе с тем на локальных участках георадиолокация может быть достаточно эффективным методом.

Довольно эффективным методом контроля состояния выработок на различных участках является использование метода регистрации электромагнитной эмиссии (ЭМИ — сокращение от словосочетания "электромагнитное излучение"). Источником ЭМИ являются процессы образования и прорастания трещин [4, 5]. Поскольку затухание в породном массиве для случая гипсовых толщ достаточно низкое, электромагнитное

излучение может распространяться из глубины массива в выработанное пространство, где оно может быть зарегистрировано с помощью магнитной антенны. Участки, на которых трещинообразование в глубине массива более интенсивно, характеризуются более высоким уровнем ЭМИ [6, 7].

При съёмке вдоль профиля возникает возможность выделения участков с повышенной активностью ЭМИ, а также дополнительно обследование участков, на которых уже произошли какие-либо геодинамические проявления, и необходимо оценить, как ведут себя эти участки в настоящий момент. Поскольку на некоторых участках могут существовать ситуации с повышением и понижением активности процессов трещинообразования во времени, помимо профилирования необходимо дополнительно производить измерения в ряде точек с одинаковыми интервалами времени.

При обследовании ряда гипсовых рудников был получен опыт проведения измерений методом регистрации ЭМИ. Для реализации метода был использован прибор контроля импульсного электромагнитного излучения «Ангел» (ООО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург). В качестве преобразователя электромагнитной эмиссии использовалась рамочная магнитная антенна в электростатическом экране с предварительным усилителем и ФВЧ (рис. 1). Регистрируемые с помощью «Ангела» частоты: 10-50 кГц. Результатом измерения прибора является ряд параметров ЭМИ. В процессе опробования наиболее информативным оказался параметр А, представляющий собой «показатель уровня пиковых амплитуд импульсов».



Рис. 1. Процесс съёмки с помощью комплекса ангел

Съёмки велись по схеме, когда первоначально проходилась профиль вдоль выработки, далее выделялись участки с повышенной активностью ЭМИ. В ряде этих участков производились дополнительные измерения с регистрацией изменения ЭМИ во времени. При профилировании активность ЭМИ регистрировалась при трёх различных положениях антенны. На стадии обработки данных эти измерения преобразовывались в три различных профиля. Подобная схема съёмки позволяла оценивать направление, откуда приходят сигналы ЭМИ (кровля либо целики).

На рисунке 2 представлен типичный пример результата измерений на профиле в зоне аномалии (представлен участок профиля для одного из положений антенны). На этом участке хорошо просматриваются две особенности поведения поля. В зоне влияния аномалии наблюдается плавное повышение уровня ЭМИ. Вместе с тем наблюдается выбросный характер поведения регистрируемого параметра – на аномальном участке хорошо видно, что значения параметра А испытывают резкие всплески и затухания. Это показывает необходимость проведения дополнительных измерений на наиболее важных участках, регистрирующих изменения параметра во времени, а не только в пространстве.

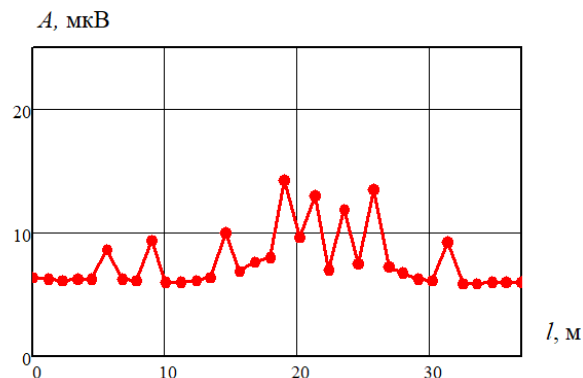


Рис. 2. Пример результатов, полученных при профилировании с помощью комплекса «Ангел»

Стоит отметить, что метод регистрации ЭМИ довольно сильно подвержен электромагнитным помехам. В выработках источниками этих помех могут быть системы питания, системы связи и оборудование. Поэтому в процессе полевых измерений необходимо тщательно продумывать план их проведения, а также оценивать влияние помех.

Ещё одним достаточно эффективным методом геофизического контроля является георадиолокация. Основой метода является излучение электромагнитных волн в объект контроля и последующая регистрация сигналов, приходящих из гипсовой толщи. Основная задача, которую можно решать этим методом это исследование структуры водозащитной толщи и целиков. Получаемая радиоволновая картина позволяет контролировать расслоение потолочины, изменение её мощности вследствие изменения геологических условий либо под воздействием взрывной отбойки.

Для решаемой задачи важно, что гипсовая толща характеризуется малыми потерями при прохождении волн, что позволяет георадиолокационному сигналу распространяться на достаточно большое расстояние. Важна также высокая разрешающая способность метода. При этом работа с георадарами на реальных рудниках показала проблему доступа к обследуемому объекту. Довольно часто потолочина находится на большой высоте, что требует специальной организации доступа к объекту контроля (например, работа с люльки). Это ограничивает возможности проведения измерений на длинных профилях и делает работу достаточно трудоёмкой.

Методы геофизических исследований, такие как сейсморазведка, георадиолокация и ЭМИ, предоставляют широкий инструментарий для изучения состояния горных массивов, однако каждый из них имеет свои ограничения. Таким образом, георадиолокация может применяться на локальных участках, где нужно произвести детальный анализ состояния кровли. В этом отношении она существенно проигрывает регистрации ЭМИ, которая даёт интегральную оценку состояния выработки и может быть использована для обследования протяжённых участков. Таким образом, можно отметить, что описанные методы могут дополнять друг друга и составлять эффективный комплекс. В то же время, интеграция различных методов позволяет значительно повысить точность и эффективность мониторинга, что особенно важно для предотвращения аварийных ситуаций и обеспечения безопасности горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казелле К., Бонетто С., Комина Ч., Стокко С., Георадарные исследования для предотвращения карстового риска в подземных гипсовых карьерах // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. № 25.

2. Чугаев А. В., Санфиров И. А. Многоуровневая сейсморазведка на Верхнекамском месторождении калийных солей: теория, практические решения // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2014. №1.
3. Кавардаков А. А., Кузин Е. Г., Пудов Е. Ю. Опыт применения георадиолокации в условиях шахты Котинская для оценки состояния подготовительных горных выработок // ГИАБ. 2016. №12.
4. Вознесенский А.С., Шкуратник В.Л., Набатов В.В., Куткин Я.О. Оценка устойчивости массива пород вокруг выработок по результатам контроля электромагнитного излучения в приконтурной области // ГИАБ. 2012, №10. С. 94-102.
5. Вознесенский А.С., Шкуратник В.Л., Набатов В.В., Куткин Я.О. Оценка устойчивости приконтурного массива пород по результатам совместных скважинных измерений параметров акустической и электромагнитной эмиссии // ГИАБ. 2013, №8. С. 64-70.
6. Кривецкий А. В., Бизяев А. А. Создание средств для лабораторных и натурных исследований электромагнитных и деформационных процессов в горных породах // ГИАБ. 2010. №6.
7. Бизяев А. А., Вострецов А. Г., Яковицкая Г. Е. Регистрационно-диагностический комплекс рдк рэми-3 и экспериментальные исследования разрушения горных пород в условиях подземных горных выработок таштагольского месторождения // Доклады АН ВШ РФ. 2015. №3 (28).

IDENTIFICATION OF DANGEROUS AREAS IN THE CONTROL OF THE CONDITION OF PILLARS AND WATER PROTECTION STRATA AT GYPSUM MINES

*Koksharov Vladimir Vladimirovich, Nabatov Vladimir Vyacheslavovich
NUST MISIS, Moscow*

Summary. The article deals with the problem of controlling the condition of pillars and water-protective strata at gypsum mines, which is critical for preventing collapses and water ingress into mine workings. The use of geophysical method, namely registration of electromagnetic emission is proposed as the main method of control.

Key words: gypsum ores, pillar condition control, water protection strata, electromagnetic emission, geophysical method, fracture formation, geological structure.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кокшаров Владимир Владимирович

koksharov1999@mail.ru

НИТУ МИСИС, г. Москва, аспирант

Научный руководитель: Набатов Владимир Вячеславович, к.т.н., доцент

Набатов Владимир Вячеславович

nabatov.vv@misis.ru

НИТУ МИСИС, г. Москва, к.т.н., доцент

УДК 553.982

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЕФТЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ФИЛЬТРАЦИИ ЗАКАЧИВАЕМОЙ ВОДЫ ПО ВЫСОКОПРОНИЦАЕМЫМ ПРОСЛОЯМ

¹Кузнецова Ксения Игоревна, ²Хозяинов Михаил Самойлович

¹ОИЯИ, г. Дубна

²Государственный университет «Дубна», г. Дубна

Аннотация. Предложена методика прогноза фильтрации закачиваемой воды по высокопроницаемым прослоям эксплуатируемого нефтяного пласта. Методика основана на использовании результатов индикаторных исследований для добавления в действующую гидродинамическую модель дополнительных параметров. Приведен пример использования методики на реальном месторождении.

Ключевые слова: разработка нефтяных месторождений заводнением, индикаторные (трассерные) исследования, гидродинамическая модель, высокопроницаемые прослои.

Многочисленные индикаторные исследования [1] показали, что практически в каждом нефтяном пласте-коллекторе присутствуют высокопроницаемые прослои (ВП). Однако их влияние на фильтрацию закачиваемой воды может варьироваться: от практически незначительного до существенного, в зависимости от гидропроводности ВП. Если гидропроводность ВП велика, закачиваемая вода может активно фильтроваться по ним, так как фазовая проницаемость по воде в этих прослоях растет быстро. Это снижает эффективность заводнения, поскольку вода не участвует в вытеснении нефти, что увеличивает затраты на добычу. Особенно важно это для месторождений, находящихся на третьей и четвертой стадиях разработки.

Реальным способом оценки фильтрации по ВП являются индикаторные (трассерные) исследования [2]. Они позволяют выявить наличие ВП и оценить их производительность на момент исследований. Однако прогнозировать фильтрацию закачиваемой воды в рамках действующей гидродинамической модели (ГДМ) невозможно, т.к. существующие модели не учитывают ВП. Автором предложена методика, позволяющая внести в гидродинамическую модель участка месторождения, на котором были проведены индикаторные исследования, дополнительные параметры для прогноза фильтрации закачиваемой воды по ВП с помощью моделирования на симуляторе. Суть методики в следующем. На первом этапе выбирают участок, на котором были проведены индикаторные исследования в течение 90-120 дней. Для достоверности результатов важно, чтобы индикатор поступил в максимально большое количество добывающих скважин вокруг нагнетательной скважины и количество не нулевых проб было не меньше 30-40 в каждой добывающей скважине. По результатам индикаторных исследований получают массу индикатора, пришедшую в каждую добывающую скважину за время исследований. В методике используют не поступление отдельных порций индикатора в добывающую скважину, а суммарное количество индикатора, поступившее в каждую добывающую скважину за время исследований, т.е. все ВП для каждой пары «нагнетательная скважина – добывающая скважина» заменяются на один «эквивалентный» прослой, обеспечивающий перенос фактического количества индикатора. В этом случае для расчетов в модели будет использоваться количество «эквивалентных» ВП, равное количеству добывающих

скважин, в которые поступил индикатор. Определяют долю индикатора, поступившую в каждую добывающую скважину, от общего количества закачанного индикатора. Масса индикатора определяется как произведение концентрации индикатора в пробе на дебит воды добывающей скважины. Добиться совпадения расчетного и фактического количества индикатора можно только используя фактический дебит воды. В дальнейшем будем называть результаты полевых исследований «фактическими», а результаты, полученные при расчетах на симуляторе – «расчетными». На втором этапе обеспечивают совпадение дебитов воды в каждой добывающей скважине и приемистость нагнетательной скважины в модели исследуемого участка и фактических данных в пределах 10%. Для этого «вырезают» из действующей модели месторождения участок, в который входят все скважины, вовлеченные в индикаторные исследования, а также все окружающие их по периметру ближайшие нагнетательные и добывающие скважины. Дальнейшие расчеты проводят на этой модели участка, не меняя использованные в ГДМ значения пористости, координаты скважин, толщину пласта, PVT-свойства, функцию Баклея-Левретта и др., кроме проницаемости. Для дальнейших расчетов используют следующий методический прием. Всю площадь модели участка делят на прямоугольники (квадраты), в центре каждого расположена одна нагнетательная или добывающая скважины, и присваивают каждому прямоугольнику значение проницаемости, равное среднему по участку в действующей ГДМ. Проводят расчет фильтрации и сравнивают расчетные значения приемистостей и дебитов с фактическими. Проводят повторные расчеты, изменяя значения проницаемостей прямоугольников, и добиваются совпадения расчетных и фактических дебитов и приемистости в скважинах, вовлеченных в индикаторные исследования, в пределах 10% (точность фактических измерений). Значения дебитов и приемистостей окружающих скважин, присутствующих в модели участка, но не задействованных в индикаторных исследованиях, также подбираются путем изменения проницаемости прямоугольников, но они в расчетах неэффективно закачиваемой воды не участвуют, а используются только для обеспечения материального баланса, т.е. выполняют роль «буферной» зоны. Полученное распределение проницаемостей на модели участка в дальнейших расчетах не меняется. На третьем этапе добавляют в модель участка очень тонкий слой, порядка нескольких сантиметров, в котором строят «эквивалентные» ВП, имитирующие высокопроницаемые прослои. Всему этому слою присваивают одинаковые значения пористости и проницаемости, равные средним значениям действующей ГДМ месторождения, за следующими исключениями. Во-первых, ячейкам в модели, в которых располагаются нагнетательная и добывающие скважины, присваивают значение проницаемости равную 20 мкм^2 , что обеспечивает приход индикатора по высокопроницаемым прослоям за 120 дней. Такой подход позволяет не подбирать другие параметры используемой модели для обеспечения этого условия. Во-вторых, между нагнетательной и каждой добывающей скважиной, в которую поступил индикатор, строят «эквивалентный» ВП в виде набора ячеек, 1-4 ячеек по ширине по прямой между двумя скважинами, обеспечивающий поступление индикатора в количестве равном фактическому. Такие ВП надо рассматривать как используемые для расчетов «эквивалентные» реальным высокопроницаемым прослоям по производительности, а не как уточняющие строение пласта. Фактические значения распределения массы индикатора между добывающими скважинами получены в процессе полевых работ. В соответствии с этим распределением ячейкам «эквивалентных» ВП присваивается значение проницаемости, пропорциональное количеству извлеченного из этих скважин индикатора. Количество ячеек подбирают исходя из приемистости нагнетательных скважин. Затем рассчитывают фильтрацию нагнетаемой воды на модели участка и определяют массы индикатора, поступившие в каждую добывающую скважину по «эквивалентным» ВП. Полученные расчетные значения сравнивают с фактическими, совпадение должно быть в пределах 10%. Если в первом варианте

расчета совпадение не достигнуто, то повторяют расчет, меняя значения проницаемостей. В результате реализации трех этапов методики получают модель участка, в которой есть основной пласт, с выделенными геометрически правильными областями вокруг каждой скважины, имеющими свое значение проницаемости и тонкий пласт, в котором построены «эквивалентные» ВП, имитирующие высокопроницаемые прослои. Такая модель, учитывающая взаимодействие по закачке воды каждой пары «нагнетательная – добывающая скважина», позволяет проводить расчеты по оценке неэффективного заводнения более точно, чем при использовании действующей ГДМ, что будет показано далее на примере.

В качестве примера реализации методики был выбран участок нефтяного месторождения, на котором ранее были проведены полевые индикаторные исследования. Площадь выбранного участка 6.9 км² (2625×2625м). Начальная водонасыщенность составляла 0.4, средний перепад давления между скважинами 30.4 МПа, общая толщина пласта составила 10 м, пористость 16%. Распределение проницаемости по осям *x* и *y* было одинаковым. На рисунке 1 приведена схема выбранного расширенного участка месторождения, который включает скважины 1-21, а именно нагнетательную скважину 13, в которую была закачана меченая вода, ближайшие окружающие добывающие скважины 7, 8, 9, 12, 14, 18, 19, 20, в которые поступил индикатор, и прилегающие по периметру нагнетательные и добывающие скважины 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21. Нагнетательные скважины отображены как кружочек перечеркнутый крестиком, добывающие как черный кружочек. В нагнетательную скважину 13 произвели разовую закачку 100 кг меченой воды, и в течение 120 дней осуществляли отбор проб из окружающих добывающих скважин. Сравнение фактических и расчетных значений отобранного индикатора приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение фактических и расчетных значений отобранного индикатора

Номера скважин	Фактическое значение количества индикатора, %	Расчетное значение количества индикатора, %	Расхождение, %
7	12.58	12.2	2.8
8	10.07	10.0	0.5
9	11.25	11.7	4.3
12	13.69	13.7	0.0
14	0.75	0.8	4.5
18	11.16	10.9	2.6
19	11.72	11.0	5.9
20	28.78	29.6	3.0

На рисунке 1 выделены квадраты, на которые был разделен участок по проницаемости. Сравнивая расчетные и фактические значения приемистости и дебитов скважин, были подобраны значения проницаемостей квадратов (таблица 2).

Далее в модель расширенного участка добавили тонкий прослой толщиной 2 см, в котором были построены эквивалентные ВП (на рисунке 1 показаны стрелками). На данном участке значения проницаемостей составляют: в направлении скв. 7 – 0.75 мкм² (стрелка 27), скв.8 – 0.18 мкм² (стрелка 28), скв.9 – 0.70 мкм² (стрелка 29), скв.12 – 0.23 мкм² (стрелка 30), скв.14 – 0.10 мкм² (стрелка 31), скв.18 – 0.70 мкм² (стрелка 32), скв.19 – 0.20 мкм² (стрелка 33), скв.20 – 1.40 мкм² (стрелка 34).

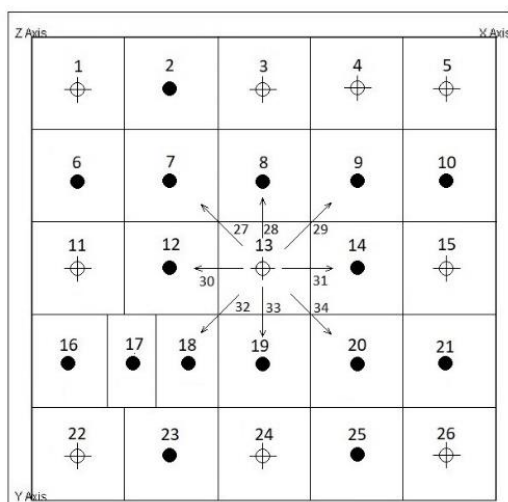


Рис. 1. Схема расположения скважин

Таблица 2

Значения проницаемостей для выделенных участков

№ скважины	Проницаемость, мкм ²	№ скважины	Проницаемость, мкм ²
1	0.045	14	0.021
2	0.015	15	0.035
3	0.027	16	0.012
4	0.027	17	0.008
5	0.027	18	0.026
6	0.011	19	0.009
7	0.025	20	0.026
8	0.017	21	0.014
9	0.041	22	0.026
10	0.014	23	0.015
11	0.036	24	0.018
12	0.006	25	0.015
13	0.027	26	0.042

Остальным ячейкам тонкого прослоя присвоены одинаковые значения пористости (16%) и проницаемости (0.016 мкм²), равные средним значениям модели месторождения. Ячейкам, в которых расположены скважины 13, 7, 8, 9, 12, 14, 18, 19, 20, присваивают значение проницаемости равное 20 мкм², что обеспечивает поступление индикатора по высокопроницаемым прослоям за 120 дней. Затем на модели участка с дополнительными параметрами было проведено моделирование фильтрации нагнетаемой воды в двух вариантах: при наличии ВП и при отключенных ВП, например, путем проведения выравнивания профиля приемистости. Результаты моделирования по первому варианту совпали с фактическими. По второму варианту было получено сокращение закачки, что привело к уменьшению добычи воды на 33%. При этом добыча нефти практически не изменилась: фактическая добыча на регулируемом участке составила 141.0 м³/сутки, расчетная на использованной модели 141.7 м³/сутки. Таким образом, предложенная методика [3] позволяет прогнозировать фильтрацию закачиваемой воды по ВП и эффективность предлагаемых мероприятий по ее сокращению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хозяинов М.С., Чернокожев Д.А., Кузнецова К.И. Индикаторный (трассерный) метод исследования фильтрационных процессов в нефтяном пласте. Москва: КУРС, 2022. 128 с.
2. Соколовский Э.В., Соловьев Г.Б., Тренчиков Ю.И. Индикаторные методы изучения нефтегазоносных пластов. М.: Недра, 1986. 157 с.
3. Кузнецова К.И., Хозяинов М.С., Чернокожев Д.А. Способ управления заводнением неоднородного пласта-коллектора нефтяного месторождения. Патент на изобретение №2830835, 17.06.2024.

USING THE HYDRODYNAMIC MODEL OF AN OIL FIELD TO CALCULATE FILTRATION INJECTED WATER THROUGH HIGHLY PERMEABLE LAYERS

¹*Kuznetsova Ksenia Igorevna, ²Khoziainov Mikhail Samoilovich*

¹*JINR, Dubna*

²*Dubna State University, Dubna*

Summary. A method for predicting the filtration of injected water through highly permeable layers of an exploited oil reservoir is proposed. The methodology is based on using the results of tracer studies to add additional parameters to the current hydrodynamic model. An example of using the technique in a real field is given.

Key words: development of oil fields by flooding, tracer research, hydrodynamic model, highly permeable layers.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецова Ксения Игоревна

primy@yandex.ru

ОИЯИ, г. Дубна, инженер

Научный руководитель: Хозяинов М.С., д.т.н.

Хозяинов Михаил Самойлович

mkhoz@mail.ru

Государственный университет “Дубна” г. Дубна, профессор

УДК 537.876.23

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РУДНОГО ТЕЛА (ИНДУКЦИОННОЙ МАССЫ И ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ) НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИГНАЛЫ ЗСБ

*Личная Алёна Евгеньевна
НГТУ, ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск*

Аннотация. В работе рассматривается задача оценки влияния таких параметров как глубина залегания верхней кромки и индукционной массы проводящего объекта (рудного тела) на сигналы зондирования становлением по данным численного моделирования. Для этого была проведена серия вычислительных экспериментов с рудными телами на разных глубинах и выявлен линейный характер сдвига аномальных сигналов ЭДС от глубины залегания руды. Так же была проведена серия экспериментов для определения влияния индукционной массы с разными значениями УЭП и неизменном объеме объекта на аномальные сигналы ЭДС.

Ключевые слова: численное моделирование, зондирование становлением, рудные тела, индукционная масса, глубина верхней кромки рудного тела.

Рассматривается задача моделирования электрического поля и сигналов электродвижущей силы (ЭДС) в приемных петлях для метода становления поля в ближней зоне. В поставленной задаче моделью является слабопроводящая среда, с расположенным внутри проводящим пластообразным рудным телом. В работе в качестве модельного выбран объект, геометрические размеры которого равны 300х200х10 м. Зондирующая установка представляет собой генераторную петлю квадратной формы со стороной 500м и 49 приемных петель со стороной 100м, расположенных по площади с расстоянием между центрами 50м (рис. 1). Глубина залегания верхней кромки объекта варьируется от 40 до 190м. Взаимное расположение рудного объекта и зондирующей установки представлено на рис.1. Целью данной работы является выявление зависимостей сигналов ЭДС от таких параметров рудного тела, как глубина залегания верхней кромки и индукционная масса.

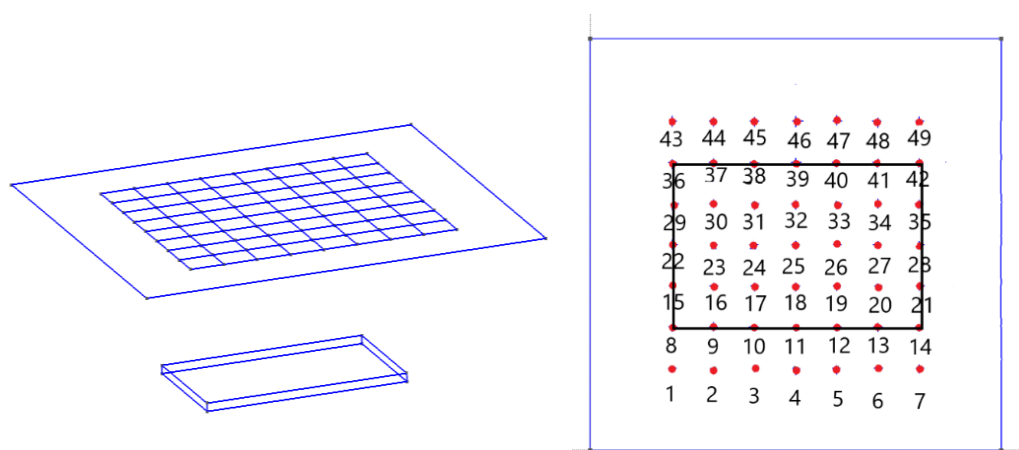


Рис. 1. Расположение зондирующей установки и рудного объекта

Для расчетов использовались следующие параметры среды. Вмещающая среда обладает не магнитными свойствами и удельным электрическим сопротивлением (УЭС)

1000 Ом. Рудный объект также не магнитный с УЭС 5 Ом. Время регистрации сигналов ЭДС до 5 мс после выключения тока. Амплитуда тока в генераторной петле 20 А. Сигналы ЭДС в приемных катушках получены с помощью программы трехмерного численного моделирования электрического поля ImpsoundV2 (Штабель Н.В., ИНГГ СО РАН). Численное моделирование выполнено векторным методом конечных элементов [1]. Полученные сигналы ЭДС для моделей с рудным объектом на разной глубине представлены на рисунке 2.

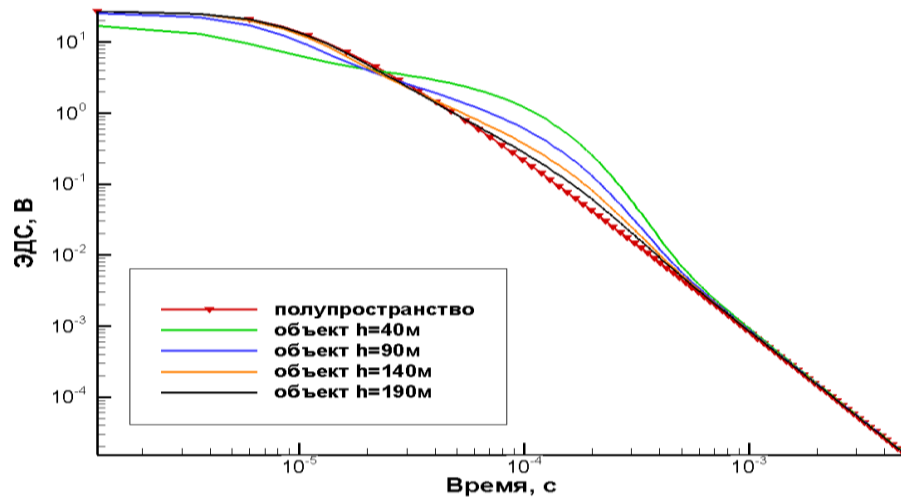


Рис. 2. ЭДС в петле 25 для модели с объектами на разной глубине и полупространства

Для анализа степени влияния рудного объекта на сигналы ЭДС важным является рассмотрение не самих кривых ЭДС, а кривых относительной разницы сигналов ЭДС, полученных для моделей с рудным телом и полупространством с УЭС вмещающей среды (модель без объекта). Это можно рассчитать с помощью формулы:

$$\frac{(\text{ЭДС}_{\text{объекта}} - \text{ЭДС}_{\text{среды}})}{\text{ЭДС}_{\text{среда}}} \cdot 100\% . \quad (1)$$

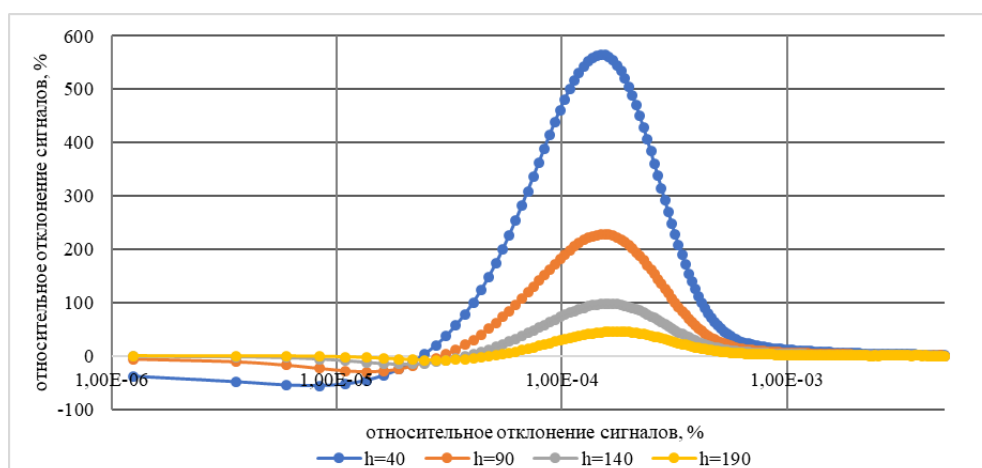


Рис. 3. Относительное отклонение сигналов ЭДС с рудными телами по сравнению с полупространством для петли 25 для объекта с размерами 300x200x10 м (в логарифмической шкале): объект расположен на глубинах 40, 90, 140, 190м

В дальнейшем данные графики будем называть графиками аномалии сигнала. Относительное отклонение сигналов ЭДС с рудными телами по сравнению с

полупространством представлено на рисунке 3. Мы можем наблюдать два экстремума отклонения сигналов: минимум, наступающий на ранних временах, и максимум, наступающий на средних временах. В тот момент, когда фиксируется минимум, можно наблюдать максимальное занижение кривой ЭДС от рудного объекта относительно полупространства. При этом момент достижения максимума отклонения характерен для максимального аномального поля от рудного тела. Из рисунка 3 видно, что времена достижения точек экстремумов смещаются с увеличением заглубления рудного тела, а величина экстремума уменьшается нелинейно.

Представим зависимости времен достижения максимума и минимума от глубины подошвы рудного тела на графиках (рис. 4). Из графиков видно, что с ростом глубины залегания подошвы рудного тела происходит рост времени достижения максимальной и минимальной разницы сигналов для моделей с рудным телом и полупространством. Эта зависимость носит практически линейный характер.

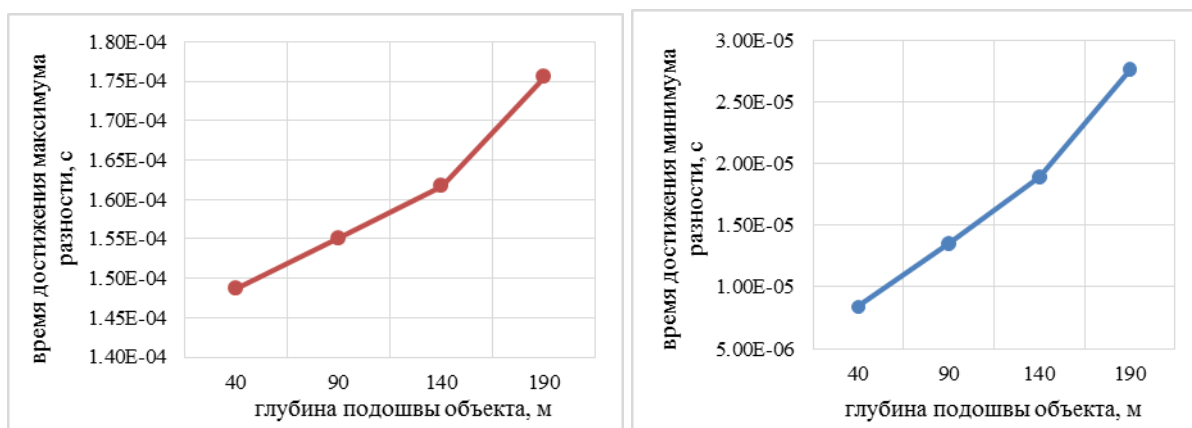


Рис. 4. Зависимости времени достижения максимума (слева) и минимума (справа) относительной разницы ЭДС от глубины подошвы рудного тела в петле 25

По графикам, представленным на рисунке 4, можно построить уравнения для определения глубины залегания подошвы рудного объекта от времени достижения максимума или минимума соответственно [1]:

$$h(t_{\max}) = 4.891 \cdot 10^6 \cdot t_{\max} - 668.51, \quad (2)$$

$$h(t_{\min}) = 7.097 \cdot 10^6 \cdot t_{\min} - 6.03, \quad (3)$$

где $t_{\max}$ – время достижения максимума разницы сигналов, $t_{\min}$ – время достижения минимума разницы сигналов, h – оценка глубины залегания кровли рудного тела.

В следующем вычислительном эксперименте оценим влияние индукционной массы. Для этого следует зафиксировать глубину залегания и объем рудного тела, при этом необходимо изменять УЭС объекта. В качестве модельного выбран все тот же объект с геометрическими размерами 300x200x10 м. Зафиксируем его верхнюю кромку на глубине $h=40$ м относительно дневной поверхности. Электропроводность объекта равна 0.05 См/м, 0.1 См/м, 0.2 См/м. Индукционные массы вычислим по формуле: $IM_i = V_{\sigma_i} \cdot \sigma_i$, где V_{σ_i} – объем i -го рудного тела, σ_i – удельная электропроводность i -го рудного тела. В таком случае индукционные массы равны 30 000 См·м², 60 000 См·м², 120 000 См·м² соответственно. Относительное отклонение сигналов ЭДС с рудными телами по сравнению с полупространством при изменении индукционной массы представлено на рисунке 5. Из графика следует, что момент достижения минимума разности отклика $t_{\min}$ наступает через 6 мкс после выключения подачи силы тока для всех моделей одинаково вне зависимости от величины индукционной массы.

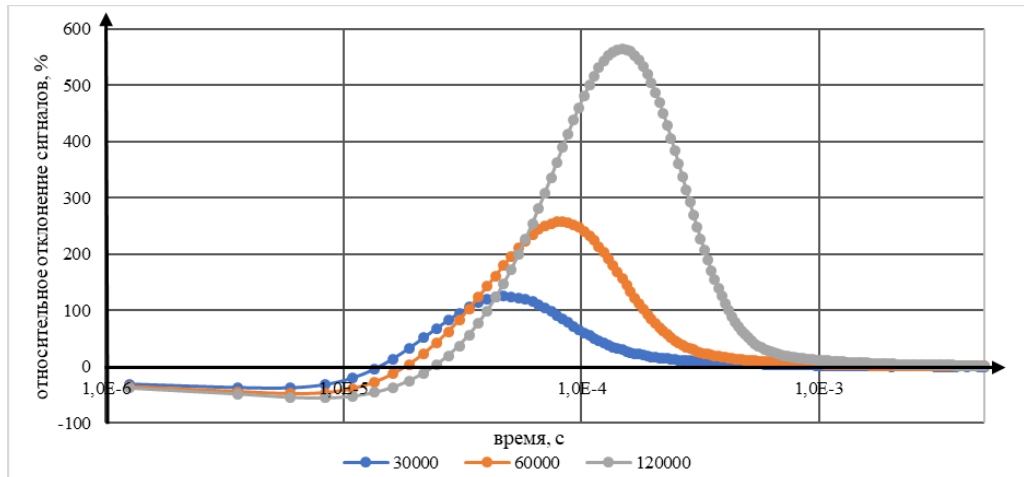


Рис. 5. Относительное отклонение сигналов ЭДС для петли 25 и $h=40$ м для моделей с разной индукционной массой (в логарифмической шкале по времени)

Однако время наступления максимума отклика $t_{\max}$ и амплитуда аномалии претерпевает изменения по мере возрастания значения индукционной массы. Данная зависимость носит линейный характер и представлена на рис. 6. Это связано с увеличением контраста между значениями удельного электрического сопротивления среды.

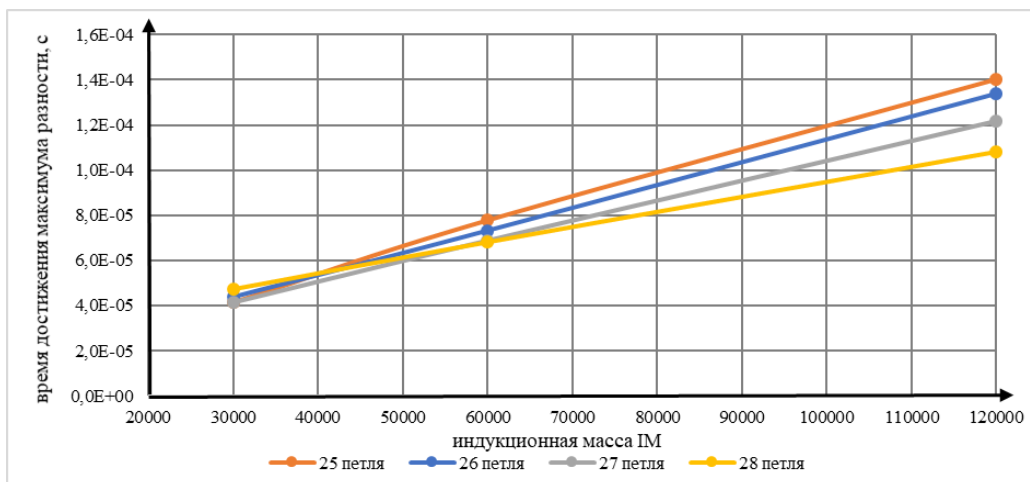


Рис. 6. Зависимость времени достижения максимума разности от индукционной массы при неизменном объеме для $h=40$ м

Данная зависимость легко описывается линейными уравнениями. Но зависимость амплитуды разности сигналов ЭДС от индукционной массы довольно неоднозначная. Амплитуда комплексно зависит еще от многих параметров рудного объекта, и данную зависимость невозможно представить в виде уравнения только от индукционной массы.

Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что индукционная масса пропорциональна интервалу возрастания аномалии Δt (разница между временами достижения экстремумов). Эта зависимость может быть выражена следующим образом:

$$IM(\Delta t_{25}) = 9.20 \cdot 10^8 \cdot \Delta t - 1.02 \cdot 10^4, \quad (4)$$

где IM – индукционная масса, t – оценка параметра времени нарастания.

В работе выявлены зависимости аномальных сигналов ЭДС от глубины залегания рудного тела и его индукционной массы в слабопроводящей среде. По данным зависимостям предложены уравнения для оценки глубины залегания рудного тела по параметрам: моментам времен достижения локальных минимумов и максимумов, определяемых с помощью сигналов ЭДС. Также наблюдается линейная зависимость между интервалом нарастания сигнала и индукционной массой, которая может быть выражена в виде уравнения для оценки индукционной массы по временам возрастания аномалии сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта FWZZ-2022-0030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Личная А.Е., Штабель Н.В. Оценка влияния глубины залегания рудного тела на электромагнитные сигналы ЗСБ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь - XX Международный научный конгресс. Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 8 т. – 2024. – Т. 2. – № 4. – С.224-232.

ESTIMATION OF INFLUENCE OF ORE BODY PARAMETERS (INDUCTION MASS AND DEPTH OF OCCURRENCE) ON SIGNALS OF ELECTRIC SOUNDING

*Lichnaya Alyona Evgenievna
NSTU, IPGG SBRAS, Novosibirsk*

Summary. The paper considers the problem of evaluating the influence of such parameters as the depth of occurrence of the upper edge of the conducting object (ore body) and its induction mass on the signals of probing by formation according to numerical modeling data. For this purpose, a series of computational experiments with ore bodies at different depths were conducted and the linear character of the shift of anomalous EMF signals from the depth of occurrence of ore was revealed. Also, a series of experiments was carried out to determine the influence of induction mass with different values of conductivity and fixed volume of the object on the anomalous EMF signals.

Key words: numerical modeling, formation sounding ore bodies, induction mass, depth of the upper edge of the ore body.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Личная Алёна Евгеньевна

lichnayaae@ipgg.sbras.ru

НГТУ, г. Новосибирск, студентка 4 курса

ИНГТ СО РАН, г. Новосибирск, лаборант

Научный руководитель: Штабель Надежда Викторовна, к.ф.-м.н.

УДК 550.838

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА ШЕЛЬФЕ КАРСКОГО МОРЯ

^{1,2}*Медведев Пётр Дмитриевич, ¹Кочетов Михаил Владимирович*¹*АО МАГЭ, г. Москва*²*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

Аннотация. Одной из задач, решаемых при проведении инженерно-геологических изысканий на акваториях является выявление потенциально опасных областей для постановки плавучей буровой установки. В работе представлены результаты обработки и интерпретации инженерной гидромагнитной съёмки в комплексе с сейсморазведкой высокого разрешения, выполненной на площадке в южной части шельфа Карского моря. Проведена качественная интерпретация аномального магнитного поля и его трансформант, а также 2D геомагнитное моделирование по профилю, пересекающему потенциально опасные геологические структуры. В результате комплексной интерпретации удалось выделить палеоврезы и определить значения магнитной восприимчивости пород разреза.

Ключевые слова: гидромагнитная съёмка, инженерно-геологические изыскания, комплексная интерпретация, палеоврезы, геомагнитное 2D моделирование.

Введение. Главная задача инженерно-геологических исследований на шельфе заключается: в комплексном изучении особенностей строения верхней преимущественно горизонтально-слоистой части разреза до глубины одного километра, определении инженерно-геологических и инженерно-геокриологических условий района работ, а также в поиске потенциально опасных объектов и неблагоприятных явлений для строительства морской нефтегазовой инфраструктуры. Конечной целью исследований является определение возможности размещения полупогружных и плавучих буровых установок в проектной точке.

В июле 2022 года специалисты АО «МАГЭ» на ИС «Аквamarin» выполнили гидромагнитные наблюдения в комплексе с высокоразрешающей сейсморазведкой в южной части шельфа Карского моря на участке инженерно-геологических изысканий площадью 25 км². Измерения проведены на 51 меридиональном и 26 широтных профилях. Расстояние между меридиональными профилями – 100 м, широтными – 200 м. Длина каждого профиля 5 км. Всего на объекте выполнено 385 пог. км комплексных наблюдений.

Гидромагнитная съёмка входит в стандартный комплекс геофизических методов при инженерно-геологических изысканиях и выполняется с целью обнаружения и картирования магнитоактивных неоднородностей на морском дне и в верхней части осадочного чехла, как техногенного характера, так и геологической природы [1].

Методика съёмки и обработки данных. Измерения модуля полного вектора индукции магнитного поля (МП) T проводились магнитометром SeaSPY2. Для определения глубины погружения магнитометров в них установлен датчик давления. Пространственная привязка съёмочных игалсов осуществлялась с точностью ± 0.5 м. Регистрация данных выполнялась на скорости 2,5 узла с частотой дискретизации 1 с.

Гидромагнитная съёмка выполнена с огибанием рельефа морского дна. Для буксировки магнитометров использовалась лебедка, которой регулировалось заглубление магнитометра. Глубина моря на участке исследований варьирует от 91 до 122 метров. На

протяжении всех работ магнитометр удерживался в коридоре глубин 10-20 метров от донной поверхности и на удалении от судна в 200-250 метров. Длина судна 50 метров.

Данный методический подход позволил регистрировать сигнал от самых незначительных по размерам магнитоактивных неоднородностей и минимизировать девиационную помеху в наблюдениях. Оставшаяся девиационная составляющая компенсировалась на стадии уравнивания съёмки. Для учета вариаций МП использовалась донная магнитовариационная станция *Sentinel*, установленная непосредственно в районе работ. Обработка гидромагнитной съёмки осуществлялась в программном комплексе Geosoft Oasis montaj.

Чтобы не потерять возможные низкоамплитудные аномалии, фильтрация наблюдаемых значений МП была минимальной – применялся фильтр Баттерворта шириной 15 метров. Аномальное магнитное поле (АМП) рассчитывалось по формуле:

$$\Delta T_a = T - T_n - \delta T \quad (1)$$

где T — измеряемая величина (полный вектор индукции) МП, T_n — нормальное МП Земли, δT — вариации МП. По вычисленным значениям АМП в точках пересечения меридиональных и широтных профилей оценивалась средняя квадратичная погрешность (СКП) съёмки. После вычисления невязок АМП осуществлялось уравнивание измерений итеративным способом. При количестве точек пересечений профилей $n = 1326$ СКП съёмки до уравнивания составила: ± 1.3 нТл, после уравнивания трендами 0-1 степени ± 1.1 нТл. По уравненным значениям поля рассчитывалась цифровая модель (ЦМ) АМП с ячейкой интерполяции 25 метров (рис. 1).

К наиболее распространённым опасным геологическим объектам можно отнести: области развития мерзлых грунтов, палеоврезы и палеодепрессии, а также интервалы разреза с повышенной газонасыщенностью [2]. Исследуемые объекты поисков проявляются в высокочастотной составляющей МП, и для их выделения использовалась локальная составляющая АМП, которая рассчитывалась методом пересчёта исходного поля (ис.1) в верхнее полупространство на высоту 150 м (рис. 2) и дальнейшего вычитания результатов пересчёта из исходных данных (рис. 3).

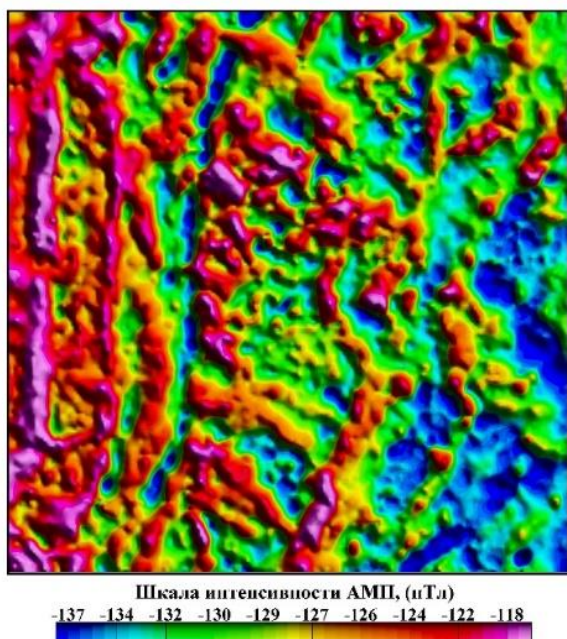


Рис. 1. ЦМ АМП

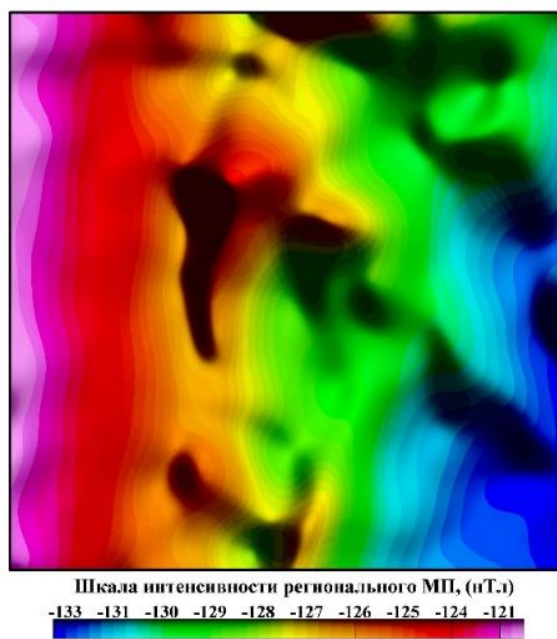


Рис. 2. ЦМ региональных АМП

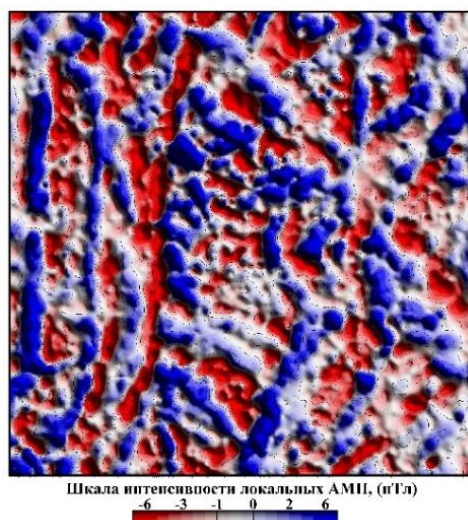


Рис. 3. Карта локальной составляющей АМП исследуемого участка

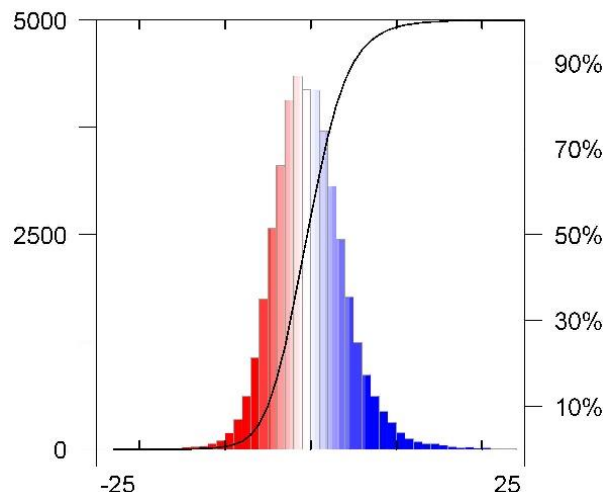


Рис. 4. Гистограмма распределения локальных АМП

Результаты интерпретации и их обсуждение. Площадь исследований расположена в пределах высокоградиентной зоны АМП с основным субмеридиональным простиранием изоаномал (рис. 2). В региональном МП отчётливо наблюдается изменение уровня поля с запада на восток от -120 нТл до -134 нТл (рис. 2). На фоне этого широтного «уклона» МП интерферируют положительные региональные аномалии диагонального простирания ЮВ-СЗ. Севернее центральной части площади фиксируется каплевидная магнитоактивная неоднородность с раскрытием на север интенсивностью до 9 нТл. Структура проявляется во всех трансформантах АМП, но при этом имеет яркие очертания только в региональном МП (рис 1, 2, 3). По данным сейсморазведки высокого разрешения (СВР) выяснено, что аномалия имеет геологическую природу и связана с палеоврезом. Выделенные региональные неоднородности имеют геологическую природу.

АМП интенсивно осложнено линейными локальными аномалиями (рис. 3). Статистическая обработка массива данных локальной составляющей АМП показала, что амплитуда аномалий изменяется в диапазоне от -22.4 до +23.5 нТл при стандартном отклонении 4.1, что выше погрешности съёмки (рис. 3, 4). Около 90% аномалий по величине не превышают 6 нТл (рис. 4). Все выделенные магнитоактивные неоднородности отражают геологические особенности и процессы в осадочном чехле

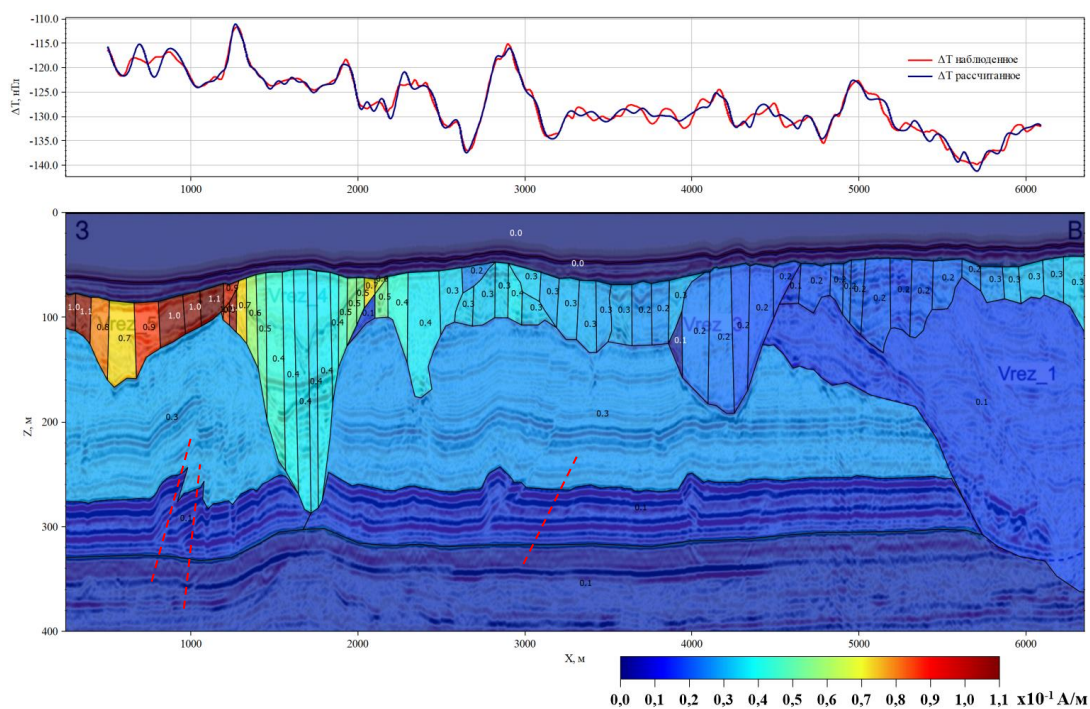
Участок исследований имеет сложное геологическое строение. Выделяется множество линейных аномалий меридионального простирания, но присутствует и диагональное направление юго-восток – северо-запад и юго-запад – северо-восток. Линейные структуры трассируются классическими положительными аномалиями МП интенсивностью от 2 до 25 нТл. Севернее центра схемы выделяются положительные изометричные аномалии интенсивностью до 16 нТл и шириной от 300 м до 530 м. В южной части схемы выделяется область положительных амплитуд интенсивностью до 21 нТл и протяжённостью 1 км на север.

По данным СВР в западной части района работ оси линейных положительных аномалий меридионального простирания соответствуют серии параллельных палеоврезов. Можно предположить, что линейные аномалии диагонального простирания маркируют зоны тектонических нарушений, залеченные магнитоактивными телами, а локальные линейные аномалии определяют разломы малой мощности и зоны трещиноватости.

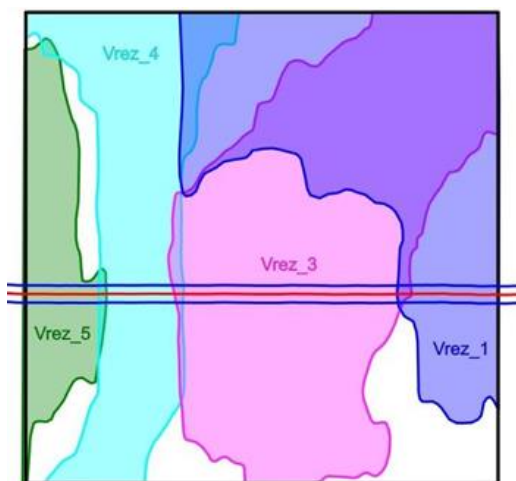
Палеоврезы и палеодолины – геологические опасности, представляющие большую угрозу для строительства нефтегазовой инфраструктуры. Природа палеодепрессий в изучаемом районе может быть различной – они могут представлять собой эрозионные

врезы, выработанные палеореками во время наиболее крупных регрессий (в позднем миоцене, в среднем плиоцене, в среднем и позднем неоплейстоцене), структуры проседания, образовавшиеся при развитии подрусловых таликов, крупные посткриогенные деформации и др. По сейсмическим данным не всегда возможно достоверно идентифицировать эти образования и определить их генезис [2].

В результате анализа данных СВР до глубины 400 метров, разрез был расчленен на пять сейсмических комплексов (СК), которые разделены следующими отражающими горизонтами (ОГ): Н0 (поверхность морского дна), Н1, Н2, Н3, Н4, Н5 (рис. 5). Выделенные по сейсмоакустическим данным границы стали «каркасом» для построения геомагнитного разреза по профилю, пересекающему площадь работ по направлению 3-В и пересекающему потенциально опасные структуры (рис. 5).



a



b

Рис. 5. Геомагнитный разрез по результатам 2D моделирования (a); и его расположение в плане на площади работ (b)

Процесс моделирования заключается в итеративном подборе свойств разреза до уменьшения невязки между графиками измеренного и расчетного поля до значений СКП съемки ± 1.1 нТл. По результатам моделирования установлено, что магнитоактивные

массы располагаются в верхней части разреза и приурочены к палеоврезам (рис. 5). Вмещающие породы бассейна Карского моря сложены преимущественно песчаниками и глинами и практически немагнитны. Увеличение значений магнитной восприимчивости наблюдается в бортовых частях палеоврезов, что может являться признаком присутствия на границах гидроокислов и сульфидов железа.

Результаты комплексного анализа гидромагнитных и сейсмоакустических данных позволяет уточнить морфологию разреза и его геолого-геофизические свойства.

Выводы. Основным условием успешного решения геолого-геофизических задач в рамках инженерно-геологических изысканий на акваториях выступает применение комплексного подхода к интерпретации данных сейсморазведки и морской магнитометрии. Результаты интерпретации, представленные в статье, демонстрируют взаимодополняемость методов и их эффективность в решении задач выявления палеоврезов, уточнения морфологии их границ и определения геолого-геофизических свойств разреза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочетов М.В. Гидромагнитные исследования при решении инженерно-геологических задач на арктическом шельфе // Двадцать четвёртая уральская молодёжная научная школа по геофизике: Сборник науч. Материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2023. – С. 99-103.
2. Колюбакин А.А., Миронюк С.Г., Росляков А.Г. и др. Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых // Инженерные изыскания. – 2016. – № 10-11. – С. 38-51.

COMPREHENSIVE GEOPHYSICAL STUDIES FOR SOLVING ENGINEERING-GEOLOGICAL TASKS ON THE KARA SEA SHELF

^{1,2}*Medvedev Petr Dmitrievich, ¹Kochetov Mikhail Vladimirovich*

¹*MAGE, Moscow*

²*MSU, Moscow*

Summary. One of the key objectives in conducting engineering-geological surveys in aquatic areas is the identification of potentially hazardous zones for the deployment of floating drilling rigs. This paper presents the results of processing and interpreting engineering hydromagnetic surveys combined with high-resolution seismic exploration conducted at a site in the southern part of the Kara Sea shelf. A qualitative interpretation of the anomalous magnetic field and its transforms was carried out, along with 2D geomagnetic modeling along a profile intersecting potentially hazardous geological structures. As a result of the integrated interpretation, paleo-incisions were identified, and the magnetic susceptibility values of the rock section were determined.

Key words: hydromagnetic survey, engineering-geological surveys, integrated interpretation, paleo-incisions, 2D geomagnetic modeling.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Медведев Пётр Дмитриевич

petr.medvedev@mage.ru

АО МАГЭ, г. Москва, инженер-геофизик

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Кочетов Михаил Владимирович

kochetov.mv@mage.ru

АО МАГЭ, г. Москва

Научный руководитель: Золотая Людмила Алексеевна, к.г.-м.н.

УДК 550.348.098.3

УТОЧНЕНИЕ КАЛИБРОВОЧНОЙ КРИВОЙ ШКАЛЫ ЛОКАЛЬНЫХ МАГНИТУД ДЛЯ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА

*Мизёва Екатерина Владимировна
ПГНИУ, г. Пермь*

Аннотация: В работе представлен расчёт уточненной калибровочной кривой шкалы локальных магнитуд ML для Уральского региона на большом объеме сейсмических данных за период 2018-2024 гг. Представлено сравнение с предыдущими вариантами, полученными в 2006 и 2015 году.

Ключевые слова: землетрясение, шкала локальных магнитуд, сейсмическая станция, калибровочная кривая.

Введение

Идея создания шкалы величин или магнитуд землетрясений, основанной исключительно на инструментальных записях, естественным образом возникла из опыта работников сейсмических станций. Каждый, кто длительное время работал на сейсмической станции, не мог не заметить того огромного несоответствия, которое иногда существует между степенью беспокойства или страха людей, вызываемого землетрясением, и истинным характером землетрясения, о котором можно судить по сейсмограммам. Слабый толчок, ощутимый в центре Лос-Анжелеса, мог привести к непрерывным телефонным звонкам на сейсмической станции Пасадена на протяжении полусуток, в то время как сильное землетрясение в отдаленных частях океана иногда проходит незамеченным, исключая записи сейсмографов [1].

Для более объективной оценки был построен план разделения сильных и слабых землетрясений. Из двух землетрясений, имеющих один и тот же гипоцентр и записанных на одних и тех же станциях, большее должно регистрироваться с большей амплитудой на любой станции. При различных эпицентрах меньшее землетрясение может быть настолько близким к данной станции, что запишется с большей амплитудой. Следовательно, прежде всего, необходимо определить эпицентр для каждого землетрясения и затем построить график, по оси ординат которого откладывается максимальная амплитуда движения почвы на каждой станции, а по оси абсцисс – соответствующее эпицентральное расстояние. Из двух кривых, начерченных таким образом для различных землетрясений, одна, возможно, расположится выше другой, обозначая тем самым, что она представляет более крупное событие.

В настоящее время существует несколько шкал магнитуд, одной из которых является шкала магнитуд ML , предложенная Рихтером в 1935 году. Она предназначена для оценки силы землетрясений, эпицентральное расстояние до которых составляет не более 900 км. Величина магнитуды ML определяется по формуле:

$$ML = \lg(A_{wa}) + \lg(A_0) \quad (1)$$

где A_{wa} – максимальная амплитуда записи (в мм) на горизонтальной компоненте колебаний, смоделированных для сейсмографа Вуда-Андерсона; A_0 – амплитуда записи таким же сейсмографом определенного землетрясения, выбранного в качестве эталона. Фактически $\lg(A_0)$ является калибровочной функцией, которую можно рассчитать с использованием следующего выражения:

$$\lg(A_0) = a \lg\left(\frac{R}{100}\right) + b(R - 100) + 3 + S \quad (2)$$

где R – гипоцентральное расстояние от станции до очага в км, a – геометрическое расхождение, b – коэффициент поглощения, S – станционная магнитудная поправка.

Поскольку калибровочная функция Ч. Рихтера $\lg(A_0)$ была получена для землетрясений на территории Южной Калифорнии и характеризуют затухание волн, в данном регионе, то очевидно, что для других регионов она может быть непригодной.

Исходные данные

На территории Урала с 1999 года начала развиваться Уральская региональная сейсмологическая сеть, которая охватила непрерывным инструментальным сейсмологическим мониторингом сначала Пермский край, а впоследствии Свердловскую область, Республику Башкортостан и Челябинскую область [2]. С 2002 года Уральская сейсмическая сеть начинает представительную регистрацию, как региональных событий, так и телесеизмических землетрясений [3], что в свою очередь позволило подойти к вопросу определения параметров шкалы локальных магнитуд для Уральского региона.

В первом варианте расчёта калибровочной функции шкалы ML было использовано всего 130 записей от 37 сейсмических событий на 5 станциях в диапазоне магнитуд от 2.5 до 3.5 [4]. Основная часть записей была получена от очагов, сосредоточенных преимущественно в Пермском крае, и на всю территорию Урала была распространена без достаточного статистического подтверждения фактическим материалов. Тем не менее с 2009 года на территории Урала использовалась именно эта шкала, она позволяла определять магнитуду очагов на расстоянии от 20 до 800 км с приемлемой точностью.

К 2013 году в составе Уральской региональной сейсмологической сети насчитывалось уже 11 региональных сейсмостанций – PR0R, PR1R, PR2R, PR3R, PR4R, SVUR, KAUR, ORR, OR2, OR3, SVE, одну сейсмическую группу – PR6R, а также сейсмические станции федерального уровня «Соликамск» – SOKR и «Арти» – ARU [5]. Дополнительные сейсмические станции и накопление представительного количества первичных данных за время последующих наблюдений позволили уточнить коэффициенты шкалы ML в более широком диапазоне магнитуд $1.5 \leq ML \leq 4.2$ и для гипоцентральных расстояний $2 < R < 480$ км [6]. Всего было использовано 1005 записей 246 сейсмических событий, произошедших на Среднем Урале в 2012–2013 гг. Такой объем исходных данных позволил использовать уточненную шкалу локальных магнитуд ML без допущений в пределах всего Среднего Урала.

К 2024 году сеть сейсмических станций по сравнению с 2013 годом претерпела значительные изменения охватив по сравнению с предыдущим периодом помимо территории Среднего Урала фактически весь Уральский регион [7]. И самое главное, если ранее расчет калибровочной кривой шкалы локальных магнитуд базировался в основном на записях взрывов, а количество землетрясений было невелико – 8 и 32 горно-тектонических удара (техногенные землетрясения) и с ограниченного числа азимутов, то к 2024 году в расчете учитывалось почти на порядок больше записей – 7729, из которых 1129 взрывов, 107 землетрясений и 172 горно-тектонических удара. При этом, если ранее в силу ограниченного набора данных использовались записи событий, зарегистрированные не менее, чем 3 станциями, то в данной работе в расчёт брали события не менее, чем по 5 станциям, что также повлияло на точность определений.

Все эти факторы позволили выполнить работу уточнения коэффициентов шкалы локальных магнитуд на большом количестве данных. Количественная характеристика исходных сейсмических записей представлена на рисунке 1. Экспериментальная база калибровочной кривой лежит в диапазоне магнитуд от $0.8 \leq ML \leq 5.4$ и для гипоцентральных расстояний от $1 < R < 820$ км. При этом статистическую обработку возможно выполнить для данных в меньшем диапазоне: для магнитуд – от $1.0 \leq ML \leq 5.4$, при гипоцентральных расстояниях – от $1 < R < 680$ км.

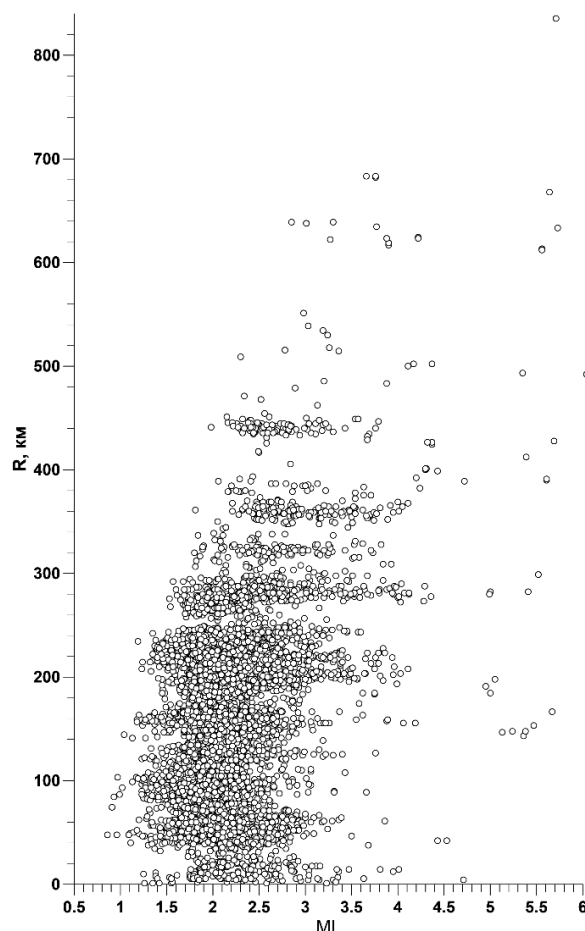


Рис. 1. Распределение записей по магнитудам и гипоцентральному расстояниям

Действие шкалы возможно применить практически ко всему Уральскому региону, так как лучи, соединяющие сейсмические источники и станции на рисунке 2 занимают территорию, ограниченную широтами 52.5-61°N и долготами 50-64°E.

Новая шкала, опираясь на ранее представленные записи, сформулированные Ч. Рихтером, имеет следующий вид:

$$ML = (A_w) + \lg(R) + bR + 3 + S \quad (3)$$

где A_w – максимальная амплитуда записи (в мм) на горизонтальной компоненте колебаний, смоделированных для сейсмографа Вуда-Андерсона; R – гипоцентрально расстояние от станции до очага в км. А правая часть уравнения (3): « $\lg(R)+bR+3+S$ » – это калибровочная кривая ($-\lg A_0$), которая рассчитана в результате аппроксимации исходных данных, дает геометрическое расхождение $a=1.267$ и коэффициент поглощения $b=3.99 \cdot 10^{-4}$. Эти показатели несколько отличаются от ранее найденных [6] $a=1.299$ и $b=3.99 \cdot 10^{-4}$. На рисунке 3 представлено сравнение новой шкалы с предыдущими вариантами. Из рисунка видно, что вариант, полученный в 2015 году фактически, не отличается от нового в диапазоне эпицентральных расстояний до 400 км. Расхождение оценок ML не будет превышать $ML < 0.1$. В то же время на расстояниях свыше 400 км, и тем более $R > 500$ км, с учётом того, что предыдущая шкала была рассчитана для $R < 480$ км, необходимо использовать новую шкалу. Результаты расчёта за 2006 год приведены на рисунке 3 для исторической ретроспективы.

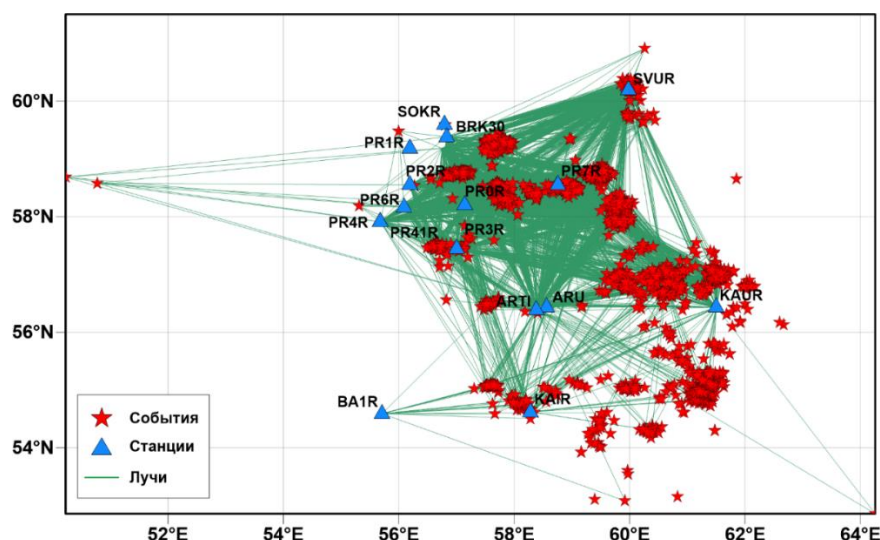


Рис. 2. Сейсмические станции, эпицентры и лучи между очагами и станциями

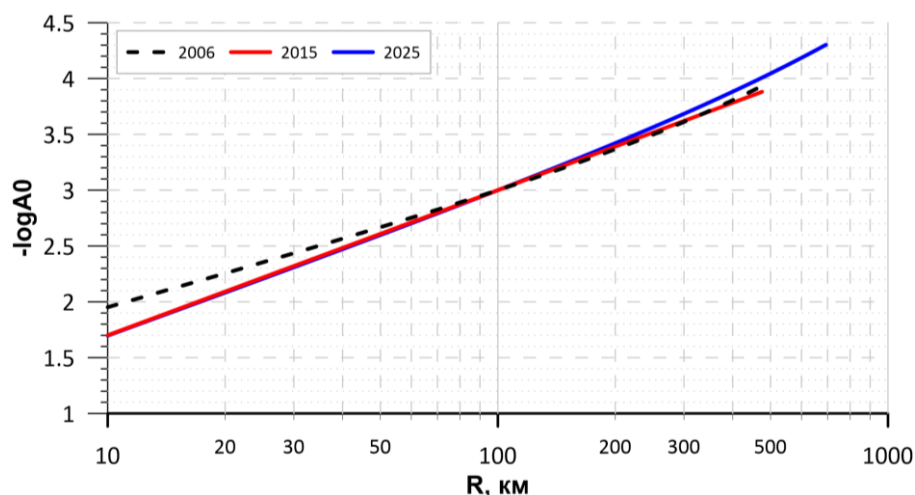


Рис. 3. Сравнение шкал локальных магнитуд для Уральского региона, полученных в разные годы

Заключение

Представленная в работе обновленная шкала локальных магнитуд для Уральского региона подтверждает ранее полученные оценки калибровочной функции и одновременно позволяет обоснованно расширить обновленный вариант фактически на весь Уральский регион. Дальнейшее направление работы предполагает использование полученных данных для уточнения станционных поправок для станций Уральской региональной сейсмологической сети, которые были получены ранее, а также для расчёта поправок для станций, которые были открыты за период с 2013 года.

Автор выражает искреннюю благодарность заведующему сектором сейсмического мониторинга Уральского региона ФИЦ ЕГС РАН Верхованцеву Филиппу Геннадьевичу за неоценимую помощь при выполнении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and associated phenomena, 2nd edition. – Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1954. – 310 p.

2. Верхованцев Ф.Г., Голубева И.В., Дягилев Р.А., Злобина Т.В. Сейсмичность Урала и Западной Сибири в 2020 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2024. – Вып. 27 (2020 г.). – С. 205–222. DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2024.27.1> EDN: IXPMMM
3. Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Дягилев Р.А., Верхованцев Ф.Г., Голубева И.В., Верхованцев А.В. Пермский край 2000–2005 гг. // Землетрясения Северной Евразии, 2005 год. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 269–289.
4. Маловичко Д.А., Иванова Ю.В. Калибровка шкалы локальных магнитуд ML для Западно-Уральского региона // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2006. С.103-107.
5. Верхованцев Ф.Г., Голубева И.В., Дягилев Р.А. Сейсмичность Уральского региона за период с 2002 по 2013 год по данным инструментальных наблюдений Уральской сейсмической сетью // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Восьмой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 94-98.
6. Дягилев Р.А. Шкала ML для Среднего Урала // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Десятой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 118–122.
7. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь / В. Э. Асминг, С. В. Асминг, С. В. Баранов [и др.] // Землетрясения России в 2022 году : Ежегодник. – Обнинск: Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук", 2024. – С. 31-38. – EDN KLAQNO.

REFINEMENT OF THE CALIBRATION CURVE OF THE LOCAL MAGNITUDE SCALE FOR THE URAL REGION

Mizyova Ekaterina
PSU, Perm

Summary. This paper presents the calculation of the refined calibration curve of the local magnitude scale ML for the Ural region, based on a large volume of seismic data for the period of 2018 to 2024. Comparison with previous versions obtained in 2006 and 2015 is presented.

Key words: earthquake, local magnitude scale, seismic station, calibration curve.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мизёва Екатерина Владимировна

katya.mizyova080@gmail.com

ПГНИУ, г. Пермь, студент

Научный руководитель: Огородова Ирина Владимировна, к.г.-м.н.

Научный консультант: Верхованцев Филипп Геннадьевич, зав. сектором сейсмического мониторинга Уральского региона ФИЦ ЕГС РАН.

УДК 550.8.023; 550.8.05; 550.853

АНАЛИЗ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ДАННЫМИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛАБОРАТОРНОГО ОПРОБОВАНИЯ ГРУНТА ДЛЯ УЧАСТКОВ, ДЛИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

¹Мингалева Татьяна Андреевна, ²Кузнецов Максим Андреевич¹АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург²МГРИ, г. Москва

Аннотация. В статье исследуются корреляционные зависимости между данными геофизических исследований методом электрической томографии и результатами лабораторного опробования грунтов для территорий, длительное время загрязненных легкими нефтепродуктами. Рассматриваются изменения удельного электрического сопротивления (УЭС) в зависимости от содержания нефтепродуктов и железа в различных типах пород. Авторами проведен анализ влияния биохимических процессов на электрофизические свойства грунта. Полученные результаты позволяют улучшить методологию интерпретации геоэлектрических данных в зонах длительного нефтяного загрязнения.

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление, корреляция, электроразведка, лабораторный анализ

Актуальность исследования загрязнений нефтепродуктами в грунтах определяется комплексом экологических, экономических и технологических факторов. В условиях интенсивной добычи, транспортировки и хранения углеводородов особую значимость приобретает разработка эффективных методов мониторинга состояния окружающей среды. Геофизические методы диагностики занимают одно из ведущих мест в арсенале современных технологий экологического контроля, однако их применение в зонах долговременного загрязнения представляет собой сложную научно-прикладную задачу [1, 2, 4].

Одной из ключевых проблем в геоэкологических исследованиях является интерпретационная неоднозначность физических параметров, в частности удельного электрического сопротивления (УЭС, ρ), при диагностике зон нефтяного загрязнения. Биохимическая трансформация углеводородов запускает комплексные процессы, включающие образование органических и неорганических кислот, которые способствуют химическому выветриванию минеральной составляющей горных пород, что приводит к формированию растворимых солей. В результате общее содержание растворенных веществ в поровых водах возрастает, что приводит к постепенному уменьшению УЭС грунта [3, 5].

Данная динамика обусловлена накоплением ионных соединений, среди которых особую роль играют продукты окислительно-восстановительных реакций и биоразложения углеводородов, включая железосодержащие комплексы (Fe^{2+} , Fe^{3+}) [1, 3]. Эти процессы формируют дополнительную электролитическую среду, существенно модифицирующую электрофизические свойства грунтового массива.

К дополнительным факторам, усложняющим достоверную интерпретацию геофизических данных, относится наличие сложных геологических и гидрогеологических условий [1, 4]. Особенно значимым является влияние глинистых частиц в грунтах и изменчивости грунтовой влажности, которые могут существенно снижать контрастность

между характеристиками чистых и загрязненных участков. Данное явление создает серьезные ограничения для точной идентификации границ антропогенного воздействия на основе исключительно геофизических методов исследования.

Настоящее исследование посвящено анализу корреляционных зависимостей между результатами геофизических измерений, выполненных методом электрической томографии, и лабораторными данными опробования грунтовых образцов, отобранных из буровых скважин, на территории, подвергшейся длительному загрязнению легкими нефтепродуктами.

Измерения удельного электрического сопротивления (УЭС) проводились на территории нефтебазы, расположенной в Ярославской области. Для реализации электротомографического исследования применялась современная многоэлектродная электроразведочная станция СКАЛА-48к12 (производства ООО «НПЦ Геотех» совместно с ООО «КБ Электрометрии»), оснащенная двумя 24-электродными косами с шагом размещения электродов 3 метра. Методические особенности исследования предполагали использование классической схемы Шлюмберже.

В рамках комплексных экологических исследований изучаемой площадки выполнялось послойное опробование почвогрунтов и подземных вод из геологических скважин с интервалом 0.5–1.0 м. В ходе лабораторных исследований основное внимание уделялось содержанию железа (Fe) и концентрации нефтепродуктов, которые служат ключевыми маркерами антропогенного воздействия. Результаты этих анализов легли в основу корреляционного анализа, проведенного в рамках настоящего исследования.

На рисунке 1 представлено графическое сравнение вертикального распределения удельного электрического сопротивления грунта с валовым содержанием нефтепродуктов (НФП) и железа (Fe). Данный подход позволяет выявить взаимосвязь между электрофизическими свойствами горных пород и степенью их загрязнения углеводородами, что является важным этапом в развитии методологии геоэкологического мониторинга территорий, подверженных нефтяному заражению.

Сопоставление геофизических параметров удельного электрического сопротивления (УЭС) с результатами лабораторных анализов грунтовых образцов позволяет выявить характерные закономерности распределения загрязнений. В зоне аэрации наблюдается максимальное содержание нефтепродуктов. В интервале 1-3 метра, где преобладают суглинки, отмечается пик концентрации углеводородов, рост содержания железа и снижение УЭС, что объясняется сорбционной способностью глинистых частиц и длительным биоразложением нефтепродуктов. В диапазоне 3-9 метров значения УЭС возрастают вследствие изменения крупности частиц, а содержание железа определяется как нестабильное. Ниже уровня грунтовых вод (>9 м) фиксируется повторный пик содержания нефтепродуктов и повышенная концентрация железа, что связано с сезонными колебаниями УГВ и интенсивными процессами биоразложения.

Дополнительно проводился анализ по скважине, расположенной в условно «чистой» зоне. На условно "чистом" участке преобладают суглинистые горизонты по всему разрезу. Здесь содержание нефтепродуктов минимально и не превышает предельно допустимых концентраций (<1000 мг/кг), а уровень железа стабилен (~3000 мг/кг). Характерно однородное распределение всех регистрируемых параметров, причем значения УЭС лучше согласуются с теоретическими данными по сравнению с загрязненными участками.

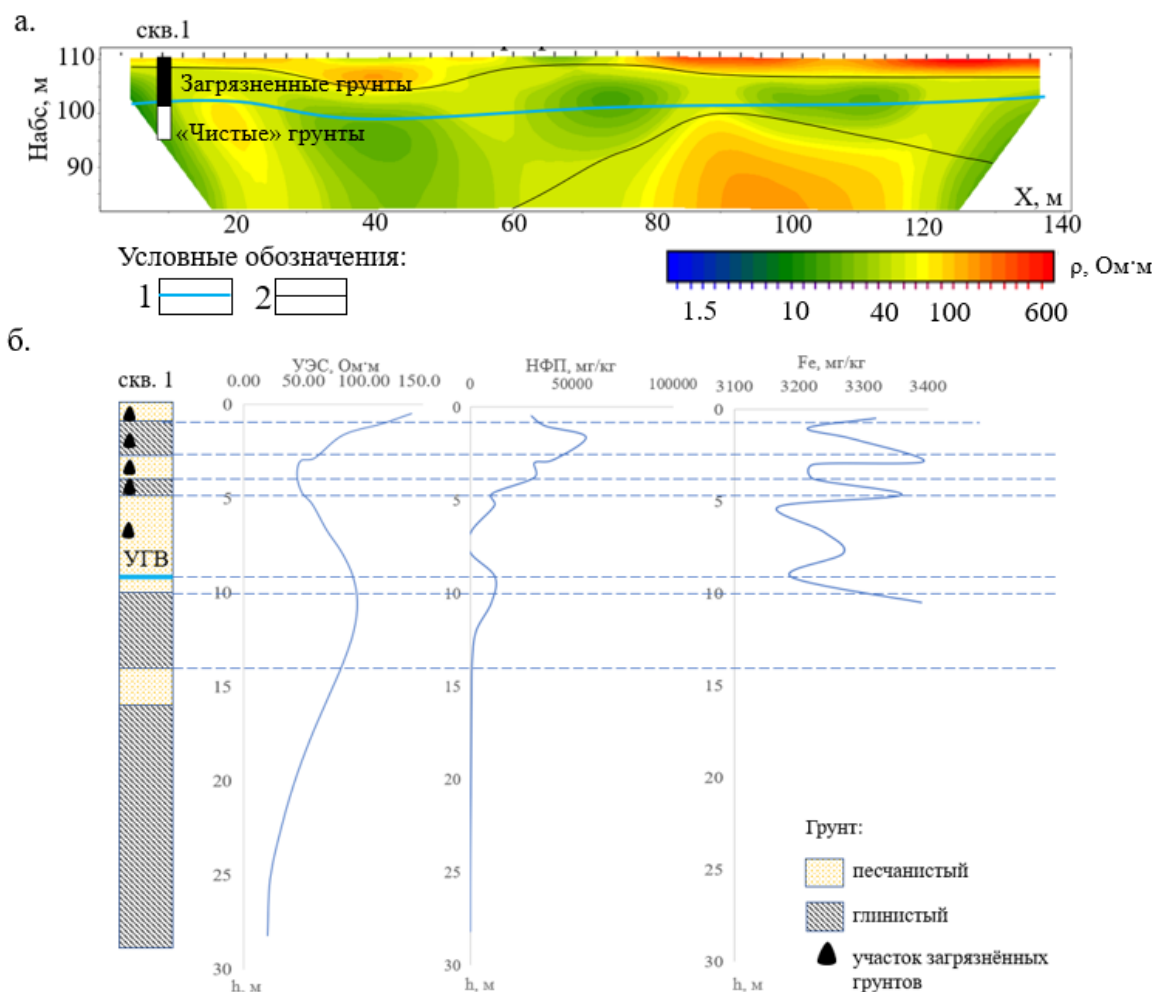


Рис. 1. Сопоставление результатов профильных геофизических исследований и лабораторных анализов грунтов загрязненного участка в районе нефтебазы в Ярославской области: а) геоэлектрический разрез через грунты, загрязненные нефтепродуктами (1 – уровень грунтовых вод, 2 – границы литологических слоев); б) результаты скважинных и лабораторных исследований слева направо: литологическая колонка скважины, распределение УЭС с глубиной, распределение количества нефтепродуктов (НФП) с глубиной и распределение железа (Fe) с глубиной.

Для качественной оценки корреляционных взаимосвязей между геоэлектрическими параметрами и вещественными характеристиками грунтов изучаемого участка были установлены петрофизические зависимости удельного электрического сопротивления (ρ) от валового содержания нефтепродуктов (НФП) и железа (Fe). Зависимости построены в билогарифмическом масштабе для различных литологических типов пород: песков (загрязненных, водонасыщенных и «чистых») и суглинков (загрязненных и «чистых») (рис. 2).

Анализ основывается на интегральных данных, полученных при исследовании керновых образцов рыхлых отложений из 10 разведочных скважин, расположенных в непосредственной близости (1-2 м) от линий электроразведочных профилей, а также на результатах интерпретации шести геоэлектрических разрезов.

Анализ графических зависимостей (рис. 2) позволяет сделать следующие выводы. В песчаных грунтах наблюдается слабая обратная корреляция между удельным

электрическим сопротивлением (УЭС) и валовым содержанием нефтепродуктов, что согласуется с ранее установленными закономерностями снижения УЭС в процессе биodeградации углеводов [5]. Характерно, что "чистые" пески демонстрируют устойчивый диапазон значений УЭС (20–40 Ом·м), частично перекрываясь с областями загрязненных грунтов. При рассмотрении зависимости УЭС от содержания железа четкая корреляционная связь отсутствует. Однако выделяются два важных наблюдения. Во-первых, водонасыщенные пески характеризуются максимальными концентрациями железа и минимальными значениями УЭС, что указывает на преобладание вторичных продуктов биodeградации нефтепродуктов в поровой жидкости, существенно снижающих электрическое сопротивление. Во-вторых, совпадение областей распределения точек "чистых" и загрязненных песков может свидетельствовать о завершенных процессах биоразложения, приведших к накоплению железосодержащих соединений, которые становятся дополнительным фактором усложнения интерпретации геоэлектрических данных.

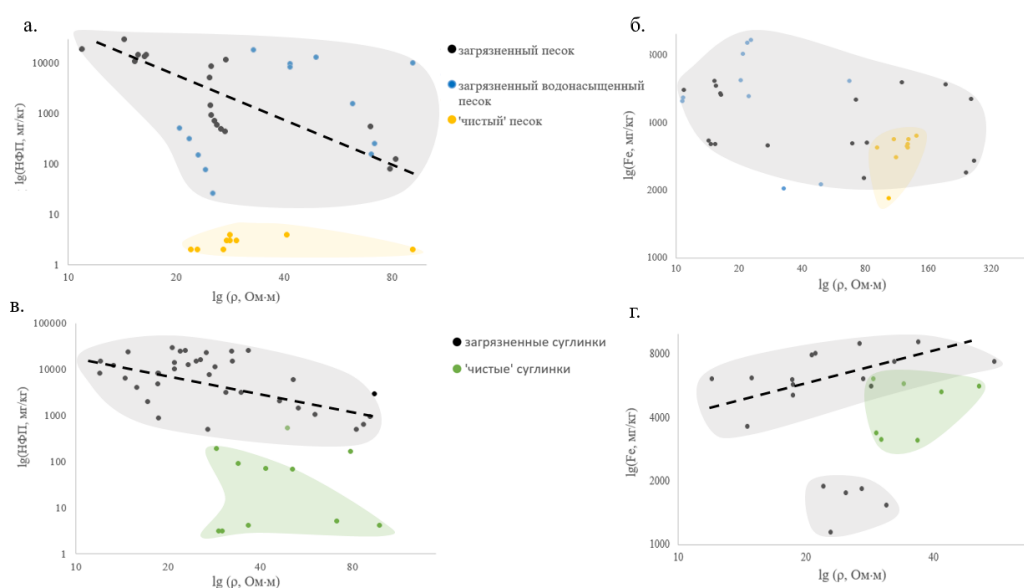


Рис. 2. Графики зависимости для района нефтебазы в Ярославской области: удельного электрического сопротивления – УЭС (ρ) от содержания нефтепродуктов (НФП) – а; и железа (Fe) – б в песках; удельного электрического сопротивления от содержания нефтепродуктов (НФП) – в; и железа (Fe) – г; в суглинках (черная пунктирная линия – предполагаемая линия тренда).

Для суглинков также отмечается слабая обратная корреляция между УЭС и содержанием нефтепродуктов, при этом "чистые" суглинки характеризуются более высокими значениями электрического сопротивления. Особый интерес представляет распределение точек на графике зависимости содержания железа от УЭС: при концентрации железа >4000 мг/кг наблюдается слабая прямая корреляция (пунктирная линия на графике), что может быть также связано с сорбционной способностью глинистых частиц и длительным биоразложением нефтепродуктов. Отдельное скопление точек с низким содержанием железа соответствует образцам с высокими концентрациями нефтепродуктов (>20000 мг/кг), что предполагает стадию раннего загрязнения, где преобразование углеводов в железосодержащие соединения еще не завершено.

Таким образом, исследование показало наличие слабой обратной корреляции между удельным электрическим сопротивлением и содержанием нефтепродуктов как в песчаных, так и в суглинистых грунтах, что согласуется с процессами биodeградации углеводов.

В водонасыщенных песках выявлено максимальное содержание железа и минимальные значения удельного электрического сопротивления, что связано с накоплением вторичных продуктов биodeградации нефтепродуктов.

Для суглинков исследуемого участка характерна более выраженная зависимость между удельным электрическим сопротивлением и содержанием железа при его концентрации выше 4000 мг/кг, что в том числе объясняется сорбционной способностью глинистых частиц.

Выявлена особенность распределения образцов с высокими концентрациями нефтепродуктов (>20000 мг/кг) и низким содержанием железа, указывающая на стадию раннего загрязнения.

Полученные данные демонстрируют необходимость комплексного подхода к интерпретации геоэлектрических параметров с учетом литологических особенностей и степени биоразложения нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atekwana E.A., Atekwana E.A. Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: a review // *Surveys in Geophysics*. 2010. Vol. 31. P. 247–283.
2. Casas A., Himi M., Evangelista W., Montes L., Tapias J., Lopes de Castro D., Pinheiro F. Characterization of a suspected hydrocarbon contaminated site near Mamanguape (Paraíba, Brazil) using integrated geophysical and geochemical methods // 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro, Brazil, August 15–18, 2011.
3. Flores Orozco A., Ciampi P., Katona T., Censini M., Papini M., Deidda G.P., Cassiani G. Delineation of hydrocarbon contaminants with multi-frequency complex conductivity imaging // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 768. Art. 144997. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.144997.
4. Nabiallah Ahmadi. A Correlation between the Effect of Homogenous and Non-Homogenous Oil Contamination Dispersions on the Ultimate Load-Bearing Capacity of Pile Foundations Buried in Silty Sand // *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*. 2021. Vol. 25. No. 6. P. 3571–3584.
5. Shevnin V., Mousatov A., Nakamura-Labastida E.K., Delgado-Rodríguez O., Mejia-Aguilar A., Sánchez-Osio J., Sánchez-Osio H. Study of oil pollution in airports with resistivity sounding // *Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2003)*. 2003. DOI: 10.13140/2.1.2634.1128.

ANALYSIS OF CORRELATIONAL DEPENDENCIES BETWEEN GEOPHYSICAL DATA AND LABORATORY SOIL TESTING RESULTS FOR AREAS LONG-TERM CONTAMINATED WITH PETROLEUM PRODUCTS

Mingaleva Tatiana Andreevna¹, Kuznetsov Maxim Andreevich²

¹*Research, Design and Survey Institute Lenmetrogiprotrans, Saint Petersburg*

²*MGRI, Moscow*

Summary. This article examines the correlational dependencies between geophysical data obtained through electrical tomography and laboratory soil testing results for territories that have been contaminated with petroleum products over a long period of time. The study considers changes in specific electrical

resistivity depending on the content of lnapl (light non-aqueous phase liquid) and iron in various rock types. The authors analyze the impact of biochemical processes on the electrophysical properties of soil. The results obtained allow for an improvement in the methodology of interpreting geoelectrical data in areas with long-term oil contamination.

Key words: specific electrical resistivity, correlation, electrical prospecting, laboratory analysis.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мингалева Татьяна Андреевна

tatiana.mingaleva@bk.ru

АО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, старший научный сотрудник

Кузнецов Максим Андреевич

m.kuznetsov.tt@mail.ru

МГРИ, г. Москва, аспирант

УДК 550.348

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВБЛИЗИ КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ

^{1,2}Молокова Алисия Павловна¹МГУ им. М.В. Ломоносова²ИТПЗ РАН, г. Москва

Аннотация. В рамках эксперимента KISS (2015–2016 гг.) было успешно установлено 77 станций в радиусе 55 км. Уникальная система позволила получить записи с ближней зоны, где можно в том числе ожидать проявление эффекта направленности. В данной статье представлены первые результаты по изучению эффекта ближней зоны на примере землетрясений Ключевской группы вулканов на Камчатке.

Ключевые слова: вулканическое землетрясение, очаг землетрясения, сейсмический момент, ближняя зона.

Большинство методик и подходов сейсмологии рассматриваются в допущении о том, что данные зарегистрированы в дальней зоне. При этом рутинно редко проверяется выполнение этого предположения, особенно для малоамплитудной сейсмичности, что нередко приводит к ошибкам в определении магнитуды и других параметров очага.

В 2015–2016 гг. в районе Ключевской группы вулканов (КГВ) в рамках эксперимента KISS (Klychevskoy Investigation – Seismic Structure of an Extraordinary Volcanic System), были установлены 83 автономных сейсмических станции сроком на 1 год, из которых для 77 сеймостанций удалось собрать наблюдения [3]. Отметим, что 77 станций установлены в радиусе 55 км, что позволяет предположить, что часть данных записана на расстояниях, соответствующих ближней зоне.

В результате работы установленных сейсмических станций было записано 2136 событий [2], из которых выделено 343 вулканических землетрясения под вулканами Ключевской группы (55.65–56.24°с.ш., 159.5–161.0 в.д.), диапазон магнитуд $M_L = 0.35\text{--}2.9$, гипоцентральных расстояний 3.2–142.5 км, диапазон глубин до 34 км. Ранее для этих событий была выполнена оценка сейсмических моментов и моментных магнитуд [1] с помощью спектрального метода, основанного на связи между уровнем низкочастотной площадки амплитудного спектра смещений объемных волн на нулевой частоте и сейсмическим моментом [4]:

$$M_0 = \frac{\Omega_0}{R_{\theta\phi}} 4\pi\rho R c^3 \quad (1)$$

где Ω_0 – уровень низкочастотной площадки спектра смещений объемной волны (в данном случае определяется через преобразование Фурье), приведенного к условиям однородного упругого полупространства; ρ – плотность среды ($\rho=2325$ кг/м³); R – учитывает геометрическое расхождение в слоистой или сферической модели Земли; c – скорость объемных волн ($c = 4$ км/с); $R_{\theta\phi}$ – диаграмма направленности для объемной волны.

Для оценки сейсмических моментов подбирались записи одного землетрясения, полученные с разных станций с оптимальным соотношением сигнал-шум, после чего рассчитывались их быстрое преобразование Фурье (временное окно 30 с от первого вступления, рабочий диапазон частот – 0.5–15 Гц). Рассчитанный спектр приводился к условиям однородного упругого полупространства путем введения поправок за геометрическое расхождение и добротность, и оценивался уровень низкочастотной площадки спектра на нулевой частоте, после чего вычислялся сейсмический момент для

индивидуальной записи по формуле 1. Пример определения уровня низкочастотной площадки очагового спектра смещений для оценки сейсмического момента представлен на рисунке 1.

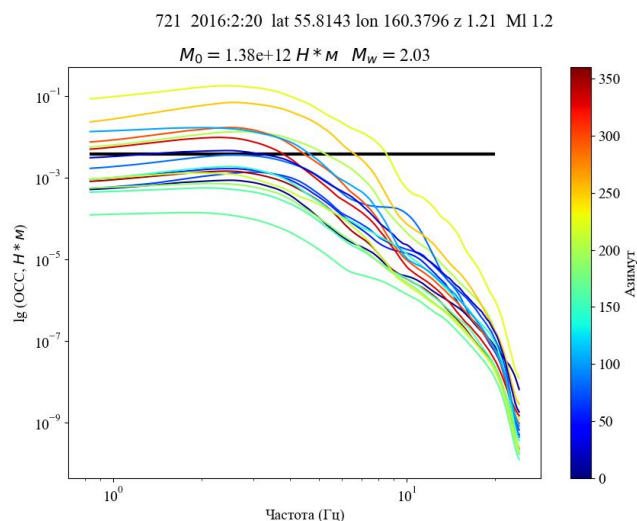


Рис. 1. Индивидуальные станционные спектры смещений (по оси ординат – ОСС или очаговый спектр смещений) для землетрясения 2016.02.20 ($M_w=2.03$). Прямая линия – уровень площадки межстанционной медианы спектра на низких частотах, по которому определяется сейсмический момент. Цвет присваивается автоматически в соответствии со значением азимута на станцию, на которой была получена запись

При изучении полученных спектров была предварительно обнаружена зависимость уровня спектра от азимута, которая может быть связана с тем, что для ряда станций эпицентральные расстояния меньше 30 км, а значит, существует высокая вероятность проявления эффекта ближней зоны. Далее были рассмотрены зависимости индивидуальных станционных сейсмических моментов от азимута для 60 выделенных вулканических землетрясений. Пример диаграммы направленности для события, спектры которого показаны на рисунке 1, представлен на рисунке 2.

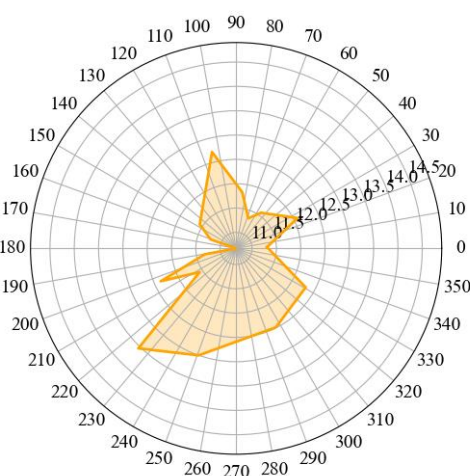


Рис. 2. Диаграмма направленности для землетрясения 2016.02.20 ($M_w=2.03$). По окружности отмечены азимуты на станцию, по радиусу – логарифмы сейсмических моментов

Далее был построен график зависимости разности средней и индивидуальной станционной моментной магнитуды от эпицентрального расстояния (рис. 3).

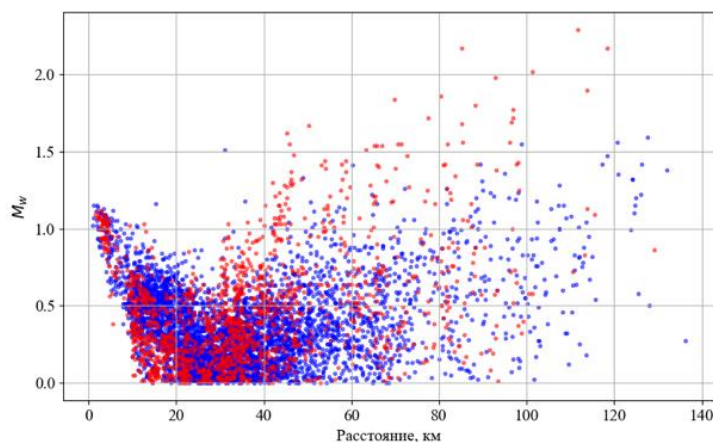


Рис. 3. График зависимости разности средней моментной магнитуды и моментной магнитуды на станции от эпицентрального расстояния. Красный точки – длиннопериодные землетрясения, синие точки – высокочастотные землетрясения

На рисунке 3 видно, что при небольших эпицентральных расстояниях (до 20 км) наблюдается зависимость, которая может быть связана с эффектом ближней зоны. Затем была построена диаграмма максимальных сейсмических моментов (рис. 4), которые определялись следующим образом. Для каждого события рассматривались сейсмические моменты, полученные по индивидуальным записям с каждой станции, записавшей данное событие. Из индивидуальных сейсмических моментов по каждому событию выбиралось максимальное значение, и далее в анализ попадало гипоцентрального расстояния этого максимального значения. Результат распределения гипоцентральных расстояний максимальных значений сейсмического момента представлен на рисунке 4.

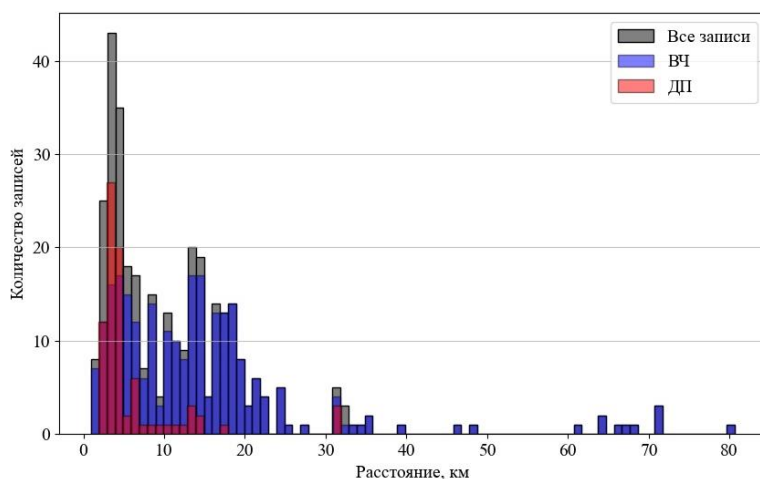


Рис. 4. Гистограмма максимальных сейсмических моментов. Красный – длиннопериодные землетрясения, синий – высокочастотные землетрясения, серый – все записи

Показано (рис. 4), что у большинства событий максимальный сейсмический момент получен на расстояниях до 30 км, причем для длиннопериодных землетрясений (красный) максимальный сейсмический момент до 10 км. Таким образом, была определена ближняя зона для вулканических землетрясений Ключевской группы вулканов.

Работа была выполнена в рамках государственного задания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молокова А.П. Спектральные характеристики очагов землетрясений Ключевской группы вулканов // Магистерская диссертация. МГУ, Москва. 2024 г. 47 с.
2. Сеньюков С.Л., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я., Шапиро Н.М., Нуждина И.Н., Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В., Назарова З.А., Должикова А.Н., Толокнова С.Л., Карпенко Е.А. Каталог землетрясений по данным сети KISS В 2015-2016 гг. Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 26 сентября–2 октября 2021 г. г. Петропавловск-Камчатский.
3. Шапиро Н.М., Гордеев Е.И., Абкадыров И.Ф., Кулаков И.Ю., Яковлев А.В. Широкомасштабный полевой сейсмологический эксперимент для изучения Ключевской группы вулканов // Вестник ДВО РАН. – 2017. – № 1 (191). – С. 75-78 (РИНЦ).
4. Keilis-Borok V.I. Investigation of the Mechanism of Earthquakes // Soviet Research in Geophysics (English translation). 1960. V. 4. № 29. 201 p.

STUDY OF THE NEAR-FIELD EFFECT FOR EARTHQUAKES NEAR THE KLYUCHEVSKAYA GROUP OF VOLCANOES

^{1,2}*Molokova Alisiya*

¹*MSU*

²*IEPT RAS, Moscow*

Summary. As part of the KISS experiment (2015-2016), 77 stations were successfully installed within a radius of 55 km. The unique system made it possible to obtain recordings from the near-field zone, where, among other things, where the manifestation of the directivity effect can be expected. This article presents the first results of studying the near-field effect using the example of the earthquakes of the Klyuchevskaya group of volcanoes in Kamchatka.

Key words: volcanic earthquake, earthquake focus, seismic moment, near-field zone.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Молокова Алисия Павловна

molokovaap@my.msu.ru

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, аспирант

ИТПЗ РАН, г. Москва, м.н.с.

Научный руководитель: Скоркина Анна Александровна, к.ф.-м.н.

УДК 550.8

**ВАРИАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В
ШАМАХА-ИСМАИЛЛИНСКОЙ СЕЙСМОГЕННОЙ ЗОНЕ**

*Муришудов Нижат Исмаил-Ламбали, Исмаилова Алмаз Талат
РЦСС при НАНА, г. Баку, Республика Азербайджан*

Аннотация. Основной целью работы, представленной в статье, является изучение геофизических полей на территории республики Азербайджан. А это позволяет выделить основные сейсмоактивные регионы. Мониторинг пространственно-временных изменений параметров геофизических полей проводится регулярно. В результате определяется и изучается характер проявления сейсмоаномальных эффектов в геофизических полях. А также оценивается напряженно-деформированное состояние сейсмогенных зон.

Ключевые слова: геофизические поля, сейсмогенные зоны, вариация, мониторинг, гравитация, напряжения, гравиметр.

Изучение геофизических полей территории республики Азербайджан, точнее Шеки-Шамахинском геодинамическом полигоне и на территориях, входящих в область исследований позволило выявить основные сейсмоактивные районы. Высокая сейсмичность связана с подвижками в активных частях глубинных разломов. Это юго-восточная часть Большого Кавказа, в основном Шамаха-Исмаиллинская зона, а также Огузско-Габалинская и Шеки-Закатальская зоны [1,2,3]. Исследованы вариационные характеристики геофизических полей в сейсмогенных зонах. Отслежена динамика изменения геофизических полей во времени и пространстве при подготовке и возникновении сейсмических событий с $m_l \geq 4$, выявлены сейсмоаномальные эффекты геофизического поля, анализировались амплитудно-частотные характеристики сейсмоаномального воздействия, период накопления геодинамической энергии и наблюдаемые характеристики [4].

Гравиметрические наблюдения, периодически проводимые на полигоне, позволили выявить функции изменения силы тяжести на местности. Сила тяжести оценивается как один из ведущих методов обнаружения деформаций, сдвигов, градиентных зон, глубинных разломов, происходящих во внутреннем строении земли. Это позволяет оценивать геологические процессы, протекающие в более глубоких слоях земной коры, и комплексно анализировать их прямую связь с сейсмической активностью. Так, в зависимости от геодинамического режима в сейсмоактивных зонах установлено, что сила тяжести в гравиметрическом поле характеризуется возрастающими или убывающими градиентами [8, 9, 10].

Исследования проводились на высокоточном современном Канадском гравиметре Scintrex CG-5 AutoGrav (рис.1).

Эти приборы позволяют выявить характер изменения силы тяжести в исследовательских зонах, предназначенных для определения временных измерений.

Процессы, происходящие во внутреннем строении Земли и периодически повторяющиеся, создают различные деформации в верхних слоях земной коры, данные о которых регулярно обрабатываются и используются в различных исследовательских работах [5, 6, 7].



Рис. 1. CG-5 гравиметр AutoGrav

На Шеки-Шамахинском геодинамическом полигоне также были переработаны с добавлением новых наблюдательных пунктов и обеспечена их связь с двумя другими полигонами. Этот геодинамический полигон включает в себя более 25 районов и прилегающих территорий (рис. 2).

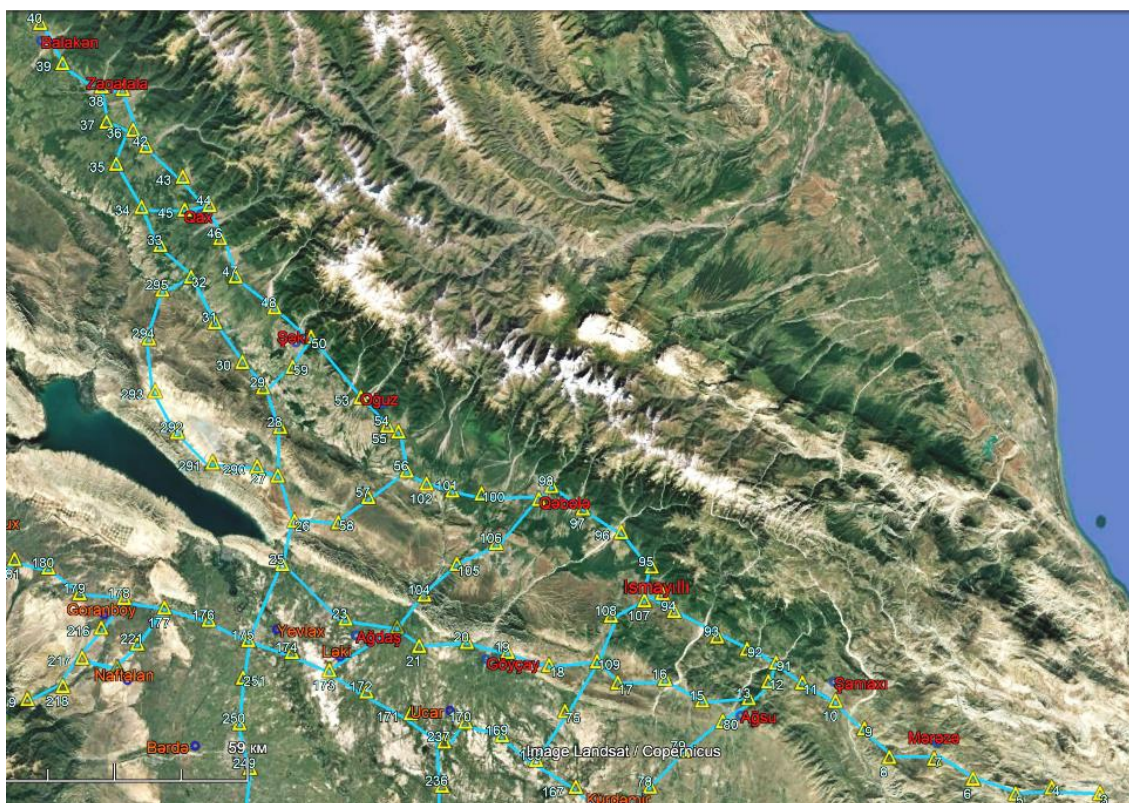


Рис. 2. Схема расположения наблюдательных пунктов на Шеки-Шамахинском геодинамическом полигоне.

На рисунке 3 показаны повторные измерения в исследованиях, проведенных на Шеки-Шамахинском геодинамическом полигоне и аномальное гравитационное поле в северо-восточной части Исмаиллинского района. В направлении Шеки мы видим разделение таких же аномальных участков. Как видно из карты изоаномалий гравитационного поля (рис. 3) в формате 2D основные изменения произошли в Исмаиллинском, Шамахинском и Шекинском районах. Интенсивность роста возросла на указанных участках и стала более выражена в Исмаиллинско-Карамарьямской сейсмогенной зоне. Так, относительная сила тяжести на всей территории колеблется в пределах 0.015-0.071 мГал, в

Шеки 0.045-0.066 мГал, а в Шамахинском и Исмаиллинском районе в пределах 0.040-0.055 мГал.

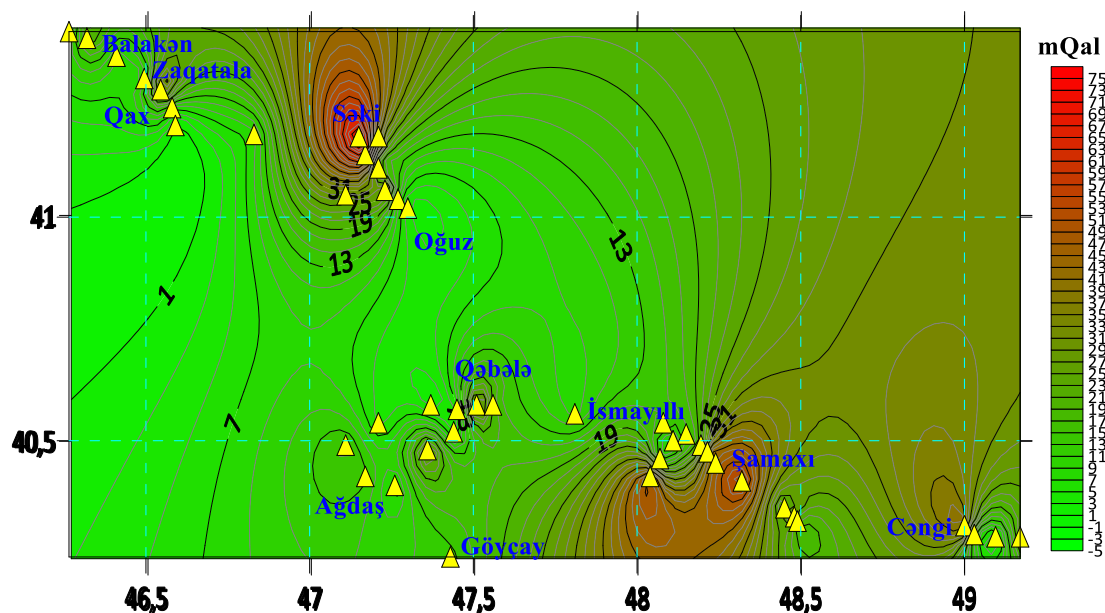


Рис. 3. Карта изоаномалий гравитационного поля по Шеки-Шамахинскому геодинамическому полигону

Карта на рисунке 4 показывает, как изменяется градиент гравитационного поля по данным спектрального анализа двумерной модели напряженности гравитационного поля.

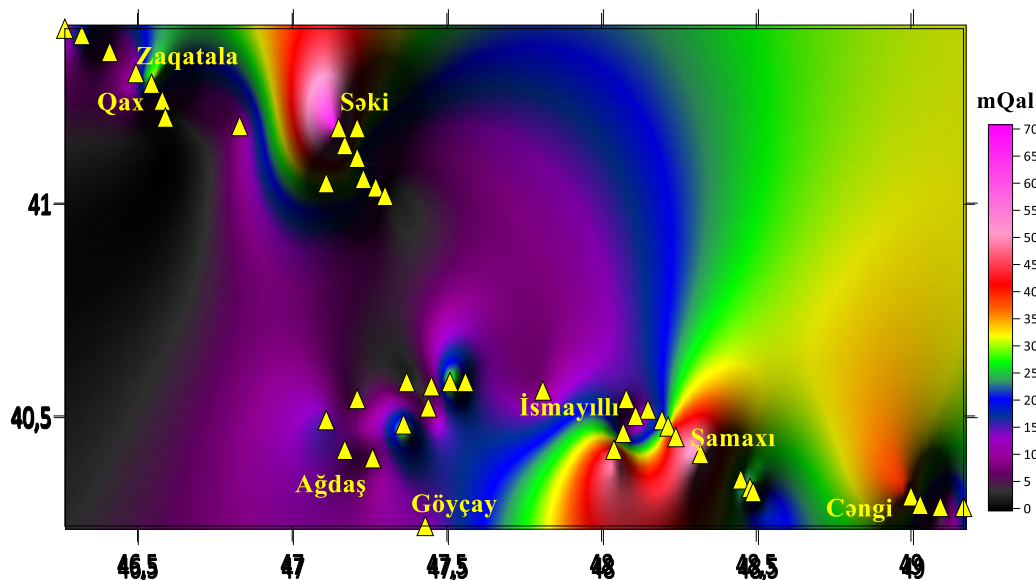


Рис. 4. Карта спектров гравитационного поля по Шеки-Шамахинскому геодинамическому полигону

Также из карты 3D (рис. 5) видно, что гравитационное поле отражает напряженно-деформированное состояние.

Области, охватывающие указанный рост, визуальны описаны спектральной картой и трехмерной графикой (рис. 5). Таким образом, это подтверждение изменений в описанной карте.

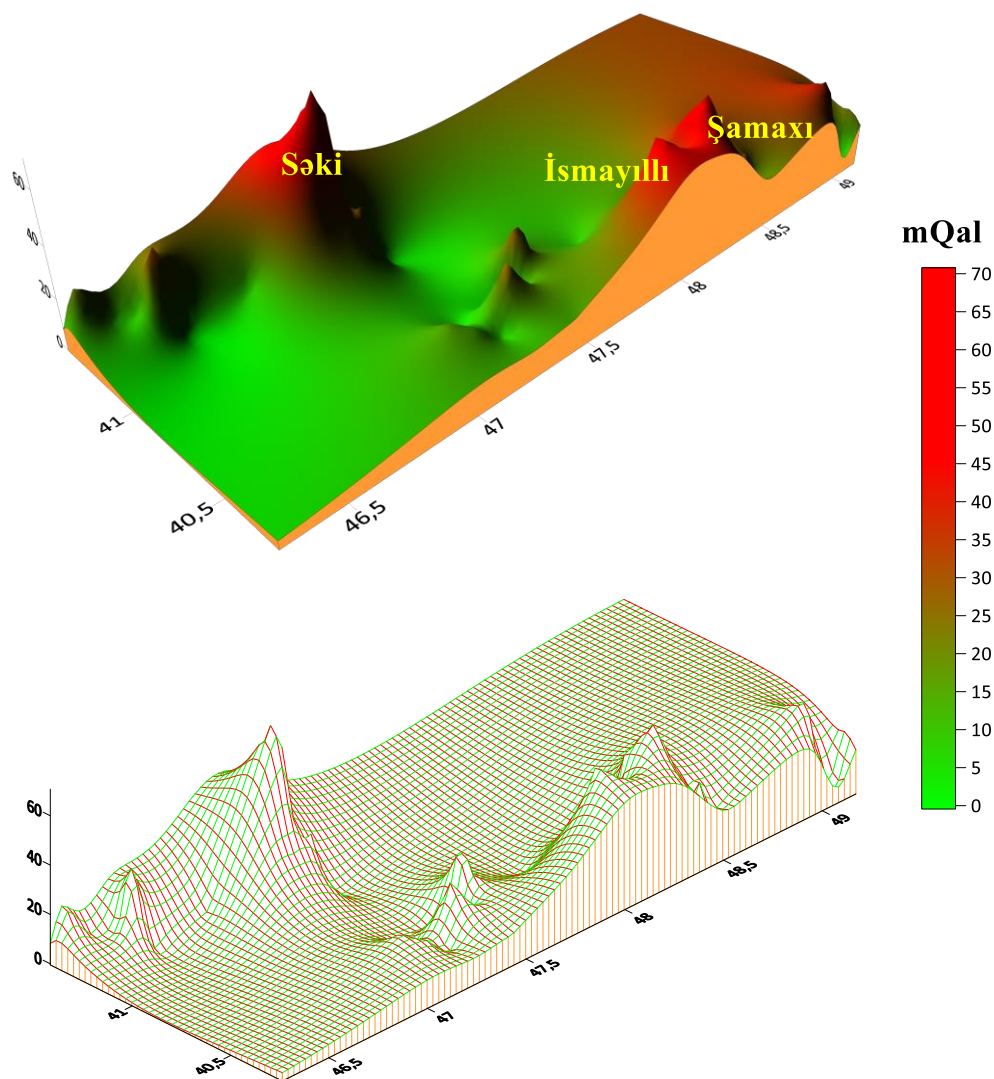


Рис. 5. Модель 3D интенсивного роста гравитационного поля в сейсмогенных зонах

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что, как и прежде, на Шамахинско-Шекинском геодинамическом полигоне в целом на всех сейсмогенных участках утихла высокая интенсивность, но в Исмаиллинско-Карамарьямской сейсмогенной зоне идет более заметная восходящая линия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агамирзоев Р.А. Сейсмотектоника азербайджанской части Большого Кавказа, НАНА, Баку, «Элм», 1987 г., С. 123.
2. Шихалибейли Э.Ш. Некоторые проблемные вопросы геологического строения и тектоники Азербайджана. Баку. Элм.1996.215с.
3. Кенгерли Т.Н., Алиев Ф.А., Алиев А.М., Казымова С.Э., Сафаров Р.Т., Вахабов У.Г. Современная структура и активная тектоника южного склона Большого Кавказа в пределах Азербайджана (междуречье рр. Мазымчай и Пирсаат). ANAS Transactions. Earth Sciences 2018.

4. Рзаев А.Г., Етирмишли Г. Дж., Казымова С.Э. Отражение геодинамического режима в вариациях напряженности геомагнитного поля (на примере южного склона Большого Кавказа)// Известия. Науки о земле. Баку. 2013.
5. Метакса Х.П., Рзаев А.Г. Геомагнитные исследования на Шеки-Шемахинском прогностическом полигоне. Тезисы VI докладов республиканской конференции геофизиков Азербайджана. Баку, Изд. АЗНТОНПП, 1982.
6. Рзаев А.Г. Сейсмопрогностические исследования. В кн. «Геология Азербайджана». //Физика Земли. т.V. изд. «Nafta-Press». Баку. С.23-35.
7. Rzayev A.Q., Mammedli T.Ya. Seismicity across Azerbaijan territory and seismomagnetic effects in geomagnetic field stress. Geophysics news in Azerbaijan. № 4, p. 49-52, Baku. 2005.
8. Исмаилова А.Т. Оценка напряженного состояния очагов деформации на Балаканско-Габалинском геодинамическом полигоне на территории Азербайджанской Республики. Международный научно-исследовательский журнал. №8(122), 17 август 2022 Екатеринбург. ISSN 2227-6017 Online DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.122.62>
9. Исмаилова А.Т. The Assessment of active geodynamic processes by gravimagnetometric method (The Republic of Azerbaijan, the southern zone of big Caucasus) VI-International European Conference on interdisciplinary scientific research. August 26-27, 2022/Bucharest, Romania FULL TEXTS BOOK. Issued: 20.09.2022. P. 567-565.
10. Отчет о гравимагнитометрических и геодинамических научно-исследовательских работах, выполненных Геофизическим отделом РЦСС НАНА в 2021 году. Баку. Научный фонд РЦСС.

VARIATIONS OF GEOPHYSICAL FIELDS IN THE SHAMAKHA-ISMAILLY SEISMOGENIC ZONE

*Murshudov Nijat İsmail-Lambali, Ismailova Almaz Talat
RSSC at ANAS, Baku, Republic of Azerbaijan*

Summary. The article notes that the study of the geophysical fields of the territory of the Azerbaijan republic made it possible to identify the main seismically active regions. Monitoring of spatial and temporal changes in the parameters of geophysical fields is carried out regularly in order to determine and study the nature of the manifestation of seismoanomalous effects in geophysical fields, as well as to assess the stress-strain state of seismogenic zones.

Key words: geophysical fields, seismogenic zones, variation, monitoring, gravity, stress, gravimeter.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Муршудов Нижат Исмаил-Ламбали

nicat.mursudovv@gmail.com

РЦСС при НАНА, г. Баку, Республика Азербайджан, м.н.с.

Исмаилова Алмаз Талат

ismailova@mail.ru

РЦСС при НАНА, г. Баку, Республика Азербайджан, с.н.с.

УДК 550.8:528.854

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ПРИЗНАКОВ, ВЫЧИСЛЯЕМЫХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ПОЛОСТЕЙ В ЗАОБДЕЛОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ТОННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНОВ

*Набатов Владимир Вячеславович
НИТУ МИСИС, г. Москва*

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы комплексирования признаков, вычисляемых по результатам геофизических съёмок из внутреннего пространства тоннелей. Отдаётся предпочтение комплексированию признаков методов различной физической природы, подверженных различным типам помех.

Ключевые слова: тоннели, полости, обделка, геофизические методы, георадиолокация, комплексирование.

Введение. Одним из наиболее опасных факторов, воздействующих на устойчивость тоннелей, является процесс развития полостей в заобделочном пространстве. Причинами возникновения этих полостей могут быть: вибрация от движущихся поездов, некачественный тампонаж, развитие геологических процессов вблизи от тоннеля (изменение гидрорежимов, суффозия и т.п.). Полости вблизи от туннеля могут приводить к неоднородному распределению давления на обделку, что в ряде случаев приводит к деформациям и нарушению целостности обделки [1; 2]. При большой протяжённости полостей они могут приводить к деформациям путевого бетона, что может вызывать деформации рейсового пути.

Для решения проблемы традиционно используют процедуру тампонажа, которая требует частичного вскрытия обделки. Это означает что необходимо понимание, на каких участках тоннеля присутствуют полости. Традиционно для решения этой задачи используют геофизические методы. Наиболее часто встречается использование сейсмоакустического метода, в частности метода Impulse Response (IR) [3]. В этом случае используют ударное возбуждение обделки с последующей регистрацией её отклика. Регистрируемый при этом отклик позволяет принимать решения о наличии либо отсутствии полости – в случае если полость присутствует, обделка совершает колебания, обладающие большей амплитудой и меньшим затуханием. Еще один активно используемый метод – георадиолокация [4; 5]. Основной принцип метода – это излучение и приём электромагнитных волн радиочастотного диапазона.

Недостатком IR является низкая разрешающая способность. Недостатком георадиолокации является трудоёмкость массовых измерений и последующего анализа зарегистрированных данных. Недостатком обоих подходов является всё ещё достаточно высокий уровень ошибок выявления.

При сейсмоакустических обследованиях тоннелей по большей части решение о наличии полости принимается по значениям так называемых информативных признаков. Принято использовать, как некие конкретные, наиболее информативные признаки, так и комплексы признаков. При георадиолокационном выявлении полостей довольно часто используется интерпретация исходного зарегистрированного волнового поля, что обычно предполагает субъективность, которую вносит оператор, принимающий решение. Довольно часто предполагается, что развитием георадиолокационного выявления полостей является как раз переход к принятию решения по результатам вычислений

информативных признаков. В этом случае предполагают, что это позволит избавиться от субъективности интерпретатора и повысить точность прогноза.

В последние годы автором был получен опыт геофизических обследований в тоннелях Московского метрополитена, при которых решалась задача обнаружение полостей. Были проанализированы результаты измерений на множественных участках. Данные, полученные в этих исследованиях, преобразовывались в наборы информативных параметров.

Общим выводом по полученному объёму исследований был тот вывод, что значения параметров подвержены существенному колебанию в тех местах, где полости уже выявлены. Примером этой ситуации является рисунок 1, где представлены значения такого информативного параметра как Q-фактор (отношение ширины спектрального максимума, к частоте спектрального максимума георадиолокационной трассы), отстроенные от номера трассы. Ширина полосы в этом случае оценивается на уровне 0,9 от максимума, что связано с высокой изрезанностью спектра. Эти особенности вычисления Q-фактора описаны в [6].

Пунктирными прямоугольниками показан участок, где присутствует полость. Хорошо видно, что атрибут нестабильно реагирует на выявляемый объект. Если задаться определённым порогом, по которому будет приниматься решение о наличии либо отсутствии полости то становится очевидным, что нет такого значения порога, при котором одновременно будет наблюдаться и оптимальный уровень ошибок типа «пропуск цели» и оптимальный уровень ошибок типа «ложные срабатывание».

Можно предположить, что основной помеховый фактор, влияющий на появление ошибок, это армирование. Однако, исходя из анализа множества подобных графиков, можно заметить, что выраженность этих ошибок может существенно меняться от участка к участку. По-видимому, также помеховыми факторами являются: время эксплуатации обделки, состояние её материала, влияние таких процессов как коррозия, выщелачивание и пр. При этом стоит отметить, что влияние воздушных помех на результаты измерений в большинстве случаев довольно низкое.

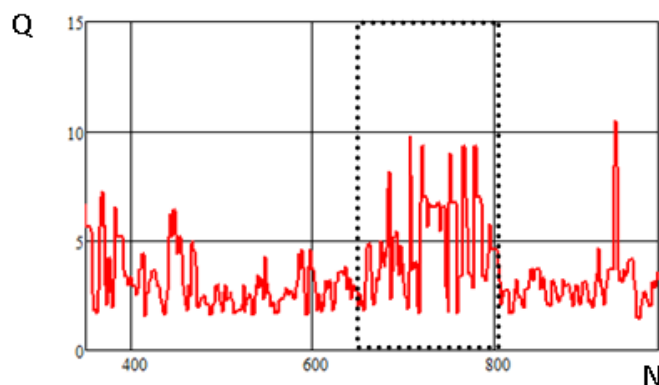


Рис. 1. Изменение значений признака Q от номера трассы N

Очевидным дальнейшим развитием методики определения полостей является переход к, во-первых, комплексированию георадиолокационных информативных признаков, а, во-вторых, к созданию комплексов признаков по ряду применяемых методов.

Использование первого подхода резко повышает качество прогноза, однако его применение не лишено ряда проблем. Комплексирование признаков одного метода позволяет резко сократить количество описанных ошибок, однако такой подход требует постоянной перенастройки от одного участка к другому. На наиболее сложных участках, на которых обделка эксплуатируется долго время в сложных условиях, уровень ошибок и присутствие спорных участков по-прежнему остаётся высоким.

В этом контексте важное значение имеет тот факт, что комплексирование признаков нескольких методов различной физической природы даёт существенное преимущество. При любой системе измерений получаемые данные оказываются зашумлены методическими и аппаратными погрешностями. Однако для другого метода источниками помех будут другие факторы. Например, на результаты сейсмоакустического выявления полостей оказывают существенное воздействие другие причины: качество контакта между приёмником и обделкой, особенности взаимодействия ударника с поверхностью и специфика самого ударника (масса, материал). Наиболее существенным воздействием будет обладать случайный характер самого удара. В этой ситуации можно рассчитывать на то, что методы различной физической природы будут обладать меньшей корреляцией между признаками, а также меньшей корреляцией между помеховыми факторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jifei W., Hongwei H., Xiongyao X., Bobet A., 2014. Void-induced liner deformation and stress redistribution. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 40, P. 263-276.
2. Запрудин А.Г. Обоснование инженерных решений в системе защиты городской среды от воздействия горных работ при строительстве метрополитена // *Известия Вузов. Горный журнал*. 2008, №7. С. 11–18.
3. Davis A.G., Lim M.K., Petersen C.G., 2005. Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings. *NDT&E International*. Vol. 38, P. 181-186. DOI: 10.1016/j.ndteint.2004.03.011.
4. Hai Liu, Xiongyao Xie, Motoyuki Sato. Accurate thickness estimation of a backfill grouting layer behind shield tunnel lining by CMP measurement using GPR // *Ground Penetrating Radar (GPR) 2012, 14th International Conference*, 4-8 June 2012. DOI: 10.1109/ICGPR.2012.6254848.
5. Chuan Li, Meng-Juan Lia, Yong-Gui Zhao, Hao Liu, Zhou Wan, Jiang-Chun Xu, Xiao-Ping Xu, Yan Chen, Bin Wang. Layer recognition and thickness evaluation of tunnel lining based on ground penetrating radar measurements // *Journal of Applied Geophysics*, 2011, Vol.73. P. 45-48.
6. Набатов В.В., Уткина А.В. Анализ поведения добротности и ее составляющих при георадиолокационном выявлении полостей в массиве пород на границе «обделка-грунт» // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022, №6. С. 142-155. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_142.

COMPLEXING OF FEATURES CALCULATED FROM THE RESULTS OF MEASUREMENTS USING GEOPHYSICAL METHODS FOR DETECTING CAVITIES IN THE BACKWALL SPACE OF SUBWAY TUNNELS

*Nabatov Vladimir Vyacheslavovich
NUST MISIS, Moscow*

Summary. The paper deals with the issues of complexing the features calculated from the results of geophysical surveys from the tunnel interior. The preference is given to complexing of signs of methods of different physical nature, subject to different types of interference.

Key words: tunnels, cavities, lining, geophysical methods, GPR, complexing.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Набатов Владимир Вячеславович

nabatov.vv@misis.ru

НИТУ МИСИС, г. Москва, к.т.н., доцент

УДК 551.37

ПРИМЕНЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ АТТРИБУТОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТУРБИДИТОВЫХ ПЕСКОВ КОНУСА ВЫНОСА В ГВИНЕЙСКОМ ЗАЛИВЕ

*Онамун Дезире Люсьен Айемун
ФГБОУ ВО ИРНИТУ, г. Иркутск*

Аннотация: Задача заключается в определении и характеристике верхних маастрихтских канальных систем в блоке CIV_RUS, расположенном в осадочном бассейне Кот-д'Ивуар в Гвинейском заливе, с применением сейсмических атрибутов. Основное внимание уделялось глинистый индикатор и картам атрибутов относительного акустического импеданса, поскольку они являются основными атрибутами, связанными с пористостью. Была выполнена реконструкция модели конуса выноса верхнего Маастрихта, а также выявлены потенциальные пористые канальные системы. Это позволило качественно охарактеризовать перспективную область, но далее необходимо последовать количественному анализу на основе коротажных диаграмм и кернов.

Ключевые слова: осадочный бассейн Кот-д'Ивуара; турбидиты; сейсмический атрибут; пористость.

Осадочный бассейн Кот-д'Ивуара, в котором расположен исследуемый участок CIV-RUS имеет идеальные условия для формирования активной углеводородной системы с оптимальным развитием нефтематеринских пород, путей миграции и комплексов осадконакопления. Береговая линия Кот-д'Ивуара является частью Западноафриканской трансформной окраины, большой тектонической области, ограниченной серией крупных зон разломов, образовавшихся во время разделения Африканского и Американского континентов в период с поздней юры до мелового периода. Исследуемый участок CIV-RUS охватывает площадь 2600 км² (рис. 1).

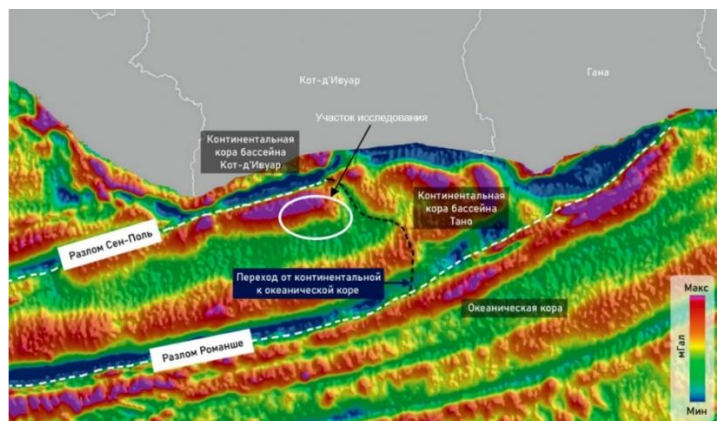


Рис. 1. Карта гравитационных аномалий Гвинейского залива в редукции Буге (согласно источнику [1] с изменениями автора)

Вся территория участка покрыта высокоплотной 3D сейсмической съемкой. При сейсмической съемке использовались 6-километровые косы, что позволило использовать метод Amplitude Variation with Offset (AVO анализ) для изучения флюидонасыщения, степени глинизации и других геологических характеристик, определяющих

перспективность нефтегазоносности разреза. Существуют три перспективные структуры: альбская структурная ловушка четырехстороннего замыкания; маастрихтские стратиграфические ловушки в комплексе глубоководных турбидитовых отложений; сантон-туронские стратиграфические ловушки в комплексе глубоководных турбидитовых отложений. Эта работа заключается в оценке стратиграфической ловушки CIV-RUS маастрихтского яруса с использованием сейсмических атрибутов.

Сейсмический атрибут представляет собой количественную меру интересующей сейсмической характеристики [2]. Изучение сейсмических атрибутов в углеводородной отрасли имеет важное значение, при этом атрибутный анализ может быть как количественным, так и качественным.

Турбидитовые коллекторы представляют собой потенциально выгодные в экономическом плане объекты для разведки углеводородов, и их изучение поможет в разведке огромных объемов нефти и газа особенно для Западной Африки с учетом недавно открытых месторождений в Гане и в Кот-д'Ивуаре.

Лучшим способом выявления и описания каналов и русловых систем являются карты сейсмических атрибутов, поскольку их гораздо легче интерпретировать, чем стандартные сейсмические данные [3].

Доступный набор сейсмических данных представляет собой 3D - сейсмический куб с временной миграцией до суммирования (PSTM), с последующим применением глубинной миграции до суммирования (PSDM). Входными данными были амплитуды, а используемым программным обеспечением - пакет Kingdom SMT. Для того, чтобы получить соответствующую геологическую и литологическую информацию при обнаружении турбидитовых потоков стратиграфической ловушки CIV-RUS использовались карты сейсмических атрибутов, полученные из набора сейсмических данных. Для этого были использованы следующие атрибуты: глинистый индикатор – ГИ и относительный акустический импеданс ОАИ. Было обнаружено несколько систем осадочных турбидитовых каналов. Атрибут ОАИ (рис. 2а) позволил полностью обнаружить многие каналы и отобразить основные литологические особенности на карте. При ГИ (рис. 2б) каналы наблюдаются частично. Среднее расширение каналов составляет 10 км в длину и 1.4 км в ширину.

В коллекторах акустический импеданс обратно пропорционален пористости, поскольку повышенная пористость снижает плотность породы и обычно снижает скорость продольных волн. Если поровые пространства вместо воды или нефти заполняются газом, плотность еще больше снижается и скорость продольных волн резко снижается. В результате скорость продольных волн и акустический импеданс служат прямыми индикаторами углеводородов. ГИ отображает вариации распространения глин в обломочной среде.

Для изучения истории формирования канализированной системы калькулятор атрибутов объема (VatMav) способен прояснить последовательный порядок осадочных событий, которые составляют канальную систему. Этот калькулятор применяет определенный атрибут к объему между двумя субпараллельными горизонтами. Стратиграфическое расстояние было намеренно выбрано для охвата размерности осадочной системы. Калькулятор вычисляет заданный атрибут посредством сканирования амплитуды во временном диапазоне и сохранения общей средней амплитуды (положительной или отрицательной) и среднего времени. Калькулятор атрибутов объема был применен к интервалу верхнего мела толщиной 100 мс. Он ограничен картированным горизонтом сверху, отмеченным желтым цветом, и нижним горизонтом, отмеченным зеленым цветом, который создается программным обеспечением субпараллельно 100 мс ниже.

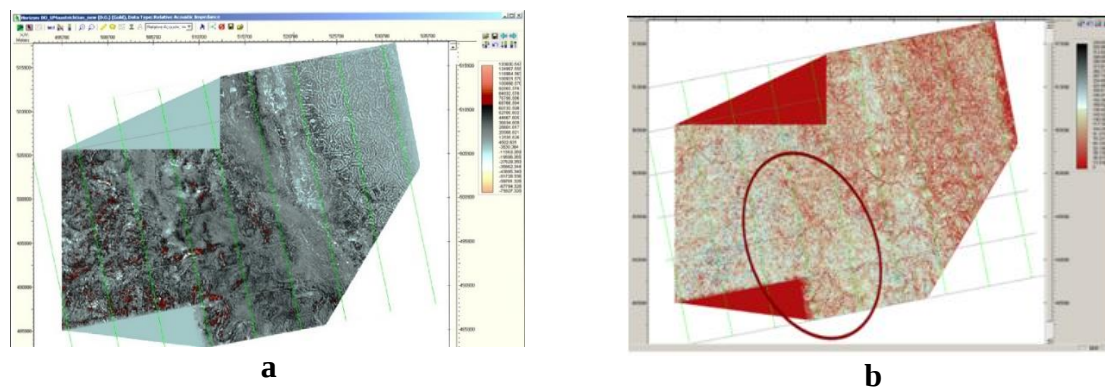


Рис. 2. Распределение атрибутов для систем каналов верхнемеловой толщи: а - «относительный акустический импеданс»; б - «глинистый индикатор»

Атрибуты, представляющие средние характеристики объема, проецируются на средний расчетный горизонт (фиолетовый) и отображаются в цветовой шкале. Вновь созданный горизонт отображает улучшенное представление канализированной системы. Третья ветвь канала становится очевидной.

Для анализа формирования этих каналов исследуемая область была разделена на две области (рис. 3а). Формирование каналов в области 1 является более древним, а структуры были драпированы. Более молодая область 2, которая была активна в картированном верхнем маастрихтском горизонте, является фокусом исследования. Нет видимой связи между каналами этих двух областей в интервале 100 мс ниже картированного верхнего маастрихтского уровня. Атрибутный цветовой рисунок (относительный акустический импеданс) с отчетливыми вариациями оттенков в области карты (рис. 3а) указывает на то, что в интервале 100 мс можно выделить по крайней мере три периода осадочных событий.

Направление потока турбидита — с севера на юго-юго-восток. Система каналов состоит из трех частей, которые представляют собой три отдельных канала, которые выделены разными цветами (синий, красный и зеленый на рис. 3а). К югу от линии D можно выделить три генерации каналов. Стратиграфический порядок виден в сейсмическом поперечном разрезе (рис. 3б). Самый старый из них обозначен красными линиями, тогда как средний канал отображается зеленым цветом, а самый молодой — синим (рис. 3а). Боковая протяженность «красного» русла увеличивается на юг в направлении вниз по склону и достигает ширины 1300 м, где образуются излучины. Аналогично извилистым рекам, уменьшенный уклон приведет к увеличению колебаний системы. Одновременно уменьшенная энергия потока предотвратит дальнейшее врезание русла и осаждение более грубого материала, тогда как более мелкие частицы переносятся дальше вниз по склону в излучины. Относительно уменьшенная ширина «зеленых» и «синих» русел может указывать на то, что они переносили меньшее количество осадка, чем в «красные» времена.

Распределение значений атрибута глинистого индикатора (35%) (эти значения оцениваются на основе статистической оценки распределения образцов индикатора глин во внутренней части русел) ясно показывает, что заполнение русла в основном песчаное. Внутренняя геометрия заполнения русла отражается в сейсмических сечениях, перпендикулярных направлению потока русла. Участки русла характеризуются высокоамплитудными отражателями (высокоамплитудный отражатель; рис. 3б, обведенные области). Заполнение канала представлено положительной формой, а внешняя, дамба, демонстрирует отрицательную геометрию (рис. 3с). Чередование положительных и отрицательных форм во внутренней части основного канала указывает на то, что он использовался в качестве канала для нескольких поколений турбидитовых потоков, что вызвало

смещение тальвега в пределах структуры, ограниченной намыва. Для осуществления этого наблюдения была оцифрована еще одна произвольная линия (линия В), которая пересекает линию А в интересующей части; увеличение внутренней части красного канала ясно показывает наличие тальвега. По линии В был отображен на рисунке 3с, где цифры 1, 2, 3, 4, 5 на вертикальной сейсмической линии соответствуют соответственно значению 1, 2, 3, 4 и 5 на карте (рис. 3а). Наблюдаемые во внутренней части канала положительные (номер 1 и 5) формы и отрицательные (номер 2 и 4) формы представляют собой намыв. То же самое наблюдение было сделано с прямоугольником (номер 3), который представляет собой пересечение линий А и В, то есть чередование положительной и отрицательной формы.

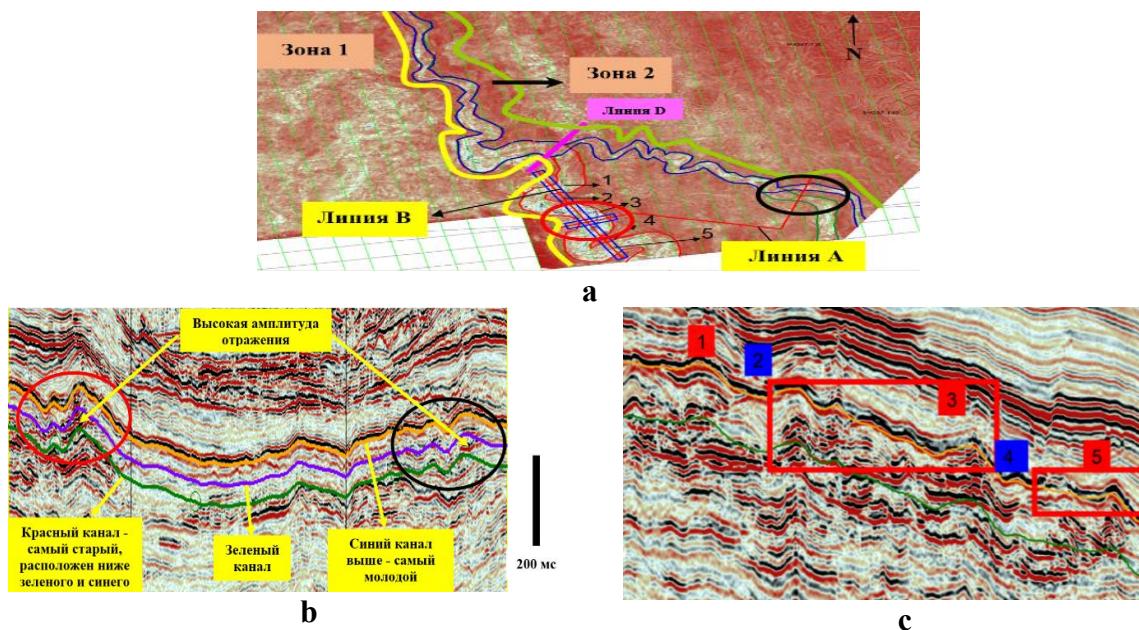


Рис. 3. Формирование турбидитовых каналов: а - области исследования по атрибуту «относительный акустический импеданс»; б - сейсмический разрез по линии А; с - сейсмический разрез через линию В: 1 и 5 — канал; 2 и 4 — намыв; 3 — сочетание намыва и канала

Внутренняя часть каналов в основном представлена высокоамплитудным отражателем. Совокупность всех этих наблюдений позволяет предложить следующие гипотезы: А - высокоамплитудный отражатель и положительная форма — это песок; Б - отрицательная форма и низкая амплитуда на сейсмике соответствуют намывы и говорят о преобладании глины; В - чередование положительных и отрицательных форм во внутренней части главного русла (рис. 3с) указывает на то, что оно использовалось в качестве канала для нескольких поколений турбидитных потоков, что вызвало смещение тальвега в пределах структуры, ограниченной намывом.

Анализ кросс-плота подчеркивает взаимозависимость между ГИ и ОАИ. Фация высокой пористости с низким ОАИ покрывает примерно 1/3 каналов, тогда как 2/3 имеют высокий ОАИ. Заметны песчаные участки при переходе от прямой формы русла к извилистой, а также на извилистых участках вдоль предполагаемого тальвега русла. Оба явления можно объяснить изменениями в энергетическом режиме: скоростью потока и его пропускной способностью — более крупные зерна отлагались вблизи изменения наклона, что указывает на смену наклона вниз к меандрам. Энергия и пропускная способность потока снизились, что привело к отложению песка. Более грубый материал также, вероятно, откладывается вблизи тальвега и подрезанного склона, тогда как мелкие

осадочные частицы остаются в отложениях берегового намывного вала реки и отмелях. Следует иметь в виду, что в результатах акустического импеданса и их интерпретации остаются большие неопределенности из-за отсутствия контроля скважины в инвертированной области.

Данная работа актуальна и позволила показать эффективность анализа сейсмических атрибутов прогноза и описания характеристик залежей углеводородов. Сейсмические атрибуты позволили обнаружить канализованную систему, а затем провести ее реконструкцию. Также было сделано общее представление о песчаных телах, а также о перераспределении песка и его свойствах. Однако важно отметить, что наблюдение и интерпретация геологических событий весьма недостаточные. Основная идея распределения потенциального резервуара может быть выведена путем анализа кросс-плота. Поэтому эти результаты все еще ненадежны и являются качественными. Количественные исследования рекомендуются и будут полезны для получения более надежных результатов и реального представления о склонности к углеводородам. Например, можно рекомендовать анализ каротажных диаграмм и кернов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R. New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // Science. 2014. Vol. 346. Iss. 6205. P. 65–67. <https://doi.org/10.1126/science.1258213>
2. Satinder Chopra and Kurt J. Marfurt: 75th Anniversary Seismic attributes — A historical perspective by Geophysics, 2005, vol. 70, №. 5, P. 3SO28SO, 32 Figs 10.1190/1.2098670
3. Arthur E. Barnes: Handbook of Poststack Seismic Attributes. Geophysical References Series № 21, Society of Exploration Geophysicists, 2016, p. 6 and p. 191.

APPLICATION OF SEISMIC ATTRIBUTES TO STUDY TURBIDITE SANDS OF THE GULF OF GUINEA ALLUV FAN

*Onamoun Désiré Lucien Ayémoun
INRTU, Irkutsk*

Summary. The objective is to identify and characterize the upper Maastrichtian channel systems in the CIV_RUS block located in the Ivory Coast sedimentary basin in the Gulf of Guinea using seismic attributes. The focus was on the clay indicator and relative acoustic impedance attribute maps as these are the main attributes related to porosity. An upper Maastrichtian fan model was reconstructed and potential porous channel systems were identified. This allowed a qualitative characterization of the prospective area, but further quantitative analysis based on logs and cores is needed.

Key words: sedimentary basin Côte d'Ivoire; turbidites; seismic attribute; porosity.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Онамун Дезире Люсьен Айемун

donamoun@gmail.com

ФГБОУ ВО ИРНИТУ, г. Иркутск, аспирант

Научный руководитель: Дмитриев Александр Георгиевич, д.г.-м.н., профессор

УДК 550.34.01

АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Пащенко Ростислав Александрович
ИФЗ РАН, г. Москва*

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы автоматического определения времени прихода Р-волны в акустических сигналах горных пород, включая классические алгоритмы (STA/LTA, AIC) и глубокие нейронные сети. Предлагается комбинированный подход, где AIC-пикер служит первичной оценкой, а CNN уточняет ключевые временные метки. Дополнительно анализируется первый полупериод вступления Р-волны, что расширяет возможности оценки упругой реакции и затухания в породе. Полученные результаты могут повысить точность и информативность лабораторных исследований, а также лечь в основу систем мониторинга горных массивов.

Ключевые слова: AIC-алгоритм, STA/LTA-метод, глубокое обучение, сверточные нейронные сети (CNN), акустические сигналы горных пород, определение Р-волны.

Современные задачи, связанные с лабораторным изучением горных пород, всё чаще требуют автоматизации процессов анализа акустических данных. Особый интерес представляет определение характеристик волн (например, момента прихода Р-волны) в акустических сигналах. Эта задача имеет важное прикладное значение в лабораторных исследованиях акустической эмиссии. Например, знание времен первых вступлений позволяет определить местоположение трещины-излучателя, образующейся в образце горной породы под действием внешних нагрузжений. Кроме того, выделение первых вступлений в акустическом сигнале необходимо для проведения последующего спектрального анализа сигнала, что является распространенным методом исследований в данной отрасли [1].

Традиционно выделение прихода Р-волны выполнялось вручную, опираясь на визуальный анализ формы сигнала и эмпирические критерии. Однако при больших массивах данных ручная разметка становится затруднительной, а иногда и невозможной, поскольку требует значительных временных ресурсов. На протяжении многих лет учёные работали над разработкой методов автоматического определения первых вступлений, включая методы, основанные на амплитуде, стандартном отклонении или энергии, а также статистические подходы и неглубокие нейронные сети. Среди классических подходов для автоматического определения прихода волны выделяют метод STA/LTA (Short-Term Average / Long-Term Average) [2], который рассчитывает отношение краткосрочного и долгосрочного скользящих средних. Считается, что при начале волны наблюдается характерный резкий рост этого отношения, позволяющий автоматически зафиксировать момент появления Р-волны. Метод довольно надёжен при хорошем отношении сигнал/шум, однако бывает склонен к ложным срабатываниям в случае наличия импульсных возмущений, а также требует предварительной подстройки окон «короткого» и «длинного» среднего.

Другим широко известным алгоритмом является AIC-пикер (Akaike Information Criterion) [3], который ищет индекс k , при котором функция AIC достигает минимума:

$$AIC(k) = k \ln(\sigma_{left}^2) + (N - k - 1) \ln(\sigma_{right}^2), \quad (1)$$

где σ_{left}^2 и σ_{right}^2 – дисперсии левой и правой частей сигнала относительно точки k . Смысл данного метода заключается в том, что в точке прихода волны резко меняются статистические свойства левой и правой частей сигнала, и этот переход выражается через дисперсию и логарифмические оценки, входящие в формулу AIC. В сейсмологии (особенно при обработке телесейсмических данных) метод зарекомендовал себя как один из наиболее точных и стабильных [4]. Однако в лабораторных условиях сигналы короче по длительности и содержат многочисленные переотражения, поэтому AIC-пикер порой теряет точность, если переход не выглядит как чёткий скачок.

Перспективное направление последних лет — применение методов глубокого обучения (DL). Первоначально эти подходы развивались в геофизике для автоматического определения фаз при крупных сейсмических событиях, когда возникает необходимость обработать огромный объём данных (тысячи и десятки тысяч записей). Так, Zhu и Beroza [5] показали, что свёрточная нейронная сеть (CNN) способна обгонять классические пикеры STA/LTA и AIC по точности выделения прихода P- и S-волн. Ross и Meier [6] с помощью системы PhaseLink продемонстрировали, что глубокая модель может не только идентифицировать приход, но и ассоциировать сигналы из разных станций, повышая эффективность сейсмической локации. С точки зрения акустики горных пород это особенно интересно, поскольку волновые процессы в лабораторных образцах имеют много общего с сейсмическими процессами, но протекают на меньших масштабах и при более высоком уровне шума.

Специфика акустических сигналов в лабораторных экспериментах заключается в том, что они относительно короткие (сотни – несколько тысяч отсчётов), но могут содержать высокую частоту переотражений и быстро затухающих колебаний. Отношение сигнал/шум может варьироваться в широких пределах, а разница в прочности и структуре пород (например, гранит, песчаник, известняк) приводит к весьма разным формам волны. Следовательно, алгоритму нужно уметь адаптироваться к этим вариациям, что в случае классических пикеров требует тонкой ручной настройки, а в случае нейросети — наличия репрезентативной обучающей выборки с различными условиями экспериментов.

Переходя от обзора литературы к моему предстоящему исследованию, стоит подчеркнуть, что планируемый подход будет опираться на классический AIC-пикер для первичного определения зоны прихода волны, после чего будет применена нейросеть (в частности, свёрточная архитектура) для уточнения ключевых временных точек с учётом детальной формы сигнала. Помимо выявления начала P-волны предполагается выделять весь первый полупериод её вступления — это отличительная особенность работы, которая позволит глубже проанализировать динамику начального колебания, оценить амплитудно-частотные характеристики и более детально учесть физическую структуру породы. Фиксация полного первого полупериода (то есть участка сигнала от момента прихода до смены знака колебаний) может дать дополнительную информацию о параметрах затухания и упругой реакции породы, что потенциально полезно для диагностики трещиноватости и перехода в предразрушенное состояние. Физически это важно, поскольку кратковременный, но максимально энергетически насыщенный отрезок волны даёт наиболее чувствительные показатели изменения жёсткости материала.

В ходе экспериментов будет проведён детальный физический анализ закономерностей изменения параметров P-волны (амплитуды, скорости, затухания), а также формы и продолжительности первого полупериода. Предполагается, что комбинированный алгоритм даст более точное и интерпретируемое описание поведения волны, что ляжет в основу новой методики быстрой оценки состояния горной породы при лабораторных и, в перспективе, полевых исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пащенко Р.А. Спектральные характеристики источников акустической эмиссии в горных породах // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2024. № 3. С. 1–7.
2. Allen R. Automatic phase pickers: Their present use and future prospects // Bulletin of the Seismological Society of America. 1978. Vol. 68, No. 5. P. 1521–1532.
3. Akaike H. A new look at the statistical model identification // IEEE Transactions on Automatic Control. 1974. Vol. 19, No. 6. P. 716–723.
4. Sleeman R., van Eck T. Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1999. Vol. 113, Nos. 1–4. P. 265–275.
5. Zhu W., Beroza G.C. PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method // Geophysical Journal International. 2019. Vol. 216, No. 1. P. 261–273.
6. Ross Z.E., Meier M.A. PhaseLink: A deep learning approach to seismic association // Seismological Research Letters. 2020. Vol. 91, No. 5. P. 2407–2416.
7. Liu W. et al. CNN-based approach for automatic P-wave picking in microseismic monitoring of rock fracturing // Earth and Planetary Physics. 2020. Vol. 4, No. 3. P. 244–252.

ANALYSIS OF ACOUSTIC SIGNALS IN ROCKS AND PROSPECTS FOR RESEARCH AUTOMATION

Rostislav Pashchenko
IPE RAS, Moscow

Summary. This article discusses modern methods for automatically determining the arrival time of the P-wave in acoustic signals of rocks, including classical algorithms (STA/LTA, AIC) and deep neural networks. A combined approach is proposed, in which the AIC picker provides a primary estimate, while a CNN refines the key temporal markers. Additionally, the first half-period of the P-wave onset is analyzed, expanding the possibilities for assessing the elastic response and damping in the rock. The obtained results can improve the accuracy and informativeness of laboratory research and serve as a foundation for monitoring systems in rock masses.

Key words: AIC algorithm, STA/LTA method, deep learning, convolutional neural networks (CNN), acoustic signals of rocks, P-wave determination.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пащенко Ростислав Александрович

r.pashchenko@mail.ru

ИФЗ РАН, г. Москва, ведущий инженер

УДК 550.380

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ БАЗ ДАННЫХ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОБСЕРВАТОРИИ «АРТИ»

*Пустовая Татьяна Львовна
ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

Аннотация. Представлена разработанная в обсерватории «Арти» методика по созданию цифровых баз данных геомагнитного поля с аналоговых фотографических магнитограмм, зарегистрированных на обсерватории «Арти» и «Высокая Дубрава» за период с 1969 по 2014 и с 1932 по 1972 годы.

Ключевые слова: магнитограммы, оцифровка, станция Боброва, программы, вариометры, калибровка, архив.

Одной из главных задач магнитных обсерваторий является предоставление однородных и высокоточных (в абсолютном смысле) данных о магнитном поле Земли за максимально продолжительный интервал времени. Традиционная схема проведения магнитных наблюдений, реализуемая также и современными приборами, – это непрерывная регистрация изменений поля с помощью вариометров и периодические абсолютные измерения.

Магнитная станция обсерватории «Арти» ведет непрерывную регистрацию геомагнитного поля с 1969 года и по сей день. При вступлении в строй станция была оснащена магнитными кварцевыми вариометрами Боброва (магнитометры с диапазоном измеряемых полей 0,1 -20000 нТл), протонным магнитометром, разработанным в Институте геофизики УФАН СССР, немагнитным теодолитом.

Кварцевый вариометр (рис.1) состоит из постоянного магнита с зеркалом, подвешенным на раскрученных растяжках кварцевой рамки, помещенной в герметичный немагнитный корпус цилиндрической формы. Неподвижное зеркало закреплено в рамке. В передней части корпуса имеется отверстие с объективом для прохождения луча света. У D- и Z- вариометров перед объективом устанавливается прямоугольная призма для поворота светового луча на 90°. На корпусе вариометра есть один виток провода градуировочного кольца.

Принцип действия вариометра основан на взаимодействии подвешенного на упругих нитях постоянного магнита с магнитным полем Земли. Поворот магнита вместе с закрепленным на нем зеркалом происходит в результате изменения напряженности компонентного составляющей магнитного поля, направленной перпендикулярно магнитной оси магнита. Угол поворота магнита пропорционален изменению этого поля. Регистрация вариаций поля с магнитометра Боброва осуществлялась на осциллографную фотобумагу [1].

Запись магнитного поля Земли станцией «Арти» на датчиках Боброва велась непрерывно более 40 лет. Ежедневно в 3 часа (GMT+05:00) производилось снятие фотолент всех серий, контроль и запись в журнале температуры и влажности в магнитных павильонах, сверка показаний контактно-пусковых часов с сигналом точного времени. В 8 часов (GMT+05:00) осуществлялся контроль за работой регистраторов, записывались в журнал сведения о температуре и влажности в павильонах, а также проводились абсолютные наблюдения D-, H-, Z- и T- компонент магнитного поля Земли. Еженедельно проводилась градуировка вариометра.



Рис. 1. Датчики кварцевых вариометров Боброва

В 2006 году на Магнитную станцию «Арти» установили два комплекта цифровых вариометров «Кварц-4», разработанных в ИЗМИРАН на основе кварцевых датчиков. Прибор, как и вариометр Боброва, регистрирует вариации D , H , Z вектора магнитной индукции геомагнитного поля. Для корректного сопоставления данных цифровой магнитной станции (ЦМВС) возникла потребность в оцифровке для сравнения данных фотозаписи с новой цифровой аппаратурой. Так в 2011 году возник проект по оцифровке фотозаписи в ретроспективе до 1973 года.

Для процедуры оцифровки задействованы:

1. Сканер Mustek ScanExpress A3 USB 1200 Pro- устройство для преобразования фото-магнитограмм в цифровой формат;
2. PaperPort – приложение для помощи в оцифровке магнитограмм;
3. Raster Stitch 1.30 – программа для соединения нескольких растровых картинок в одну;
4. WSG – программа оцифровки магнитограмм разработана ИЗМИРАН (рис. 2)
5. MATLAB R2015a – в этой интерактивной среде прописаны коды для преобразования текстового документа в формат графических рисунков.

Оцифровка магнитограмм производится в два этапа: сканирование магнитограммы и оцифровка отсканированного изображения. Сканирование выполняется для перевода изображения с бумажного носителя в цифровой вид строго в одном и том же масштабе. Дальнейшая обработка магнитограммы сводится к построению графика выбранной составляющей в ручном режиме, созданию временных интервалов, а также масштаба оцифровки (рис. 2).

Данные по величине отклонения графика выбранной составляющей от базисной линии содержатся в выходном текстовом файле, который пригоден для дальнейшей обработки на компьютере.

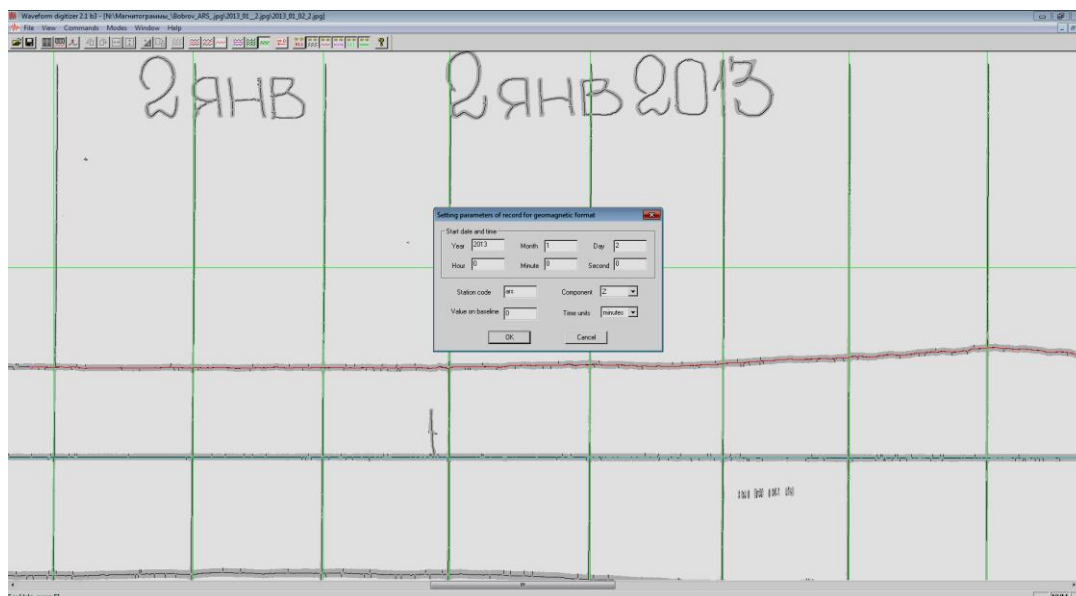


Рис. 2. Пример обработки магнитограммы за 02 января 2013 год по Z-компоненте

Для контроля точности по окончании процесса оцифровки сравниваются величины отклонения графика от базисной линии (рис. 3).

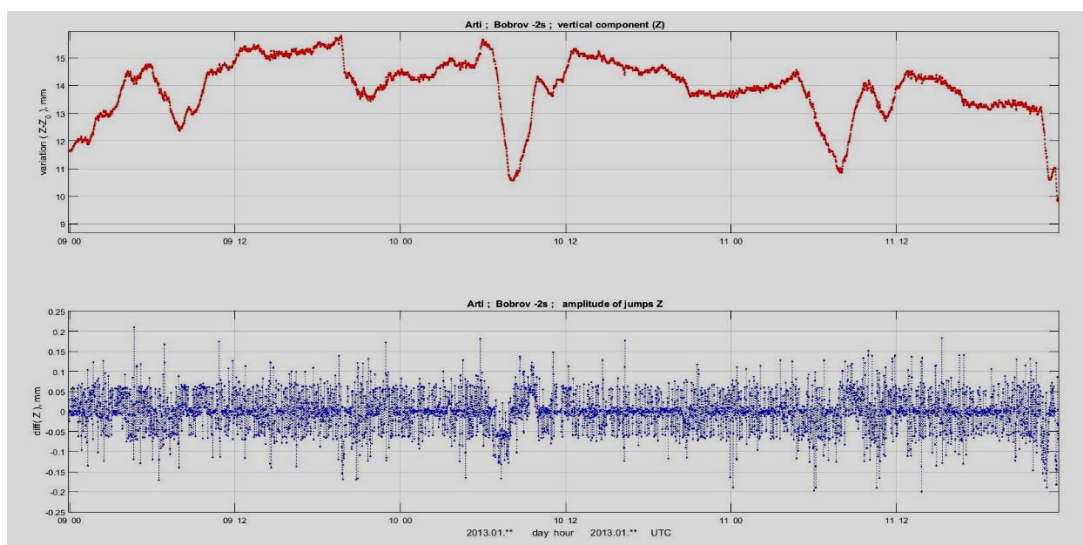


Рис. 3. Проверка оцифрованных данных на станции «Арты» за 09, 10, 11 января 2013 года

Анализируя результаты сравнения среднeminутных значений станций «Кварц-4» и оцифрованных данных, зарегистрированных станцией Боброва (рис. 4.), можно утверждать, что вышеизложенная методика позволяет получить цифровые данные высокой точности. При рассмотрении графиков необходимо учесть, что амплитудное разрешение аналоговой станции Боброва составляет 1.5 нТл, временное разрешение 1.5 минуты. Для ЦМВС эти характеристики составляют соответственно 0.02 нТл и 0.05 сек. По приведенным магнитограммам (рис. 4) посчитано, что среднеквадратичное отклонение для горизонтальной компоненты аналоговой и цифровой регистрации в магнитоспокойный день составляет 0.3 нТл. Это свидетельствует, что разработанная методика пригодна для использования при создании цифровых баз данных минутных значений геомагнитного поля с аналоговых магнитограмм в научных и других целях.

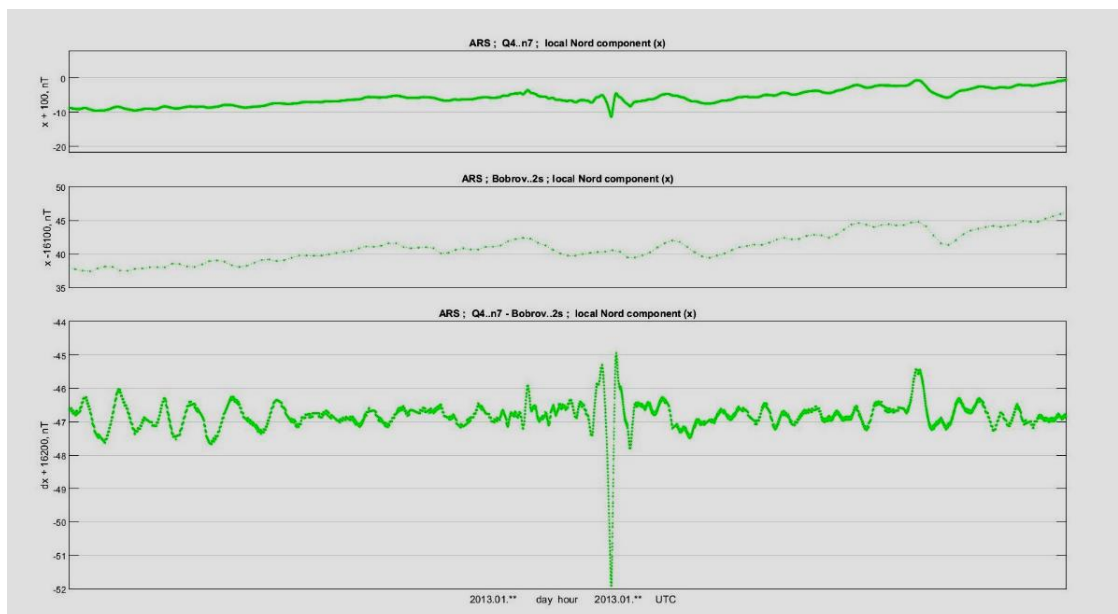


Рис. 4. Сравнение среднееминутных значений станций Боброва и «Кварц-4» за 02 января 2013 года по Н - компоненте

Созданная таким образом база данных исторических магнитограмм с минутным разрешением по магнитограммам обсерватории «Арти» размещена в открытом доступе на сайте Института Геофизики имени Ю. П. Булашевича [2].

На сегодняшний день выполнена оцифровка магнитограмм станции «Арти» за периоды 1973-1987 и 2005-2014 годы. В дальнейшем планируется продолжить оцифровку архива фотозаписи, а также повысить качество абсолютных наблюдений посредством введения в методику файлов с расчетами калибровочных и базисных данных. По этой методике, кроме того, будут также оцифровываться магнитограммы уральской обсерватории «Высокая Дубрава» за период 1932-1972 годы. В результате будут получены по обсерваторским непрерывным мониторинговым наблюдениям качественные цифровые данные по вариациям и абсолютным величинам геомагнитного поля. Эти данные можно использовать для различных целей, например, при сведении карт магнитных съёмок прошлых лет, выполненных на Урале к единому уровню и, таким образом, созданию сводных карт, что является весьма актуальной задачей.

В заключение отметим, что за почти двухсотлетний период стационарных геофизических наблюдений геомагнитного поля на Урале был накоплен уникальный фактический материал, имеющий большое научное значение. Все без исключения обсерваторские наблюдения, выполненные в обсерваториях «Екатеринбург» (1837-1932 гг.), «Высокая Дубрава» (1932-1972 гг.), «Арти» (1969-настоящее время), и накопленные в их процессе данные не потеряли своей уникальности, могут быть использованы и сегодня, а в фундаментальном плане их ценность продолжает возрастать с каждым годом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кусонский О.А. Геофизические обсерваторские исследования на Урале. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. – 280 с.
2. ИГФ УрО РАН. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://igfuror.ru/struktura/observatoriya-arti/bazy-dannykh> (дата обращения 25.02.2025)

CREATION OF DIGITAL DATABASES OF THE GEOMAGNETIC FIELD AT THE “ARTI” OBSERVATORY

Pustovaya Tatyana Lvovna
IGF UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Summary. A methodology developed at the Arti observatory for creating digital databases of the geomagnetic field from analog photographic magnetograms recorded at the Arti and Vysoka Dubrava observatories for the period from 1969 to 2014 and from 1932 to 1972 is presented.

Key words: magnetograms, digitization, Bobrov station, programs, variometers, calibration, archive.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пустовая Татьяна Львовна

pustovaya90@bk.ru

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, инженер

Научный руководитель: Кусонский Олег Александрович, к.г.-м.н.

УДК 550.8.056

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ С ЦЕЛЬЮ ИЗУЧЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЗАОБДЕЛОЧНОГО ПРОСТРАНСТВА, НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА НИЖЕГОРОДСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА

Рахимов Эмиль Артурович
АО "НИПИИ "Ленметрогипротранс", г. Санкт-Петербург

Аннотация. Для обеспечения безопасности эксплуатации объектов инженерной и транспортной инфраструктуры подземного заложения необходимо выполнять комплекс геолого-геофизических исследований, направленных на изучение состояния верхней части разреза. В рамках данной работы была выполнена специализированная обработка 2D стандартных сейсмических данных на поверхностных волнах по технологии MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). В результате проделанной работы удалось убедительно показать эффективность метода MASW при изучении заобделочного пространства; выработать оптимальную методику обработки поверхностных волн; разработать методические рекомендации, которые могут быть полезными для реализации других проектов.

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, горные выработки неглубокого подземного заложения, поверхностные волны, MASW

В настоящее время анализ поверхностных волн широко используется в рамках геолого-геофизических исследований [4, 5], в том числе для обеспечения безопасности эксплуатации объектов инженерной и транспортной инфраструктуры подземного заложения [2, 3].

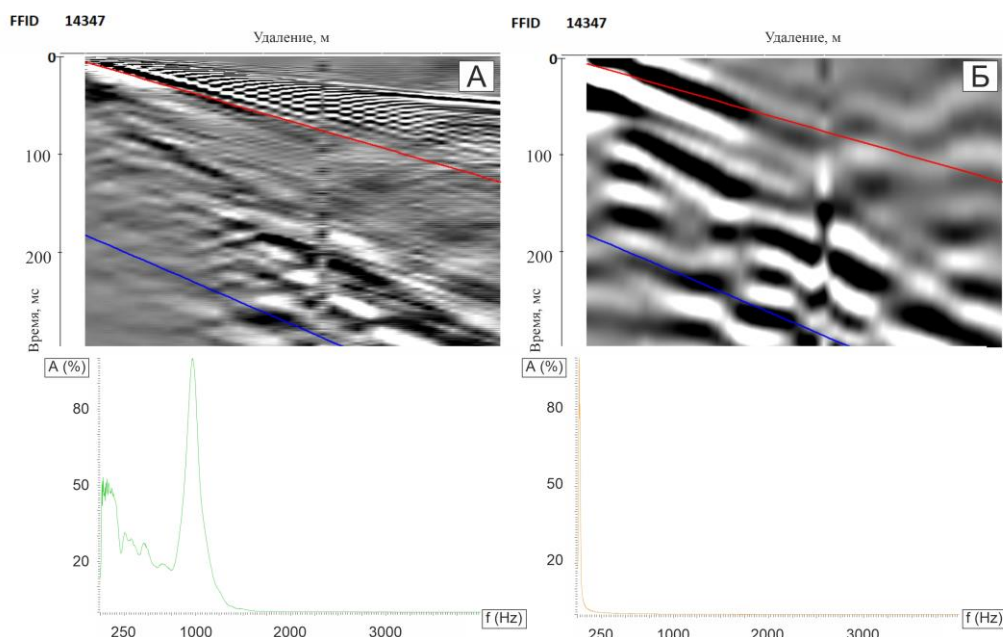


Рис. 1. Пример полевой сейсмограммы: а – исходная сейсмограмма ОПВ, б – сейсмограмма ОПВ после применения процедур обработки для выделения поверхностной волны. Красным и синим цветом показаны линии мьютинга

В рамках данной работы была выполнена специализированная обработка 2D стандартных сейсмических данных на поверхностных волнах по технологии MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) [6] с целью детального изучения состояния заобделочного пространства, на примере участка Нижегородского метрополитена.

В работе демонстрируются данные МПВ 2024 года. В качестве приемников упругих колебаний использовалась коса из 24-х сейсмоприемников GS-20DX с шагом расстановки 2 метра. Датчики крепились вдоль линии приема путем засверливания в бетонное покрытие путевого бетона. Данные хорошего качества, на всех сейсмограммах присутствуют интенсивные поверхностные волны (рис. 1).

Для обработки данных методом MASW профиль центральной системы наблюдения форматировался во фланговую систему наблюдения

Стоит отметить, что на дисперсионных изображениях по причине инверсионного разреза (наличие железобетонной обделки), присутствует как низкочастотная часть моды, несущая информацию о глубинных частях разреза, так и высокочастотная область, несущая информацию о верхних частях разреза (рис. 2). В нашем случае целевой сигнал поверхностных волн находится в диапазоне частот от 8 до 17 Гц и имеет кажущиеся скорости в диапазоне от 200 до 350 м/с для фундаментальной моды.

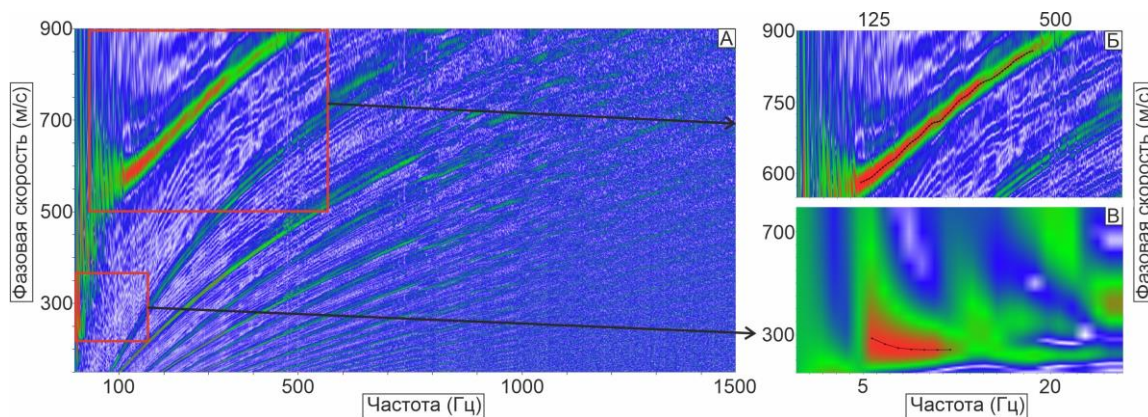


Рис. 2. Пример дисперсионного изображения: а – дисперсионное изображение по сейсмограмме, б – фрагмент дисперсионного изображение (пропикированная высокочастотная составляющая моды), в – фрагмент дисперсионного изображение (пропикированная низкочастотная составляющая моды)

Обработка сейсмических данных была выполнена в программном пакете SeisPro (ООО «Деко-Геофизика СК») с использованием следующего графа:

- выделение поверхностных волн;
- выбор оптимальной длины приемной линии;
- расчет и пикировка дисперсионных изображений;
- определение параметров начальной модели;
- итерационная инверсия данных

Для выделения поверхностных волн применялась фильтрация в частотной области с полосой пропускания фильтра до 20 Гц (рис. 1б).

Выбор оптимальной длины приемной линии определялся опытным путем. С одной стороны, дисперсионное изображение должно быть устойчивым, чтобы не было разнотчений при пикировке данных и была возможность сохранять объективность, для этого размер базы наблюдения надо увеличивать. С другой стороны, чем больше база наблюдения, тем меньше горизонтальная разрешающая способность. В нашем случае длина приемной линии для расчета дисперсионных изображений была выбрана равной

40 м. Пикировка дисперсионных мод изображений выполнялась вручную, с использованием средств автоматизации, имеющихся в программе SeisPro, включая автоматическую пикировку максимумов между задаваемыми пользователем точками (рис. 3).

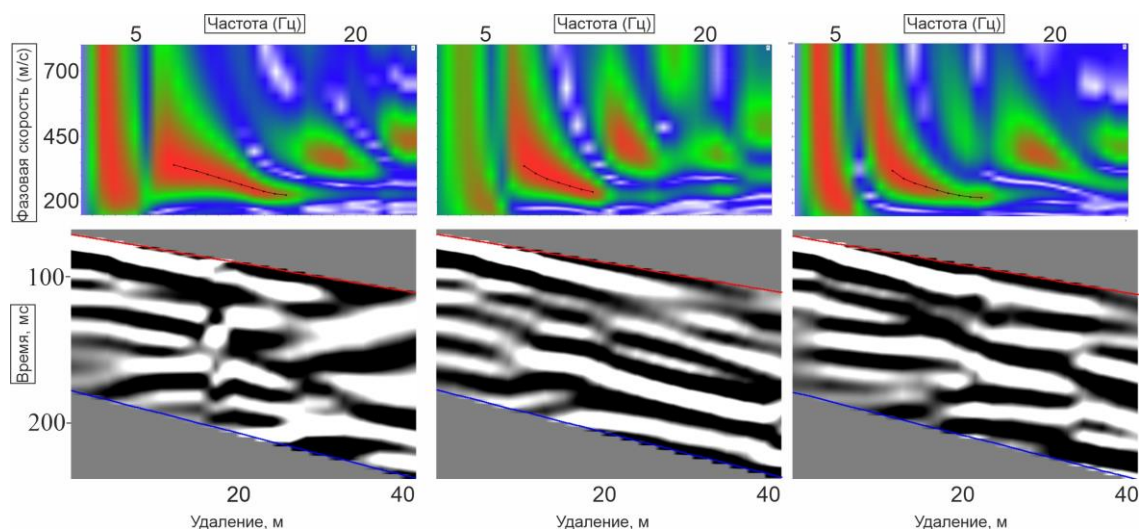


Рис. 3. Пример дисперсионных изображений и сейсмограмм по профилю: сверху – дисперсионные изображения, снизу – соответствующие дисперсионным изображениям и подготовленные для обработки методом MASW сейсмограммы

Глубина модели составила 20 м. Она была выбрана равной половине максимальной длины поверхностной волны, выделяемой на данных.

Значения плотности и коэффициента Пуассона были выбраны на основе анализа априорной геологической информации и составили 1.9 г/см^3 и 0.46 соответственно. При этом оценка влияния этих параметров на результат инверсии показала, что они слабо влияют на относительные изменения значений скоростей поперечных волн на получаемых разрезах.

Инверсия выполнялась только по фундаментальной моде. Для надежности решения было выбрано 7 итераций. На всех пикетах среднеквадратическая невязка не превышала 2 м/с. Результат инверсии представлен ниже (рис. 4).

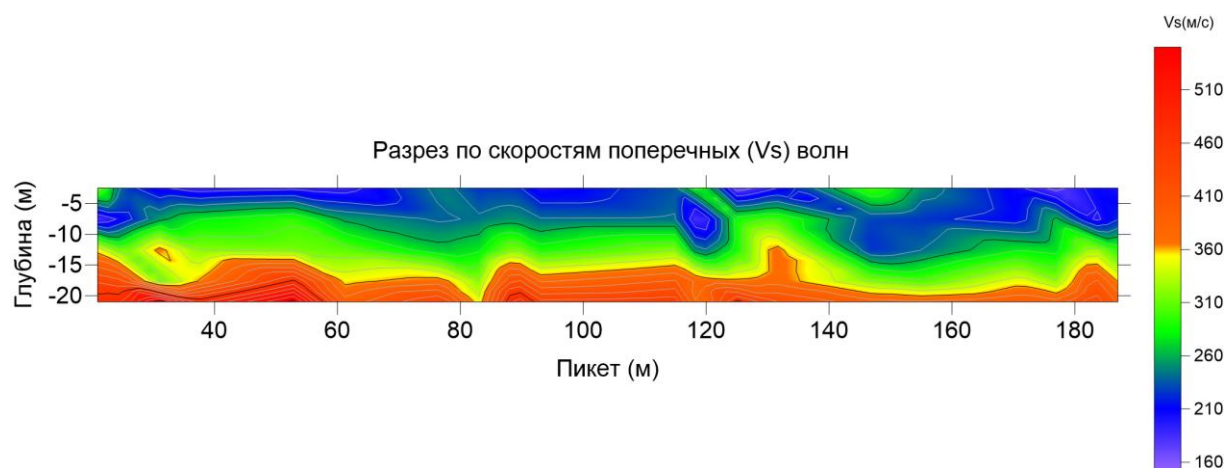


Рис. 4. Результаты инверсии данных MASW по фундаментальной моде

По результатам инверсии в верхней части разреза до глубины 10 м (здесь и далее значения глубины от внешней границы обделки) исследованный массив грунтов (пески) характеризуется следующими значениями скоростей поперечных волн: $(Vs) \sim 0,15 - 0,25$

км/с. Ниже глубины 10 м (до ~ 17 м) выделяются породы: суглинки со скоростями поперечных волн (V_s) ~ 0,26 – 0,35 км/с. Далее встречаются более плотные суглинки со скоростями поперечных волн (V_s) ~ 0,36 – 0,5 км/с.

Результат обработки, полученный методом MASW, можно комбинировать с результатами, полученными на преломленных волнах. Такой подход даёт возможность оценить деформационно-прочностные свойства пород для прогноза геологического строения и оценки возможных нагрузок на грунты при эксплуатации подземных сооружений [1].

В результате проделанной работы удалось выработать оптимальную методику обработки данных в рамках метода MASW, зарегистрированных с целью изучения состояния заобделочного пространства. Данные методические рекомендации могут быть полезными для реализации других проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко О. В. Определение упругих характеристик низкоскоростных пород, перекрытых высокоскоростным слоем обделки тоннеля, по материалам сейсморазведки: дис. к.г.-м.н.. наук: 25.00.10. СПб., 2015. - 135 с.
2. Дорохин К.А. Обоснование и разработка метода оценки геодинамического состояния массива горных пород на основе дисперсионных параметров сейсмических волн: дис. к. техн. наук: 25.00.20. СПб., 2017. - 196 с.
3. Дорохин К.А. Оценка геодинамического состояния массива горных пород методом дисперсионного анализа поверхностных волн // ГеоЕвразия-2018. 2018. с. 648-653.
4. Половков В.В., Терёхина Я.Е., Рахимов Э.А., А.А. Кудинов, А.В. Пономаренко А.В., Соловьёва М.А., Буланова И.А., Токарев М.Ю., Горбачев С.В. Методика обработки поверхностных волн, зарегистрированных при сейсморазведочных работах 3D МОБ-ОГТ с буксируемым оборудованием с целью изучения строения верхней части разреза шельфа Печорского моря // Геофизика, 2024. №2. С. 52-57.
5. Половков В.В., Рахимов Э.А., Кудинов А.А. Методика обработки поверхностных волн, зарегистрированных при сейсморазведочных работах 3D МОБ-ОГТ с буксируемым оборудованием с целью изучения строения верхней части разреза шельфа Печорского моря // ГеоЕвразия-2024. 2024. с. 100-103.
6. Park, C., Miller, R., Xia, J., Ivanov, J. Multichannel analysis of surface waves (MASW) – active and passive methods // The Leading Edge, 2007. V. 26(1). P. 60–64.

METHOD FOR PROCESSING SURFACE WAVES RECORDED FOR THE PURPOSE OF STUDYING THE CONDITION OF THE SPACE BETWEEN LINING AND ROCK, USING THE EXAMPLE OF A SECTION OF THE NIZHNY NOVGOROD SUBWAY

Rakhimov Emil

Research, Design and Survey Institute Lenmetrogiprotrans, Saint Petersburg

Summary. To ensure the safety of operation of underground engineering and transport infrastructure facilities, it is necessary to perform a set of geological and geophysical studies aimed at studying the condition of the upper part of the section. Within the framework of this work, specialized processing of 2D standard seismic data on surface waves was performed using MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) technology. As a result of the work done, it was

possible to convincingly demonstrate the effectiveness of the MASW method in studying the space between lining and rock; develop an optimal method for processing surface waves; develop methodological recommendations that can be useful for the implementation of other projects.

Key words: engineering seismic exploration, shallow underground mine workings, surface waves, MASW.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рахимов Эмиль Артурович

Rahimovball15@mail.ru

АО "НИПИИ "Ленметрогипротранс", г. Санкт-Петербург, м.н.с.

УДК 550.837.311

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВЭЗ

Рыжов Никита Валерьевич
ООО «ПК и БЗ», г. Пермь

Аннотация. Проведен анализ результатов решения обратной задачи электроразведки методом вертикального электрического зондирования с использованием методов эволюционной оптимизации при различном уровне помех и типе разреза. Показано, что выбор конкретного метода инверсии должен основываться на информации об уровне помех в наблюдаемых данных с учетом типа разреза.

Ключевые слова: электроразведка, вертикальное электрическое зондирование, обратная задача, эволюционная оптимизация, помеха.

Актуальность изучения новых методов решения обратных задач (ОЗ) геофизики, в т.ч. и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), обусловлена тем, что эффективность применения различных методов может быть ограничена особенностями решаемой задачи. Такими особенностями при решении ОЗ ВЭЗ могут быть тип и уровень помех в наблюдаемых данных, структура изучаемого разреза, распределение петрофизических параметров в разрезе и др.

Задача определения параметров геоэлектрического разреза:

$$\mathbf{x} = \{h_1, \dots, h_{n-1}, r_1, \dots, r_n\}, \quad (1)$$

где n – количество слоёв, h_i, r_i – мощность и удельное электрическое сопротивление (УЭС) i -го слоя, по наблюдаемым значениям кажущихся сопротивлений (КС), сводится к оптимизационной задаче:

$$\mathbf{x}^{opt} = \underset{\mathbf{x} \in D}{\operatorname{argmin}} f(\mathbf{x}), \quad (2)$$

где $f(\mathbf{x})$ – минимизируемая функция, D – множество допустимых решений ОЗ, или поисковая область.

На сегодняшний день разработано множество методов многомерной оптимизации, в т.ч. на основе вероятностного подхода, в число которых входят методы эволюционной оптимизации (ЭО). Общей чертой методов ЭО является формирование множества решений, или популяции:

$$V = \{\mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n\} \subset D, \quad (3)$$

где n – размерность задачи, которые определенным образом улучшаются в ходе итерационного процесса [2]. В работе рассмотрены следующие алгоритмы ЭО: метод роя частиц (МРЧ), алгоритм стаи серых волков (АССВ) [4], генетический алгоритм (ГА) [1], алгоритм гравитационного поиска (АГП) и дифференциальная эволюция (ДЭ) [3].

Начальное положение элементов множества V генерируется с помощью заданных на основе априорной информации распределений параметров геоэлектрического разреза. При наличии информации о среднем значении μ_i и дисперсии σ_i^2 i -го геометрического параметра разреза, соответствующая компонента x_i вектора $\mathbf{x}$ может быть взята случайным образом из нормального распределения $x_i \sim \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i^2)$. Для генерации компонентов вектора $\mathbf{x}$, соответствующих УЭС, целесообразнее использовать логнормальный закон распределения $\ln(x_i) \sim \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i^2)$. При отсутствии информации о значениях μ_i и σ_i^2

i -го параметра используется равномерное распределение $x_i \sim U[a_i, b_i]$, заданное нижней и верхней границами a_i и b_i предполагаемого диапазона его изменений.

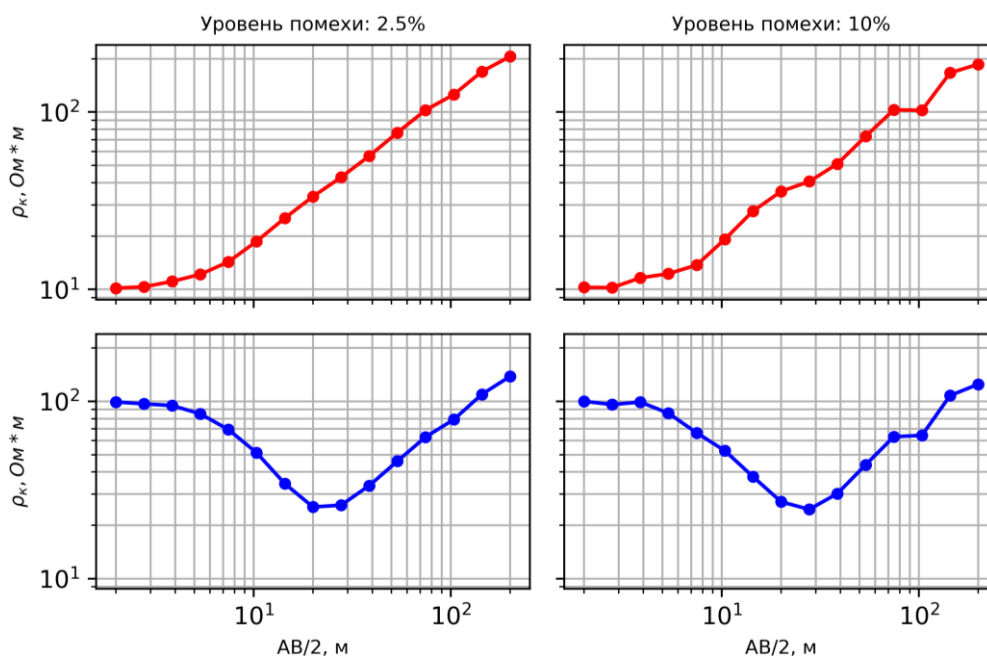
Исходные синтетические геоэлектрические модели представлены трехслойным разрезом типа А ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$) и трехслойным разрезом типа Н ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$). Параметры разрезов представлены в таблице 1. Кривые КС, рассчитанные для обоих типов разреза представлены на рисунке 1. Кривые КС осложнены 2.5- и 10-процентной нормально распределенной мультипликативной помехой.

Таблица 1

Параметры синтетических геоэлектрических разрезов

Тип разреза	h_1 , м	h_2 , м	ρ_1 , Ом*м	ρ_2 , Ом*м	ρ_3 , Ом*м
	5	10	10	100	500
	5	10	100	10	500

где h_1 , h_2 – мощности первого и второго слоёв соответственно, ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 – УЭС первого, второго и третьего слоёв соответственно.

**Рис. 1. Синтетические кривые КС. Сверху – разрез типа А, снизу – разрез типа Н**

Вышеперечисленные алгоритмы ЭО принимают на вход ряд гиперпараметров, общими из которых являются количество итераций M и размер популяции k . В данной работе параметры M и k заданы равными 200 и 50 соответственно для каждого алгоритма. Общее количество циклов решения ОЗ для каждого алгоритма $N = 100$. Результативное репрезентативное множество допустимых решений Ω каждого алгоритма состоит из 100 лучших решений $\mathbf{x}_j^{best}$, имеющих минимальное значение невязки $f(\mathbf{x})$ среди популяции V_j , полученной в ходе j -го цикла решения ОЗ, где $j = 1, \dots, N$.

В таблице 2 представлены средние значения μ и стандартные отклонения σ параметров разреза при различных комбинациях уровня помехи и типа разреза для каждого алгоритма ЭО.

На рисунке 2 представлено распределение невязок $f(\mathbf{x})$ в зависимости от типа кривой ВЭЗ и уровня помехи, рассчитываемое как:

$$f(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{\rho_{ki}(\mathbf{x})}{\rho_{ki}^{\text{набл}}}\right)^2} \cdot 100, \quad (4)$$

где n – количество разносов, $\rho_{ki}(\mathbf{x})$ – теоретическое значение КС на i -м разносе, $\rho_{ki}^{\text{набл}}$ – «наблюдаемое» (исходное) значение КС на i -м разносе.

Таблица 2

Статистические характеристики параметров геоэлектрического разреза по 100 циклам решения ОЗ ВЭЗ

Уровень помехи, %	Тип разреза	Метод	h_1 , м		h_2 , м		γ_1 , Ом*м		γ_2 , Ом*м		γ_3 , Ом*м	
			μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
2.5	А	ДЭ	4.8	0.1	13.1	0.7	9.9	0.0	98.5	11.5	482.2	1.2
		ГА	4.7	1.4	12.5	6.0	9.6	1.6	143.3	142.8	478.0	20.3
		АГП	5.2	0.2	14.6	1.9	10.1	0.1	138.8	21.5	481.6	7.6
		АССВ	5.2	0.5	14.9	5.8	10.1	0.2	165.5	88.2	482.4	12.3
		МРЧ	5.4	0.6	14.3	5.0	10.3	0.5	187.4	95.6	479.1	16.7
	Н	ДЭ	4.9	0.0	13.1	0.0	100.5	0.0	12.8	0.0	477.3	0.0
		ГА	4.8	0.5	13.3	7.8	100.7	1.4	12.5	6.6	523.2	108.1
		АГП	4.8	0.1	14.5	1.8	100.7	0.9	13.5	1.5	599.5	105.1
		АССВ	4.8	0.2	14.0	3.0	100.6	0.3	13.5	2.8	496.9	29.0
		МРЧ	4.7	0.4	16.0	5.6	100.8	1.6	15.0	4.9	567.4	152.2
10	А	ДЭ	3.9	0.1	16.8	0.3	9.6	0.0	68.4	2.0	424.2	0.9
		ГА	4.5	1.3	17.0	7.2	10.1	1.5	92.9	56.2	415.9	26.0
		АГП	5.0	0.3	22.9	2.0	10.2	0.2	128.3	24.6	430.4	8.2
		АССВ	4.2	0.4	18.2	3.0	9.8	0.2	82.4	21.4	428.2	10.0
		МРЧ	4.8	1.0	17.1	5.7	10.1	0.8	125.2	101.5	417.1	23.4
	Н	ДЭ	4.6	0.0	18.6	0.0	101.7	0.0	16.9	0.0	410.5	0.0
		ГА	5.0	0.4	13.0	7.6	101.0	1.3	11.7	6.2	420.9	101.6
		АГП	4.6	0.1	20.9	2.5	102.0	1.3	17.6	1.7	586.5	119.7
		АССВ	4.7	0.2	17.1	4.0	101.5	0.5	15.5	3.5	412.8	27.5
		МРЧ	4.7	0.4	18.9	6.1	101.2	1.8	16.2	4.8	541.3	149.5

На рис. 3 представлено распределение средних относительных отклонений $\delta(\mathbf{x})$ полученных решений $\mathbf{x}$ от истинных параметров разреза $\mathbf{x}^{\text{ист}}$ в зависимости от типа кривой и уровня помехи. Среднее относительное отклонение вектора $\mathbf{x}$ от истинной модели $\mathbf{x}^{\text{ист}}$ определяется как:

$$\delta(\mathbf{x}) = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - x_i^{\text{ист}}}{x_i^{\text{ист}}} \right|, \quad (5)$$

где n – это размерность задачи, x_i – это значение i -й компоненты вектора $\mathbf{x}$, $x_i^{\text{ист}}$ – это значение i -й компоненты вектора $\mathbf{x}^{\text{ист}}$.

По статистическим характеристикам, представленным в таблице 2, видно, что все алгоритмы достаточно точно определяют параметры первого слоя h_1 , γ_1 при различных комбинациях типа разреза и уровня помехи. При низком уровне помехи наиболее близкие к истине результаты дает метод ДЭ, однако недостатком ДЭ можно считать высокую степень схождения получаемых решений, выраженную в низких значениях стандартного отклонения σ . При увеличении уровня помехи в общем случае наблюдается отдаление

полученных решений от истинной модели по параметрам h_2 , g_2 , g_3 . В такой ситуации при низких значениях σ (когда почти все решения из множества Ω находятся в узких пределах) невозможно добиться близких к истине результатов даже для некоторого подмножества $\Omega_1 \subset \Omega$, учитывая стохастический характер ЭО. С этой точки зрения выигрывают методы ГА и МРЧ, характеризующиеся большим разнообразием получаемых решений.

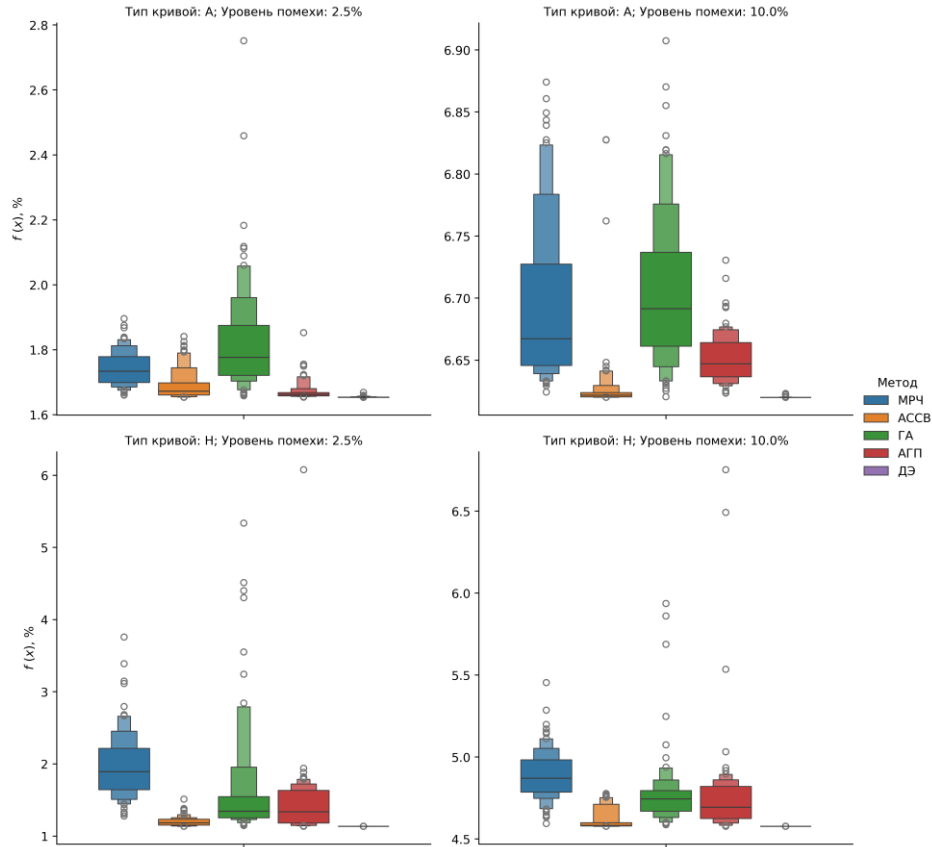


Рис. 2. Распределение невязок в зависимости от типа кривой и уровня помехи

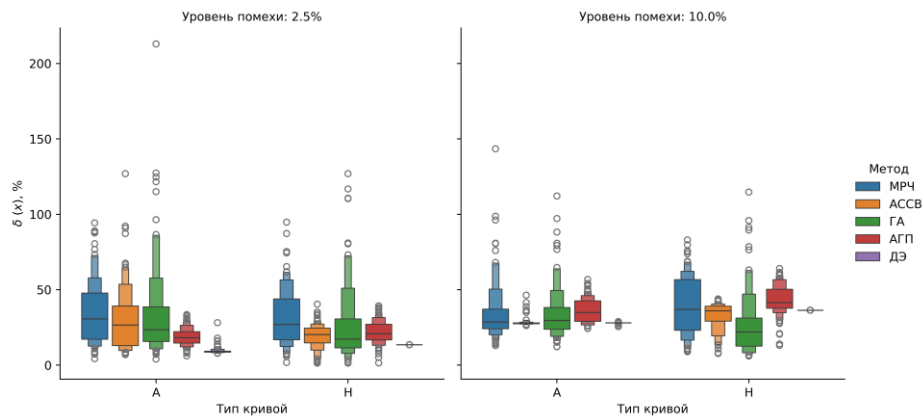


Рис. 3. Распределение средних относительных отклонений решений от истинных параметров разреза в зависимости от типа кривой и уровня помехи

По рисунку 2 видно, что все методы близки друг к другу по значениям невязки $f(x)$, наибольшей дисперсией отличаются методы ГА и МРЧ, минимальной – метод ДЭ.

Рисунок 3 отражает распределение средних относительных отклонений решений от истинных параметров разреза в зависимости от типа кривой и уровня помехи.

Заметно, что при низком уровне помехи и типе разреза А наиболее низкими отклонениями характеризуются методы АГП и ДЭ, а методы МРЧ, ГА и АССВ имеют схожее распределение отклонений. При типе разреза Н наблюдается улучшение результатов методов АССВ и ГА. При высоком уровне помехи отклонения методов АГП и ДЭ резко возрастают, поэтому, на практике использовать эти методы целесообразнее при низком уровне помехи. По медианным значениям отклонений наблюдается сходство между методами АССВ, МРЧ и ГА, однако последний показывает более лучшие результаты при типе разреза Н.

Таким образом, выбор конкретного метода ЭО для решения ОЗ ВЭЗ должен основываться на информации об уровне помех в наблюдаемых данных с учетом типа разреза. Методы АГП и ДЭ характеризуются наибольшей чувствительностью к уровню помех. Стоит отметить, что использование априорных данных в виде оценок параметров распределений μ и σ^2 параметров разреза (для генерации множества решений V) и в виде ограничений на множество допустимых решений D не гарантирует близости получаемых решений x к истинной модели $x^{\text{ист}}$, в связи с чем необходимо включать априорную информацию в функционал $f(x)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петросян Р.Н. Рыжов Н.В. Генетический алгоритм решения обратной задачи электроразведки методом вертикального электрического зондирования // Геофизика. 2024 № 5. С. 48–54.
2. Саймон Дэн. Алгоритмы эволюционной оптимизации / пер. с англ. А. В. Логунова. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 1002 с.: ил.
3. Тайницкий А.А. Решение обратной задачи ВЭЗ методом дифференциальной эволюции // Горное эхо. Пермь: УрО РАН. 2021. № 3. С. 55-59.
4. S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Lewis, Grey Wolf Optimizer, Advances in Engineering Software, vol. 69, pp. 46-61, 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE NOISE IMMUNITY OF EVOLUTIONARY ALGORITHMS IN SOLVING THE INVERSE PROBLEM OF VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING

Ryzhov Nikita
ООО «ПК и БЗ», Пермь

Summary. An analysis of vertical electrical sounding results using evolutionary optimization under varying noise levels and section types showed that method selection should consider noise levels and section characteristics.

Key words: electrical prospecting, vertical electrical sounding, inverse problem, evolutionary optimization, noise.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рыжов Никита Валерьевич

ryzhov@antikarst.ru

ООО «ПК и БЗ», ведущий инженер

Научный руководитель: Долгаль Александр Сергеевич, профессор, д.ф.-м.н.

УДК 550.312

АНАЛИЗ ГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ МОДЕЛЕЙ АСТРОБЛЕМ

*Ситникова Екатерина Алексеевна
МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

Аннотация. В работе представлены расчёты и анализ гравитационных полей 4 типов астроблем. Отмечены характерные особенности аномалий, необходимые для дальнейшей классификации и интерпретации геопотенциальных полей.

Ключевые слова: гравитационное поле, астроблема, прямая задача.

С современным развитием технологий задача изучения строения Луны и Марса остаётся актуальной и на сегодняшний день. При этом их геофизическая изученность остаётся слабой, а единственным полем, информация о котором представлена на всю площадь Луны или Марса является гравитационное. Таким образом, анализ моделей гравитационных полей небесных тел является одним из основных источников знаний об их внутреннем геологическом строении и их эволюции. В рельефе Луны и Марса широко проявлены следы метеоритной бомбардировки в виде кольцевых структур, называемых астроблемами. На Земле также обнаружено немало подобных объектов, однако на космических снимках их проявлено гораздо меньше. Это объясняется влиянием на формирование земной коры и рельефа различных эрозионных, геологических и тектонических процессов, в результате которых астроблемы подверглись преобразованию. При этом за счёт изменения плотности при импактном событии они могут быть проявлены в аномалиях силы тяжести.

Гравитационные поля Луны и Марса сильно осложнены изометричными аномалиями, природа которых может быть связана с астроблемами. Стоит отметить, что их размеры составляют от первых десятков до сотен километров [1]. Для анализа поля, с целью изучения глубинного строения небесных тел, необходимо разработать подходы, позволяющие исключить из гравитационного поля эффекты астроблем.

Существуют различные классификации по форме ударных кратеров. В данной работе мы используем классификацию, представленную в статье Белюстовых [1]. В ней выделяются: 1) астроблемы простой чашеобразной формы со сравнительно небольшим диаметром (до 3 – 4 км), 2) астроблемы, характеризующиеся более горизонтальной формой и усложнённой структурой - в центре кратера появляется поднятие, возникающее благодаря высокой упругой отдаче пород мишени, 3) астроблемы, у которых выделяются, помимо центрального, кольцевые поднятия (при диаметре более 14 – 15 км).

В ходе данной работы на основе выбранной классификации из работы [1] созданы 4 концептуальных блоковых модели астроблем (рис. 1б, в, г, д). Каркас моделей получен по изображениям астроблем, представленных в работе Белюстовых [1] и представляет собой совокупность блоков, которые отвечают центральному поднятию, слою с брекчиями, слою осадочных пород и др. (рис. 1а). Далее каждому блоку задана постоянная плотность, значения которых взяты на основании данных о строении Карской астроблемы [2]. Выбор обусловлен достаточно хорошей изученностью данного объекта, а также её размерами – Карская астроблема является одной из крупнейших найденных на Земле структур метеоритного происхождения.

На рисунке 1 представлены 4 плотностные модели астроблем (рис. 1б, в, г, д). Модель 1 имеет простую чашеобразную форму, заполненную брекчиевидным материалом. Модель 2 характеризуется центральным поднятием. Её особенностью является то, что поднятие погребено под слоем осадочных пород. Модели 3, 4 имеют более сложное

строение – они характеризуются наличием центрального поднятия, отдельно выделенного плотностного слоя подкратерной трещиноватости, а также наличием таких образований, как импактиты. Модель 4 осложнена также кольцевыми поднятиями.

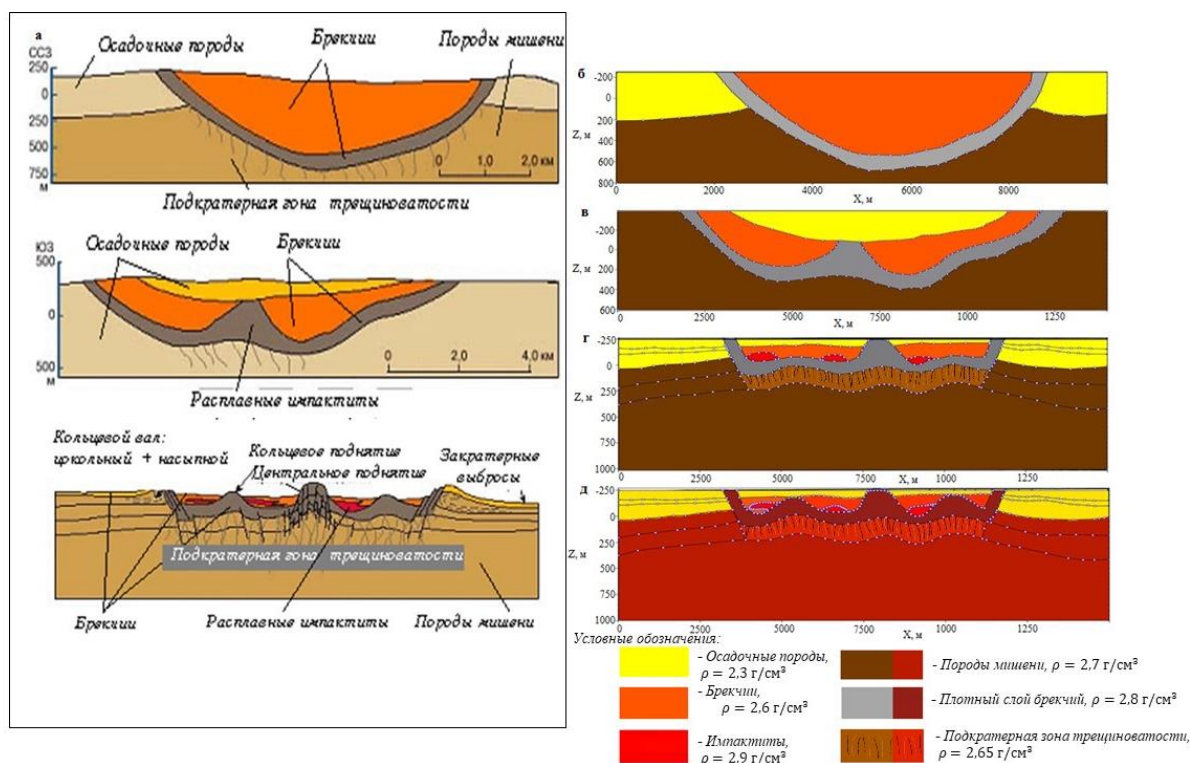


Рис. 1. Строение астроблем: а – строение метеоритных кратеров из работы [1], на основе которых были созданы 4 концептуальные модели астроблем; б – плотностная модель 1, в – плотностная модель 2, г – плотностная модель 3, д – плотностная модель 4

Для расчёта гравитационных эффектов моделей использовалось ПО GravMagInv [3]. На первом этапе выполнен расчёт и анализ полей двумерных моделей. При этом важно отметить, что астроблемы имеют изометричную форму и для итоговых выводов необходимо составить объёмные плотностные модели.

В двумерных моделях блоки описаны многоугольниками с постоянной плотностью (рис. 1б). Подход к расчету гравитационного эффекта таких фигур описан в работах [4, 5]. На рисунке приведены эффекты двумерных моделей астроблем, описывающих различные типы (рис. 2).

Из графиков (рис. 2) видно, что амплитуды аномалий всех моделей сопоставимы и составляют порядка 5 мГал. Также на основании графиков можно сделать вывод, что общее тело астроблем проявляется в виде положительной аномалии силы тяжести, которая приурочена к слою плотных пород, отражающих ударный фронт. В случае наличия перекрывающего осадочного чехла, плотность которого меньше плотности вмещающих пород, может наблюдаться отрицательная локальная аномалия (рис. 2. б). Для моделей 2, 3, 4 в поле проявлено центральное поднятие положительной аномалией, амплитудой порядка 2 мГал (рис. 2б, в, г). В поле модели 4 проявлены положительные аномалии от кольцевых поднятий (рис. 2г).

Как отмечалось выше, астроблемы являются изометричными структурами и для корректного анализа их полей необходимо составить объёмные модели. Такие трёхмерные модели получены путём симметричного разделения двумерных моделей пополам и последующего вращения получившихся вокруг вертикальной оси, выполненного в ПО

GravMagInv3D [3]. Схема создания объёмных моделей приведена на рисунке 3. Полученные объёмные модели представляют собой трёхмерную сетку прямоугольных ячеек с постоянной плотностью.

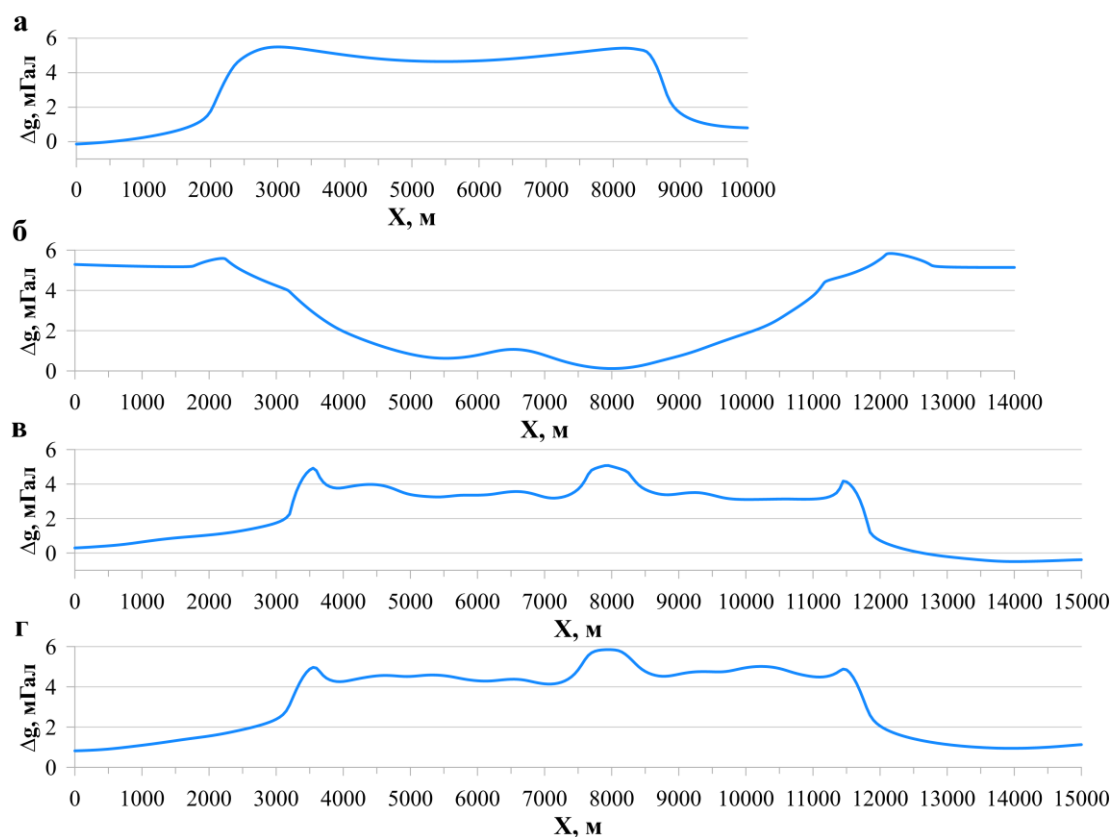


Рис. 2. Гравитационные эффекты двухмерных моделей астроблем различных типов: а – Модель 1, б – Модель 2, в – Модель 3, г – Модель 4

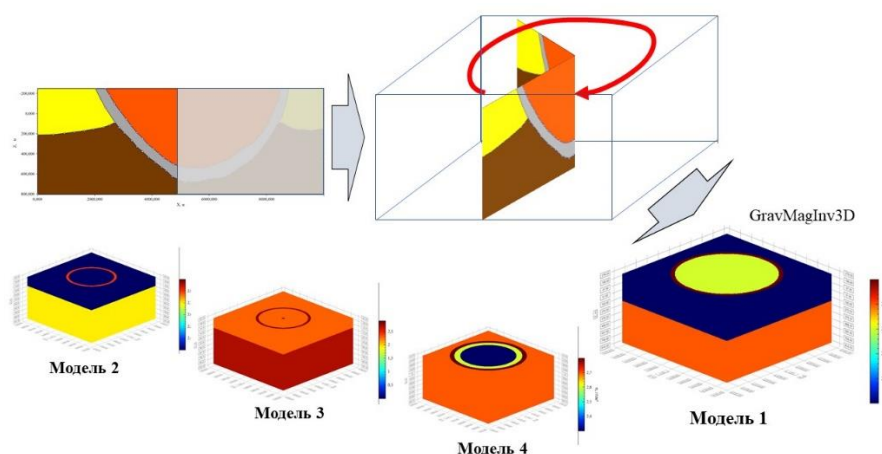


Рис. 3. Схема создания трёхмерных моделей астроблем

На рисунке приведены площадные поля моделей астроблем, рассчитанные с использованием ПО GravMagInv3D [3] (рис. 4).

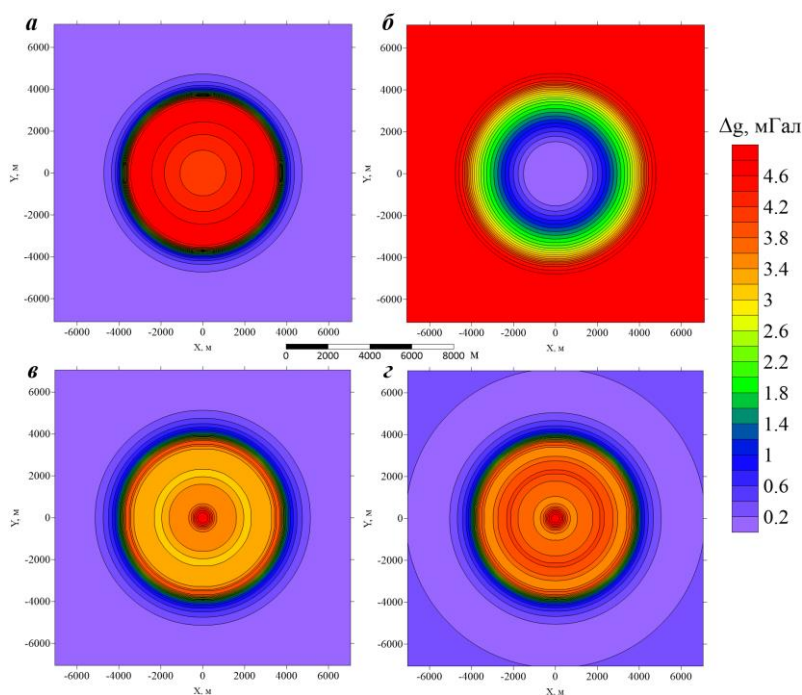


Рис. 4. Гравитационные эффекты трёхмерных моделей астроблем различных типов: а – Модель 1; б – Модель 2; в – Модель 3, г – Модель 4

Анализируя рисунок 4 видно, что амплитуды аномалий всех моделей сопоставимы и составляют порядка 4.8 мГал, что сопоставимо со значениями полей двухмерных моделей.

На площадных полях видно, что кольцевые структуры астроблем проявляются зонами с различными горизонтальными градиентами гравитационного поля. Для моделей 1, 3 и 4 в областях, где плотные породы (слой плотных брекчий) расположены у дневной поверхности, изолинии поля сгущаются (рис. 3 а, в, г). Также на моделях 3 и 4 в областях, приуроченных к центральным поднятиям, изолинии также сгущаются (рис. 3в, г). То же можно сказать про кольцевые поднятия для модели 4, однако в этом случае градиент выражен слабее (рис. 3г). Стоит отметить, что на модели 2 центральное поднятие, перекрытое осадочным чехлом, не проявляется (рис. 2б).

Таким образом, на основе 4 концептуальных моделей астроблем построены их плотностные модели, рассчитаны и проанализированы их гравитационные эффекты. Показано, что астроблемы в гравитационном поле проявляются в виде ярко выраженных изометричных аномалий с различными областями градиентов поля, отражающих особенности их внутреннего строения: наличие центрального или кольцевых поднятий, слой брекчий повышенной плотности, описывающий фронт ударной волны.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Междисциплинарных научно-образовательных школ Московского университета в рамках Соглашения № 23-Ш01-13.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белюстов В.Н., Белюстова И.В. Астроблемы – звёздные раны Земли, Журнал «Физика» 1999.
2. Зархидзе Д.В., Пискун П.П., Красножен А.С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Вайгачско-

- Пайхойская. Листы R-41-XXVIII, XXIX (Усть-Кара). Объяснительная записка. – М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2017. 180 с.
3. Чепиго Л.С. Свидетельство о регистрации прав на ПО GravMagInv № 2022610137. 10 января 2022.
 4. Страхов В.Н., Лапина М.И., Шубникова М.П. Решение прямых двумерных задач гравиметрии и магнитометрии для многоугольников с полиномиальной плотностью и намагниченностью на основе комбинированных алгоритмов // Решение прямой и обратной задач гравиметрии и магнитометрии (вопросы теории и методики). М.: Наука, 1985. С. 102–190.
 5. Булычев А.А., Лыгин И.В., Соколова Т.Б., Кузнецов, К.М. Прямая задача гравиразведки и магниторазведки (конспект лекций). Учебное пособие. М.: Университетская книга. 2019. 176 с.

GRAVITY EFFECTS OF ASTROBLEME MODELS ANALYSIS

Sitnikova Ekaterina
MSU, Moscow

Summary. The article presents calculations and analysis of gravity fields of 4 types of astroblemes. The characteristic features of the anomalies are noted, what is necessary for further classification and interpretation of geopotential fields.

Key words: gravity field, astrobleme, direct problem.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ситникова Екатерина Алексеевна

ketrinsi@inbox.ru

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, геофизик

Научный руководитель: Кузнецов Кирилл Михайлович, к.т.н.

УДК 553.411

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУХОЙ ЛОГ (ПАТОМСКОЕ НАГОРЬЕ)

*Слоквенко Владимир Валерьевич
НИ ТПУ, г. Томск*

Аннотация. Приведена краткая геологическая характеристика месторождения Сухой Лог. Описана структура геофизических полей. Приведена краткая интерпретация аномалий различной природы на месторождении.

Ключевые слова: структура геофизических полей, петрофизические неоднородности, углеродистые толщи, наложенная минерализация

Геологическая характеристика месторождения Сухой Лог

Месторождение Сухой Лог входит в состав Кропоткинского рудного узла Бодайбинского (ранее Ленского) золоторудного района. Бодайбинский район в геотектоническом отношении приурочен к структуре первого порядка – Бодайбинскому синклинию в составе Байкало-Патомской складчатой области.

Стратиграфические подразделения на территории месторождения представлены имняхской и хомолхинской свитами дальнетайгинской серии и аунакитской свитой жуинской серии. Рудовмещающей является хомолхинская свита, перекрывающей – имняхская, отложения аунакитской свиты распространены незначительно. Имняхская свита разделена на 2 подсвиты: нижняя (im1) и верхняя (im2). Im1 представлена карбонатно-терригенными породами, im2 представлена карбонатами с тонкими прослоями сланцев. Хомолхинская свита разделена на три подсвиты: верхняя (hm3), к которой приурочено оруденение, средняя (hm2) и нижняя (hm1). Hm3 и hm1 представлены от темно-серых до черных тонкослоистыми метаалевролитами и углеродистыми сланцами. Hm2 представлена серыми известняками с прослоями алевролитов и является подстилающей. Аунакитская свита (au1), представлена чередованием тонких слоев серых кварцевых песчаников, углеродистых алевролитов и сланцев [1]. Породы регионально метаморфизованы в хлорит-серицитовую субфации фации зеленых сланцев.

Интрузивные образования вблизи месторождения представлены единственным Константиновским гранитоидным массивом, расположенным в 6 км юго-западнее месторождения. Массив расположен в краевой южной части Угаханского минимума, выделяемого в гравитационном поле двухсоттысячного масштаба. Данный минимум образован одноименным интрузивным телом (Угаханским плутоном) [3]. Геохронологические исследования циркона [5] гласят о верхнекаменноугольном возрасте массива (303 ± 3 млн лет). Месторождение приурочено к краевой юго-восточной части Угаханского плутона.

Основной структурой месторождения является сухоложская антиклиналь – положительная пликативная структура 3 порядка, асимметричная и опрокинутая на юг, характеризующаяся значительной степенью тектонической переработки. Месторождение приурочено к области ее периклинального замыкания, основное рудное тело локализовано в области пересечения шарнира с осевой плоскостью складки. Осевая плоскость складки осложнена зоной смятия, которой свойственны кливаж, сланцеватость, будинаж-структуры и мелкая складчатость. Антиклиналь пересекается субмеридиональной зоной трещиноватости, расположенная в пределах зоны разрывных нарушений над скрытым разломом фундамента. Вдоль всей минерализованной зоны выделяется система секущих осевую плоскость диагональных разломов. На месторождении проявлен

отчетливый структурный контроль оруденения. Он заключается в развитии наиболее интенсивно проявленной кварц-карбонатно-золотосульфидной минерализации в области пересечения зоны смятия, ориентированной вдоль осевой плоскости антиклинали, и субмеридиональной зоны разрывных нарушений.

Одной из важных характерных особенностей локализации золотого оруденения на месторождении является его приуроченность к метасоматизированным породам. При анализе взаимоотношений метасоматических минеральных ассоциаций было выделено два этапа березетоидного метасоматизма: натриевой и калиевой направленности [4]. Первый этап, наложенный на регионально-метаморфизованные породы, происходил с образованием натриевых слюд (преимущественно парагонит) и магнезиально-железистых карбонатов. Второй этап накладывался на первый, что выразилось как в полном замещении натриевых слюд мусковитом, так и в формировании их ассоциаций. Помимо слюд также образовывались магнезиально-железистые карбонаты и кварц-сульфидная золотоносная минерализация. Оруденение связано с проявлениями кварц-карбонат-сульфидной наложенной минерализации в форме жил, прожилков и вкрапленников. Ее формирование происходило в два этапа [2]. Первый этап, в который сформировалась прожилково-вкрапленная кварц-сульфидная минерализация, датируется 447 ± 6 млн лет. Во второй этап, датируемый 321 ± 14 млн лет, сформировались золотоносные кварцевые жилы.

Описание и структура геофизических полей месторождения Сухой Лог

Исходные регионально метаморфизованные породы хомолхинской и имняхской свит слабо дифференцированы по плотности от 2.68 до 2.7 г/см³ [3]. В аномальном поле силы тяжести им соответствуют фоновые значения (-0.1; +0.1 мГл).

В центральной части месторождения наблюдается положительная аномалия неправильной формы, вытянутая в субширотном направлении, экстремумы которой тяготеют к выходу осевой части антиклинали, с наиболее интенсивной сульфидной минерализацией, на дневную поверхность. Снижение аномальных значений Δg в северном направлении согласуется с пологим погружением минерализованной зоны под отложения имняхской свиты. Восточнее центральной интенсивной положительной аномалии располагается отрицательная аномалия средних амплитуд, экстремумы которой также контролируются осевой плоскостью складки. Аномалии тесно сопряжены друг с другом. Отрицательная аномалия охватывает в большей мере нижние горизонты верхней подсвиты хомолхинской свиты и проявлена ближе к ядерной части антиклинали. Положительная аномалия огибает отрицательную аномалию со стороны верхних горизонтов (с фронтальной стороны) и большей своей частью смещена в замковую часть Сухоложской антиклинали на уровне верхней подсвиты хомолхинской свиты. Целостность отрицательной аномалии нарушается присутствием очень локальной изометричной положительной аномалии относительно высоких амплитуд. На юге рассматриваемого участка наблюдается интенсивная отрицательная аномалия, простирающаяся вдоль практически всей его южной границы. Она является крайним северным фрагментом крупного гравитационного минимума, создаваемого Константиновским гранитным массивом, в той его части, где он не выходит на дневную поверхность, а скрыт под осадочными отложениями.

Форма гравитационных аномалий согласуется со структурой сухоложской антиклинали, углы между изолиниями аномалий и границами стратиграфических подразделений, слагающих складку, выдержаны. Замковой части антиклинали свойственны положительные приращения Δg , ядерной части – отрицательные приращения. Наблюдаются нарушения структуры гравитационного поля вдоль систем субмеридиональных разломов, что выражается в значительном изменении углов между изолиниями аномалий и границами стратиграфических подразделений. Можно выделить две основных зоны с

нарушенной структурой. Первая зона приурочена к области пересечения осевой плоскости складки и системы субмеридиональных разрывных нарушений и связана с областью концентрации интенсивной сульфидной минерализации. Вторая зона приурочена к южному гравитационному минимуму.

Структура магнитных аномалий не имеет четкой согласованности со структурой сухоложской антиклинали и подчиняется региональному фону. Наиболее магнитной является южная часть месторождения, где распространены отложения аунакитской свиты, которым в региональном масштабе свойственны выдержанные средние положительные значения напряженности магнитного поля порядка 50 гамм. В этой же области региональный фон дополнительно осложняется присутствием аномалий, приуроченных к гравитационному минимуму, создаваемому Константиновским массивом. В центральной части месторождения выделяется небольшая группа субизометричных локальных отрицательных аномалий величиной от -20 до -30 гамм, тяготеющая к осевой плоскости антиклинали, к зоне с наиболее интенсивной сульфидной минерализацией. Аналогично гравитационному полю, вдоль систем субмеридиональных нарушений наблюдаются нарушения структуры магнитного поля, выраженные в резком изменении углов изолиний.

Формирование аномалий естественного потенциала регионального масштаба в Бодайбинском прогибе обусловлено повышенным содержанием углеродистого вещества, представленного графитом, антраксолитом и углистым веществом, в осадочных породах. На территории месторождения Сухой Лог проявлена зональность величин естественного электрического поля, выраженная в их постепенном уменьшении в направлении с юга на север. Не наблюдается привязки величин естественного поля к стратиграфическим подразделениям. В ядерной части антиклинали локализована интенсивная отрицательная аномалия с амплитудами от 800 до 1000 мВ, приуроченная к третьей подсвите хомолхинской свиты и явно выделяющаяся на фоне затухающей с юга на север отрицательной аномалии. По своей форме эта аномалия хорошо согласуется со структурой сухоложской антиклинали, ее изолинии конформны границам отложений верхней подсвиты хомолхинской свиты. Амплитуда аномалии значительно снижается по мере приближения к замку складки, где значения естественного поля достигают 200-300 мВ и начинают соответствовать значениям фоновой затухающей аномалии. Непосредственно вблизи замка выделяется линейная субширотная отрицательная аномалия со значениями порядка 500 мВ.

Распределение кажущегося сопротивления на территории месторождения Сухой лог неоднородно и осложнено повсеместным присутствием аллювиальных отложений. Имняхская и аунакитская свиты слабо дифференцированы по сопротивлению. Им преимущественно свойственны значения порядка 2000 Ом. В местах скопления аллювиальных отложений сопротивление уменьшается до 500 Ом. В области выхода отложений верхней подсвиты имняхской свиты в северо-западной части месторождения наблюдаются локальные ореолы повышенных, до 5000 Ом сопротивлений.

Высокой степенью петроэлектрической неоднородности характеризуются отложения хомолхинской свиты. В центральной части месторождения, на границе с известняками имняхской свиты, выделяется аномалия повышенных, до 20000 Ом, сопротивлений, тяготеющая к осевой плоскости складки. По своей форме и ареалу распространения данная аномалия совпадает с положительной аномалией гравитационного поля в центральной части месторождения. Южнее данной аномалии располагается область аномально низких сопротивлений, тяготеющая к замковой части антиклинали. Она имеет вытянутую, линейную форму и практически субширотное простирание. Значения кажущихся сопротивлений составляют порядка 500 Ом. По форме и ареалу распространения соответствует интенсивной отрицательной аномалии естественного потенциала. К ядерной части антиклинали тяготеет область аномально низких, до 100 Ом, удельных

сопротивлений. По форме внешнего контура и ареалу распространения данная аномальная область аналогична аномалии естественных потенциалов, но ее структуру осложняет область повышенных сопротивлений, входящая с западного направления и совпадающая по форме с отрицательной аномалией гравитационного поля. Вдоль южной границы контакта имняхской и хомолхинской свит выделяется линейная область повышенных сопротивлений.

Структура аномального поля удельных сопротивлений, если отбросить влияние аллювиальных отложений, имеет четкую корреляцию со стратиграфическими подразделениями и согласуется со структурой сухоложской антиклинали. Изолинии большинства аномалий, за исключением аномалии, приуроченной к осевой плоскости складки, конформны границам распространения осадочных отложений.

Отложения верхней подсвиты хомолхинской свиты характеризуются довольно высокой степенью однородности содержания калия. Им свойственны повышенные содержания, в среднем от 2 до 2.3 %. Вблизи замковой части складки и восточнее, вблизи выхода второй пачки данной свиты, выделяются ореолы с содержанием от 2.7 до 3 %. Область вблизи восточного контакта имняхской и хомолхинской свит обеднена калием, его концентрация в этой области снижается вплоть до 1.3 %. Отложения имняхской свиты характеризуются средним содержанием калия до 1%. Тем не менее, выделяется несколько ореолов повышения его концентрации. Первый ореол приурочен к границе контакта с отложениями хомолхинской свиты и характеризуется повышением концентраций до 3%. Второй ореол расположен южнее отложений хомолхинской свиты и характеризуется повышением концентраций до 2.5 %. Все ореолы повышенной концентрации калия, как в отложениях хомолхинской свиты, так и в отложениях имняхской свиты, контролируются разрывной тектоникой.

Выводы

Формирование петрофизических неоднородностей месторождения Сухой Лог проходило в несколько этапов. Первый этап отчетливо прослеживается при анализе структуры гравитационного и электрического полей. Согласованность морфологии петроплотностных и петроэлектрических аномалий, а также интенсивной аномалии естественного поля, приуроченной к ядерной части складки, со структурой сухоложской антиклинали, предположительно, свидетельствует об их формировании одновременно или незначительно позже этапа линейного складкообразования. Вероятнее всего, в связи с динамометаморфизмом, в данный этап были проявлены процессы перераспределения вещества, что выразилось как в петроплотностной дифференциации, так и в концентрации поляризуемого углеродистого вещества.

В последующие, уже рудные, этапы, связанные с метасоматическими процессами, происходило изменение изначальной структуры аномальных полей, что выражается в нарушении конформности изолиний и границ стратиграфических подразделений. Области нарушения структуры полей контролируются субмеридиональными разломами. К этим же разломам приурочены области наибольшей концентрации калия. Нарушение поляризуемости пород хомолхинской свиты в области присутствия интенсивной разрывной тектоники и сохранение ее в ядерной части, где разрывная тектоника отсутствует, вероятнее всего также связано с наложенными процессами, происходившими в рудный этап.

Основная рудная залежь характеризуется интенсивными положительными значениями приращения силы тяжести, высокими сопротивлениями и наличием локальных субизометричных магнитных аномалий. Повышенное сопротивление, предположительно, обусловлено наложенными процессами карбонатизации. Магнитные аномалии, предположительно, обусловлены переходом немагнитных форм сульфидов в магнитные в связи с тепловым воздействием, сопровождавшим рудные процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вуд Б.Л., Попов Н.П. Гигантское месторождение золота Сухой Лог (Сибирь) // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 3. С. 315–341.
2. Новые данные об условиях рудоотложения и составе рудообразующих флюидов золото-платинового месторождения Сухой Лог / Лаверов Н.П. [и др.] // Доклады РАН. 2000. Т. 371. № 1. С. 88–92.
3. Лишневский Э.Н., Дистлер В.В. Глубинное строение земной коры района золото-платинового месторождения Сухой Лог по геолого-геофизическим данным (Восточная Сибирь, Россия) // Геология руд. Месторождений. 2004. Т. 46. № 1. С. 88–104.
4. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе / Русинов В.Л. [и др.] // Геология руд. Месторождений. 2008. Т. 50. № 1. С. 3–46.
5. Результаты исследования циркона (SIMS) из гранитоидов Константиновского штока (район золоторудного месторождения Сухой Лог): возраст, источники и геологические следствия / Рыцк Е.Ю. [и др.] // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 2. С. 169–175.

GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SUKHOY LOG GOLD DEPOSIT (PATOM HIGHLANDS)

Vladimir Slokvenko
NR TPU, Tomsk

Summary. Brief geological characteristics of the Sukhoi Log deposit are given. The structure of geophysical fields is described. A brief interpretation of anomalies of different nature of the deposit is given.

Keywords: geophysical field structure, petrophysical heterogeneities, carbonaceous strata, superimposed mineralization

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Слоквенко Владимир Валерьевич

Vvs120@tpu.ru

НИ ТПУ, г. Томск, ассистент отделения геологии

Научный руководитель: Колмаков Юрий Викторович, д.г.-м.н.

УДК 550.382.3

**ПЕТРОМАГНИТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД КУРСКОГО
МЕГАБЛОКА ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
МАССИВА**

*Сотников Антон Александрович, Жидких Ольга Сергеевна
ФГБОУ ВО ВГУ, г. Воронеж*

Аннотация. В статье рассматривается методика анализа и обобщения петромагнитных характеристик структурно-вещественных геологических образований Курского мегаблока Воронежского кристаллического массива. Целью исследований является создание петромагнитной карты региона. Для достижения точных результатов исследования необходимо принимать во внимание разнообразие типов пород в каждом конкретном комплексе. В качестве примера приводится оценка медианной магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности для пород грабен-синклиналей Курского мегаблока.

Ключевые слова: магнитная восприимчивость, остаточная намагниченность, статистический анализ, Воронежский кристаллический массив.

Курский мегаблок является частью Воронежского кристаллического массива (ВКМ), на территории которого расположены крупные рудные месторождения, приуроченные к палеопротерозойским синформам. Несмотря на значительный объем геолого-геофизической информации, данных бурения, многие вопросы, касающиеся глубинного строения Курского мегаблока, остаются дискуссионными, например, природа региональной Курской магнитной аномалии (КМА), а именно отсутствие закономерности между намагниченностью железистых кварцитов и размеров, и интенсивности КМА. Частично ответ на этот вопрос может быть получен при решении прямой задачи от модели среды [1, 3], в которой пласты железистых кварцитов аппроксимируются ограниченными по простиранию горизонтальными цилиндрами, а магнитные свойства аномальных тел и вмещающих пород соответствуют априорным петрофизическим данным. Решение такой задачи возможно благодаря наличию цифровой пространственной базы петрофизических данных ВКМ, в которой собраны сведения о магнитной восприимчивости (82000 результатов измерений), остаточной намагниченности (36000 результатов измерений) пород керна более 500 скважин, пробуренных на территории ВКМ [2, 5].

На первом этапе исследования необходимо сформировать петромагнитную карту региона, позволяющую обобщить данные о магнитных свойствах пород. При этом используется методика анализа петрофизической информации, опробованная при создании петроплотностной карты [6-7], с учетом таких особенностей петромагнитных параметров как широкий диапазон значений и контрастность магнитных свойств в пределах одного структурно-вещественного комплекса (СВК).

На первом этапе был выполнен расчет статистических характеристик отдельных литологических типов пород, входящих в СВК. Для получения одной характеристики для каждого типа было использовано значение медианы. Интервальное деление происходило при помощи логарифмической шкалы. В итоге все СВК были разделены на 3 типа: слабоконтрастные – значения магнитных параметров различных пород в рамках одного СВК находятся в пределах одного интервала; контрастные – магнитные свойства пород находятся в пределах двух смежных интервалов, т.е. различия не превышают

одного порядка; сильноконтрастные – магнитные параметры пород различаются на два и более порядка.

Важно отметить, что для первого типа, значение медианы, полученное для всей совокупности данных, является единым петрофизическим параметром, что касается 2-го и 3-го типов, для того, чтобы получить корректное значение необходимо привлечь дополнительную информацию о количественном соотношении пород в составе одного СВК с целью расчета соответствующих весовых коэффициентов [4, 6].

Контрастность магнитных свойств в пределах одного СВК обусловлена присутствием в них железистых кварцитов. Как показывают результаты статистического анализа, магнитные свойства железистых кварцитов, локализованных в пределах различных грабен-синклиналей Курского мегаблока (рис.1), могут существенно отличаться.

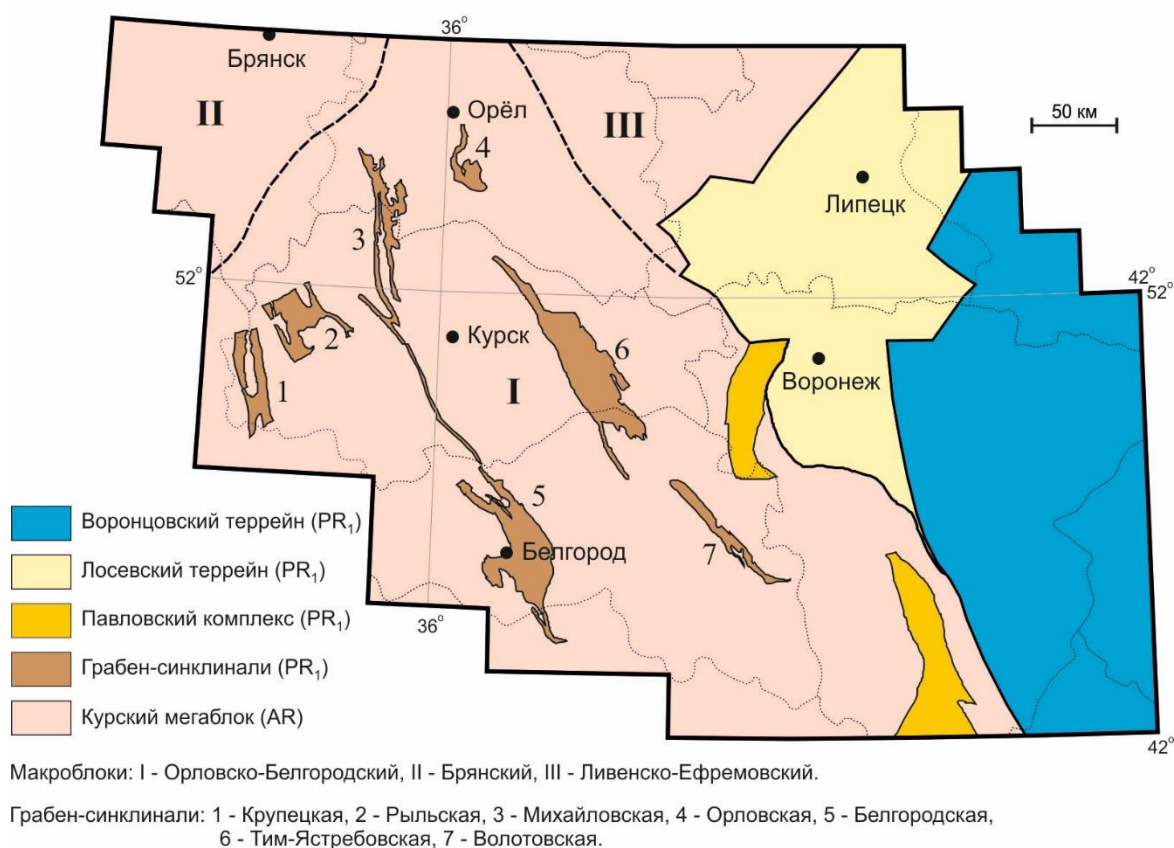


Рис. 1. Тектоническая схема фундамента ВКМ (по Савко К.А.) [8]

На рисунках 2 и 3. представлены графики медианных значений магнитных параметров железистых кварцитов, расположенных в пределах грабен-синклиналей Курского мегаблока.

На настоящем этапе определены обобщенные значения магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности для всех СВК Курского мегаблока. Полученные данные будут присвоены соответствующим полигонам на геологической карте. Работа выполняется в программе ArcView GIS.

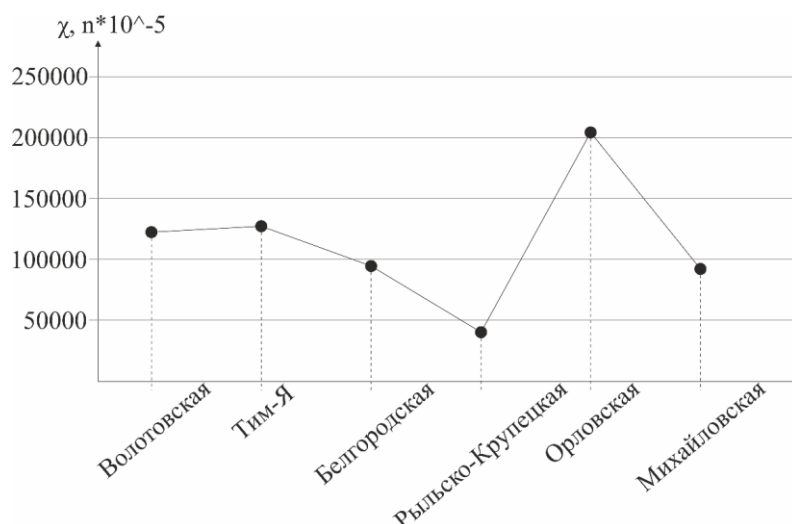


Рис. 2. Медианные значения магнитной восприимчивости ($(N \cdot 10^{-5})$ Ед. Си) железорудных структур Курского мегаблока ВКМ

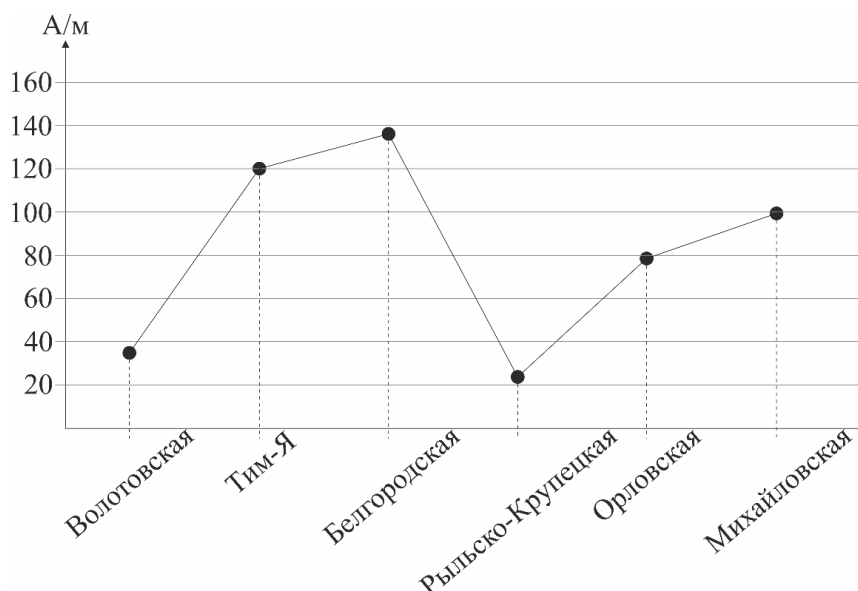


Рис. 3. Медианное значение остаточной намагниченности (A/м) железорудных структур Курского мегаблока ВКМ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 23-27-00251.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронова Т.А., Муравина О.М., Глазнев В.Н., Березнева С.И. Трёхмерная плотностная модель верхней коры в области сочленения Лосевского и Донского террейнов (Воронежский кристаллический массив // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2021. Вып. 49. С. 24-35.
2. Глазнев В.Н., Муравина О.М., Жаворонкин В.И. и др. Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива // Воронеж: Научная книга, 2020. 101 с.
3. Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М. Плотностное моделирование центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2016. Вып. 29. С. 53-63.

4. Муравина О.М., Давудова Э.И., Пономаренко И.А. Формирование петрофизических моделей и их использование при интерпретации геофизических полей // Материалы IXX Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2018. С. 242-245.
5. Муравина О.М., Жаворонкин В.И., Глазнев В.Н. Пространственный анализ распределения плотности докембрийских образований Воронежского кристаллического массива // Материалы XV Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2014. С. 171-173.
6. Муравина О.М., Овечкина А. С., Сотников А. А. Оценка достоверности петроплотностной и петромагнитных карт Воронцовского терррейна Воронежского кристаллического массива // Материалы XXIII Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2022. С. 212-215.
7. Муравина О.М., Жидких О.С., Сотников А. А. Опыт обобщения петрофизических данных при создании петромагнитной карты Воронежского кристаллического массива // Материалы XXIII Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». М.: ИФЗ РАН. 2023. С. 195-198.
8. Savko K.A., Samsonov A.V., Salnikova E.B. et al. Paleoproterozoic alkaline-carbonatite magmatism in the convergent tectonic setting: Evidences from 2.07 Ga Dubravinsky complex in the Eastern Sarmatia // Precambrian Research. Volume 395, 1 September 2023, 107153. doi.org/10.1016.

PETROMAGNETIC CHARACTERISTICS OF ROCKS OF THE KURSK MEGABLOCK OF THE VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF

*Sotnikov Anton Alexandrovich, Zhidkikh Olga Sergeevna
VSU, Voronezh*

Summary. The article discusses a methodology for analyzing and generalizing the petromagnetic characteristics of structural and material geological formations of the Kursk megablock of the Voronezh Crystalline massif. The purpose of the research is to create a petromagnetic map of the region. To achieve accurate research results, it is necessary to take into account the variety of rock types in each particular complex. The median magnetic susceptibility and residual magnetization for graben-syncline rocks of the Kursk megablock are estimated as an example.

Key words: magnetic susceptibility, residual magnetization, statistical analysis, Voronezh Crystal array.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Сотников Антон Александрович

Anton.sotnikov.01@mail.ru

ФГБОУ ВО ВГУ, г. Воронеж, магистрант 2 курса

Жидких Ольга Сергеевна

Olga.z2003@mail.ru

ФГБОУ ВО ВГУ, г. Воронеж, магистрант 1 курса

Научный руководитель: Муравина Ольга Михайловна, д.т.н.

УДК 550.837.76

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПО ПОИСКУ ПУСТОТ ПОД АСФАЛЬТОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

*Терещенко Ксения Валерьевна, Беляева Виктория Александровна,
Мартинович Юлия Витальевна, Раецкая Ольга Сергеевна
Центр геофизического мониторинга Национальной академии наук Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В статье представлены материалы георадарных работ по поиску пустот и зон размытия грунта под асфальтовым покрытием. Были проведены исследования разрушений асфальтового покрытия, в результате которого выявлено множество объектов и неоднородностей на разной глубине, включая возможные пустоты, эрозию почвы и трещины. Результаты визуализированы в виде георадарных профилей исследуемой среды.

Ключевые слова: георадар Zond-12e, диэлектрическая проницаемость, размыв грунта, оси синфазности, провал в асфальтовом покрытии.

Метод георадиолокации предполагает излучение импульсов высокочастотных (мега- и гигагерцового диапазона) электромагнитных волн и регистрацию сигналов, отраженных от границы раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью. Георадар – прибор для малоглубинной геофизической разведки, позволяющий определять электромагнитные свойства геологических пород и других материалов по их диэлектрической проницаемости. Используется для детальных исследований в верхних 3-10 метрах разреза. Результатом георадарной съемки является профиль, представляющий собой массив амплитуд, отражённых и дифрагированных, записанный в файл и визуализируемый в виде временного или вертикального разрезов исследуемой среды [1].

Георадарная съемка производилась с использованием аппаратуры «Zond-12e» (Radar Systems, Inc., Латвия). Частота антенных блоков для съемки профилей выбираются исходя из условий съемки и целей. На глубину зондирования влияет не только качество исследуемой поверхности, но и тип грунта/материала в толще и его водонасыщенность.

Обнаружение объектов зависит от размера и от материала объектов (диэлектрическая проницаемость). Эффективные значения диэлектрической проницаемости лежат в пределах 4-25 для широкого набора ситуаций в приповерхностной части разреза, включая водонасыщенность пород. Интерпретация объектов в грунтовой толще возможна при отличии диэлектрической проницаемости грунта и объекта, чем больше разница, тем выше точность.

В данной работе использовались экранированные антенны 500 МГц и 100 МГц. Разрешающая способность для антенны 500 МГц – 0.5 м, глубина проникновения сигнала (при благоприятном грунте) 7-10 метров, разрешающая способность для антенны 100 МГц – 2 м, глубина проникновения сигнала (при благоприятном грунте) 10-15 метров [2].

Участком проведения работ являлось асфальтовое покрытие внутреннего двора Физико-технического института НАН Беларуси. После сильных осадков в асфальтовом покрытии появились провалы. Площадка проведения работ размером 8.7 м на 15.1 м включала два провала и четыре люка. Провал №1 самый большой и образовался вблизи здания рядом с люками ливневой канализации и водопровода, провал №2 образовался рядом с люком ливневой канализации (рис. 1). Георадарные профили снимались двумя антеннами с разной глубиной и в двух направлениях для построения сетки (рис. 2) [3].

Для съемки была установлена среда бетон/кирпич с диэлектрической проницаемостью 4. Провал №1 был закрыт листами фанеры для возможности прохода антенны над провалом. Радарограммы, были обработаны в программе Prism2 [4].



Провал №1

Провал №2

Рис. 1. Провалы в асфальтовом покрытии

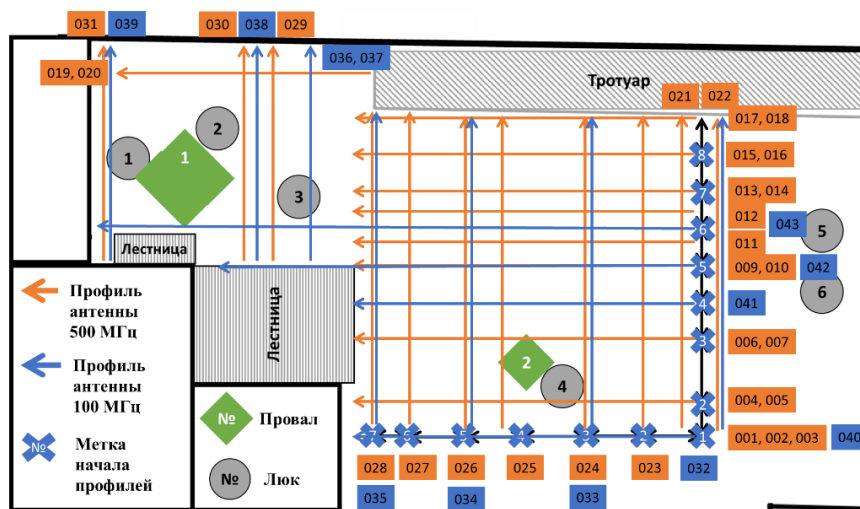


Рис. 2. Схема георадарных профилей

Согласно имеющимся планам трубы ливневой канализации залегают на глубине в 2.5 метра с уклоном от люка №2 к люку №4, глубина заложения труб водопровода точно неизвестна (примерная глубина от 3 до 6 метров).

На профилях 001-003 видны усы дифракции от люка №4, а за ним нарушение слоистости, либо наличие объектов в виде камней. На профилях в конце трассы четкие ровные слои уходят в глубину, предположительно это отражение от фундамента здания. На профилях 004-005 визуальных особенностей в начале профиля нет, в конце профилей, как и на 001-003, предположительно кратные волны от фундамента здания.

Профили 0006 и 0007 проходили справа от провала №2 и люка №4, вначале профиля визуально никаких особенностей, в конце профиля упирались в лестницу. Интерес вызвала красная область рядом с меткой 1 – это может говорить о провале или вымывании грунта в сторону уже имеющегося провала рядом с люком №4 (рис. 3).

На профиле 0008 интересны объекты ориентировочно на глубине 0.5м – отмечены красными областями. По гиперболе – вероятный объект – сухой песок, бетон, кирпич, асфальт и гранит, что имеют одинаковую диэлектрическую проницаемость. Голубая область может говорить о ярко отраженной границе (рис. 3).

На профилях 009-012 было замечено большое количество неустановленных объектов на глубине 0-0.5м из-за чего профили вышли зашумленными.

На профилях 013-014 также отмечаются кратные волны от объектов на глубине 0-0.5м. Далее по профилям отмечается область, схожая по своему виду с люком и отраженными волнами от воздуха – это может быть, как старый люк, так и пустота, вызванная размывом грунта (рис. 3)

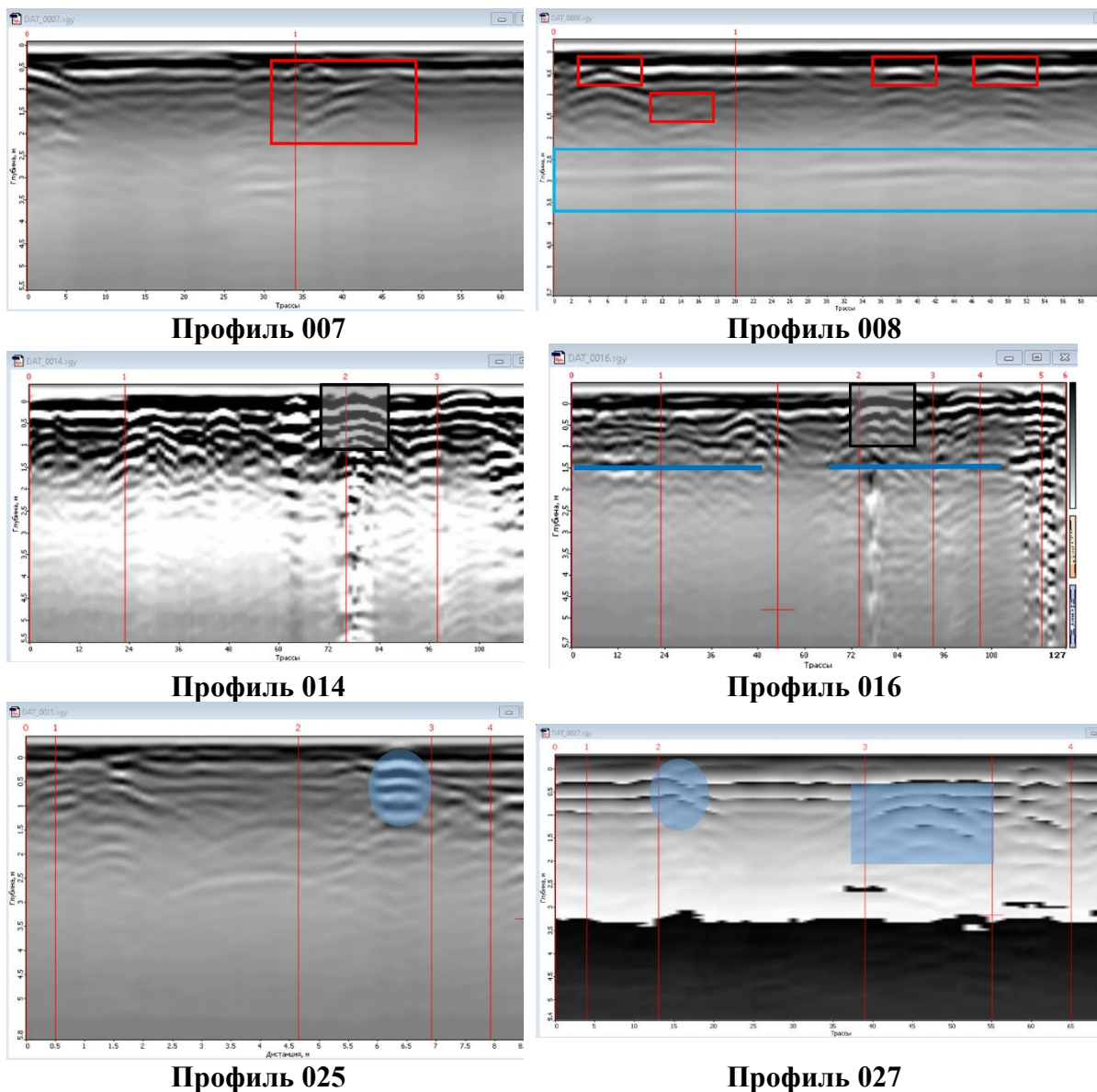


Рис. 3. Профили антенны 500МГц

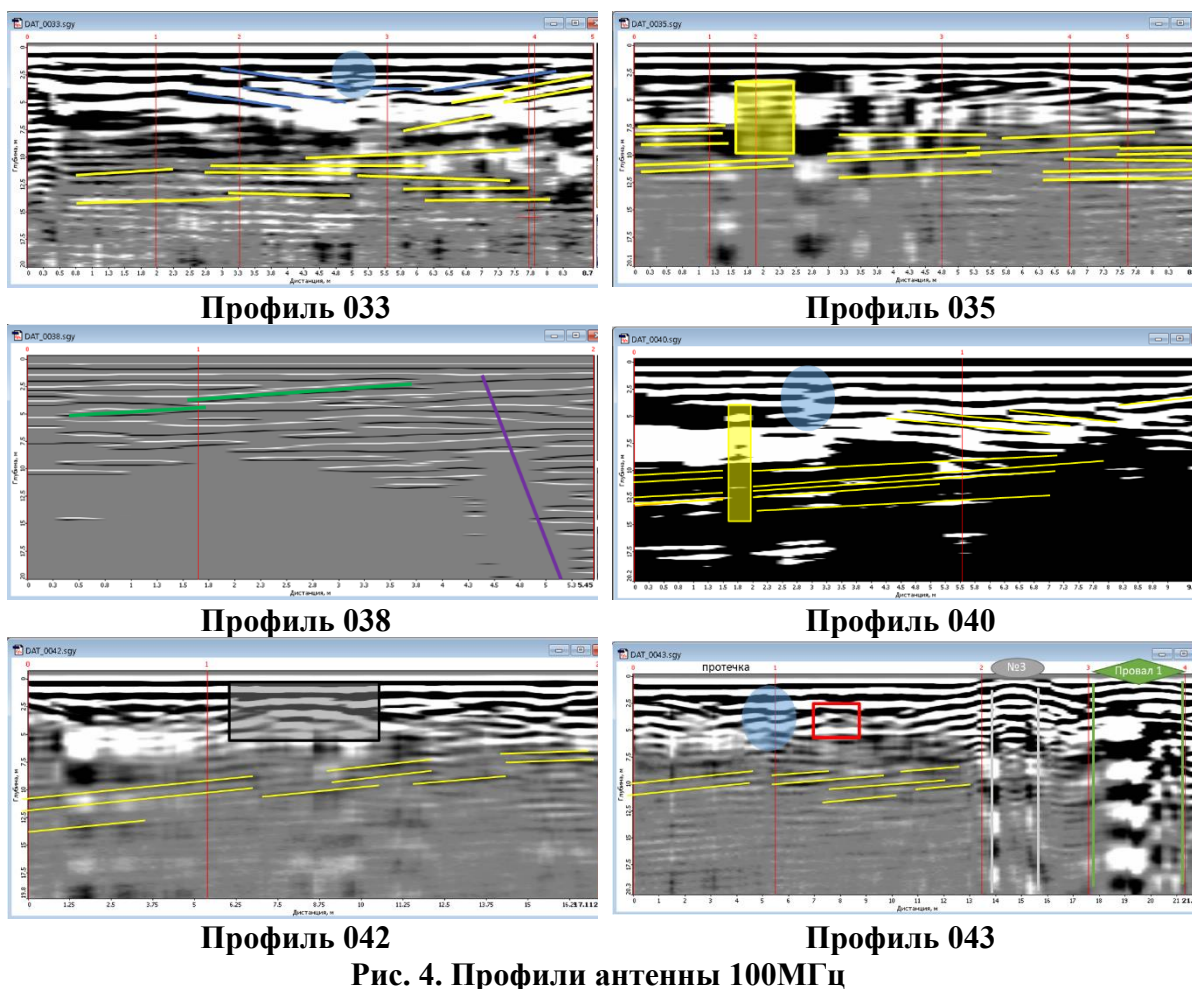
На профилях 015-016 отмечается такой же участок с предполагаемой пустотой, как и на профилях 013-014. Интерес вызывает граница, ориентировочно на 2 метрах, которая на протяжении профиля прерывается. Это может быть граница размытия грунта (рис. 3). Такая же граница присутствует на профилях 017-018. На профилях 021-023, 026 на глубине 3 метров присутствуют усы дифракции от объекта или от изменения грунта.

На профилях 024-025 присутствует прерывание границы ориентировочно на 1 м, что может быть связано с размытием грунта. На профиле 025 отмечается возможная просадка асфальта, пустота или подмыв грунта от поверхности до глубины ~1.5 метра. Такая же область присутствует и на профиле 027-028. На профилях 024-025, 027-028 прослеживается граница на ~3.5 метрах (рис. 3).

Съемка антенной 100 МГц позволила уточнить строение грунта на глубине без поверхностных помех. На профилях 032-035 ярко выражены оси синфазности – отмечены желтыми линиями. Место их прерывания может быть связано с разрывными нарушениями, так же присутствует ярко выраженное разрывное нарушение. Голубой областью и линиями выделен подмыв грунта (рис. 4).

На профиле 038 зелеными линиями выделено угловое несогласие – налегание слоев. Первоначально горизонтально залегающие слои постепенно выклиниваются. Это могут быть слои старого асфальт и/или насыпного грунта. Фиолетовыми линиями выделены кратные волны от фундамента здания или от трубы в конце профиля (рис. 4). На профиле 039 вдоль стены здания по люку №1 была выделена область подмыва грунта в углу здания. Съемка по провалу №1 не дала результатов из-за сильных отражений воздуха, глубину провала на этом участке установить не удалось.

На профилях 040-043 отмечены оси синфазности с разрывными нарушениями, которые могут быть вызваны трещинами и/или частичным размывом грунта (отмечено голубой областью). На профиле 042 серой областью выделена возможная пустота или объект, такой же как на профилях 013-016 антенны 500 МГц (рис. 4).



На профиле 043 возле провала №1 и люка №3 отмечаются оси синфазности. Люк №3 отражен на профиле кратными волнами, из-за отражений воздуха глубину на этом участке установить не представляется возможным. Голубой областью показана область подмыва грунта и нарушения слоистой структуры. Красным выделен объект на глубине – это может быть, как камень, так и труба ливневой канализации (рис. 4).

На рисунке 5 представлены основные элементы согласно анализу профилей, снятых антеннами 500 и 100 МГц на разных глубинах и в разных направлениях.

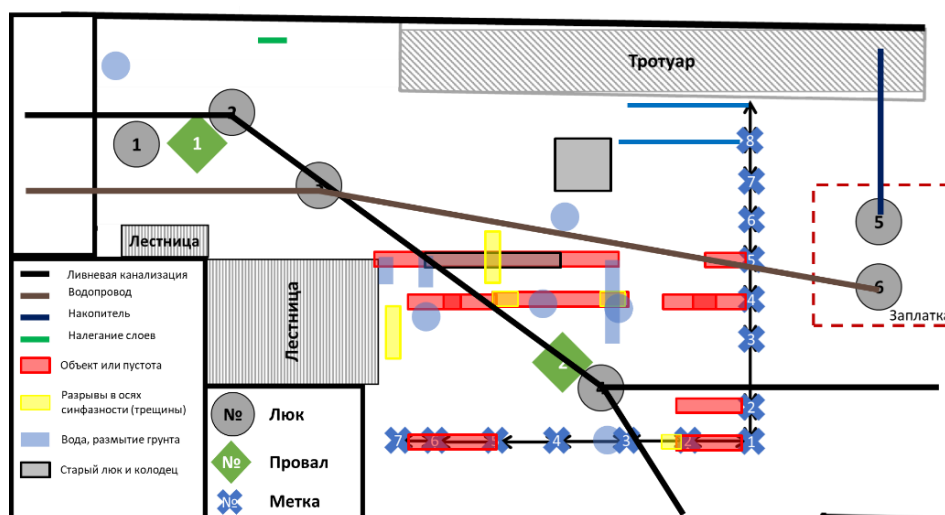


Рис. 5. Основные отметки согласно обработанным профилям

Анализ профилей показал наличие скрытого люка под асфальтом, нарушения слоистости структуры асфальтового покрытия и грунта, возможную просадку почвы в нескольких местах, которая может быть вызвана ливневыми осадками и скоплением воды в грунтовой толще. На глубине около 3 метров прослеживается граница, которая свидетельствует об изменении диэлектрической проницаемости, что говорит об изменении грунта. Обследование с помощью антенны на частоте 100 МГц показало ярко выраженные синфазные оси и их разрывы с наличием областей размыва грунта. Такие области в дальнейшем могут привести к образованию новых провалов в грунте и асфальтовом покрытии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие – М., Изд-во «Хорошее», 2017. – 240 с.
2. Георадар ЗОНД-12е [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://geosignal.ru/> (дата обращения: 14.02.2025).
3. Аузин А.А. Некоторые практические аспекты георадиолокационного обследования автомобильных дорог: Сборник тезисов научно-практической конференций «Георадар 2021» / под редакцией кандидата физико-математических наук М.С. Судаковой, кандидата технических наук М.Р. Садуртдинова. – М.: Издательский дом Академии Естество знания, 2022. – 170 с.
4. Инструкция пользователя. Prism2 // НПФ Радарные Системы. Рига: НПФ Радарные Системы, 2017. 74 с.

EXPERIMENTAL WORK TO SEARCH VOIDS UNDER ASPHALT COVERING

Bialiayeva Viktoriia, Martsinovich Yuliya, Raetskaya Olga, Tsiareshchanka Kseniya
Center for geophysical monitoring National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

Summary. The article describes the materials of ground penetrating radar works on searching for voids and zones of soil erosion under asphalt covering. The studies of asphalt covering destruction were conducted. As a result of the study,

many objects and heterogeneities were identified at different depths, including possible voids, soil erosion and cracks. The results are visualized in the form of ground penetrating radar profiles of the studied environment.

Key words: Zond-12e ground penetrating radar, permittivity, soil erosion, in-phase axes, failure in asphalt covering.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Беляева Виктория Александровна

bialiayeva@cgm.by

Центр геофизического мониторинга НАН Беларуси, г. Минск, м.н.с.

Мартинович Юлия Витальевна

martsinovich@cgm.by

Центр геофизического мониторинга НАН Беларуси, г. Минск, м.н.с.

Раецкая Ольга Сергеевна

raetskaya@cgm.by

Центр геофизического мониторинга НАН Беларуси, г. Минск, м.н.с.

Терещенко Ксения Валерьевна

tsiareshchenko@cgm.by

Центр геофизического мониторинга НАН Беларуси, г. Минск, м.н.с.

Научный руководитель: Аронов Аркадий Гесселевич, д.ф.-м.н.

УДК 550.362; 551.578.46

**ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА
(НА ПРИМЕРЕ ЕКАТЕРИНБУРГА)**

*Факаева Нелли Рафаэлевна, Горностаева Анастасия Александровна,
Хацкевич Богдан Дмитриевич
ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург*

Аннотация. Снежный покров играет важную роль в формировании теплового баланса в городе и, особенно, «городского острова тепла». В данной статье представлены результаты лабораторных и полевых измерений различных тепловых характеристик снежного покрова в Екатеринбурге за зимний период 2023-2024 гг. Для измерения теплопроводности снега был применен игольчатый зонд. По полученным результатам были построены региональная зависимость теплопроводности снега от плотности и временные разрезы изменений плотности, теплопроводности, температуропроводности и тепловой активности снежного покрова.

Ключевые слова: снежный покров, теплопроводность, плотность, температуропроводность, тепловая активность, игольчатый метод, Екатеринбург.

Екатеринбург, город с умеренным климатом, в котором большую часть года подстилающей поверхностью является снег. Его тепловые свойства существенно влияют на формирование «городского острова тепла». Глубина проникновения низких температур в грунт зависит от высоты снежного покрова, температуры приземного воздуха и тепловых свойств снега [1, 4].

Данная работа посвящена экспериментальным исследованиям тепловых свойств снежного покрова в Екатеринбурге, среди которых исследования зависимости эффективной теплопроводности снега и динамики осадконакопления и соответствующих изменений плотности, теплопроводности, температуропроводности и тепловой активности.

Эффективная теплопроводность снега зависит от его плотности [3, 5, 9]. В нашем исследовании для измерения теплопроводности был применен метод игольчатого зонда. Длинный тонкий зонд содержит в себе и нагреватель, и термодатчик. При постоянной мощности, выделяемой нагревателем, скорость изменения температуры зонда зависит от теплопроводности измеряемого материала.

Существует множество различных зависимостей теплопроводности снега от плотности (рис. 1). Заметно, что все аппроксимирующие зависимости сильно различаются между собой. Еще заметнее отличия между отдельными измерениями. Такое значимое различие связано с влиянием структуры снега, температуры и особенностями применяемых методик измерений. Однако единого мнения о влиянии структуры снега на теплопроводность нет.

Сложное взаимодействие в снеге конвективного теплопереноса и кондуктивной теплопередачи не дает возможности на получение универсальной количественной зависимости теплопроводности снега от плотности. Но в таких условиях сохраняют ценность региональные зависимости.

Также большой интерес представляет исследование примесей в снеге, характерных для города и связанных с механическим разрушением дорожных покрытий, использованием противогололедных реагентов [10], выпадением атмосферной пыли [8] и различной строительной деятельностью [6].

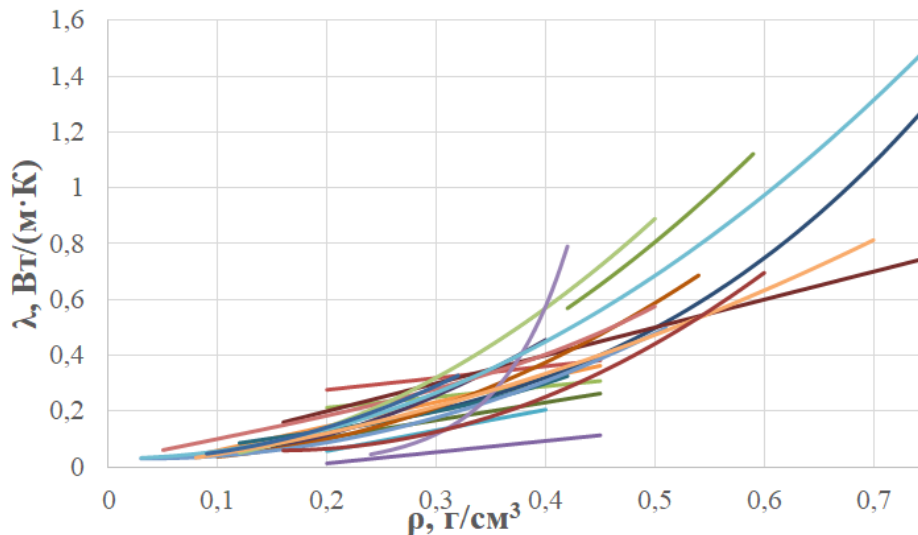


Рис. 1. Известные зависимости теплопроводности от плотности снега

Методика исследований

Исследования проводились зондовым измерителем МИТ-1 в морозильной камере при температуре $-12 \div -17^\circ\text{C}$. В качестве контрольных образцов использовались блок из пенополистирола ($\lambda = 0.033 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{K}^{-1}$) и глицерин ($\lambda = 0.279 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{K}^{-1}$ при $T=25^\circ\text{C}$). Отобранные образцы объемом от 2 л уплотненного до 4 л рыхлого снега выдерживались в течение суток до полной стабилизации теплового поля. При измерении выбирался режим минимальной мощности (0.27 Вт) для уменьшения температурных колебаний и влияния температурной зависимости теплопроводности. Для изготовления загрязненных проб использовался рыхлый зернистый снег. Он согласно «Международной классификации для сезонно-выпадающего снега» [7] относится к классам RG-FC по морфологической классификации зерен и характеризовался значением 2 (4F) ручного индекса твердости. Загрязненный снег формировался путем добавления в чистый поллютантов в виде поваренной соли, известково-доломитовой муки (размер гранул $<1 \text{ мм}$), отсева почвы ($<1.5 \text{ мм}$) или коры выветривания гранитов ($<1.25 \text{ мм}$). После проба перемешивалась. Доля поллютантов по данным [2, 6] в наиболее «грязных» пробах в Екатеринбурге не превышает 35 г/л воды (3.5 %), а на «чистых» участках – менее 1 г/л. В подготовленных нами пробах содержание загрязнителей было намеренно завышено (от 7 до 15 %) – для более устойчивого проявления эффекта загрязнения.

Измерения высоты и плотности ненарушенной снежной толщи проводились в сезон 2023–2024 гг. на геотермическом полигоне Института геофизики УрО РАН в Екатеринбурге. Полигон расположен в черте города Екатеринбурга, в 20 м от здания Института. Участок окружен деревьями, препятствующими ветровой эрозии. Для измерений высоты использовалась снегомерная рейка, плотности – весовой снегомер с объемом 380 см^3 .

Результаты исследований

Результаты измерений 25 проб «чистого» и 9 проб «грязного» снега приведены на рисунке 2 (общее количество измерений – 117). Аппроксимация экспериментальных данных полиномом 2-й степени (1) позволяет описать 93% наблюдаемой дисперсии теплопроводности:

$$\lambda = 4.535\rho^2 - 1.87\rho + 0.30; R^2 = 0.932. \quad (1)$$

Погрешность модели – $0.1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{K}^{-1}$. Поллютанты в основном снижают теплопроводность, но так как их концентрации в пробах были в несколько раз завышены относительно содержания в грязном городском снеге, полагаем, что в реальности их влияние на теплопроводность незначительно.

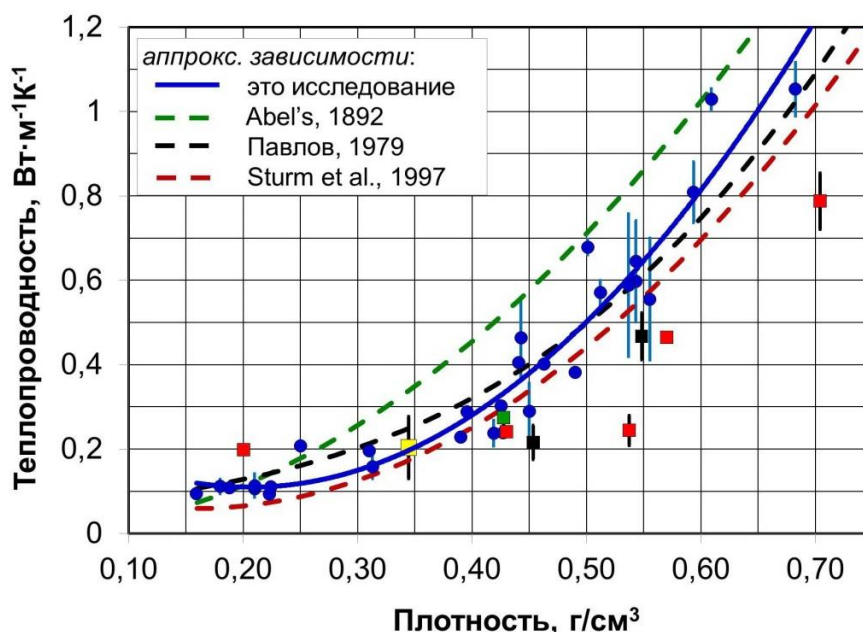


Рис. 2. Соотношение теплопроводности и плотности «чистого» (синие кружки) и «грязного» (разноцветные квадраты: красные – кора выветривания гранитов, желтые – NaCl, зеленые – известковая мука, черные – почва) снега в Екатеринбурге. Вертикальные линии ограничивают диапазон среднее $\pm$ стандартное отклонение. Сплошная синяя кривая – полиномиальная аппроксимация. Для сравнения приведены наиболее близкие к рассматриваемой зависимости, полученные другими авторами.

Устойчивый снежный покров в Екатеринбурге наблюдался с 23 октября по 5 апреля. Максимальная высота снега составляла 57–66 см. Большая часть толщи представляла собой рыхлый зернистый снег (ручной индекс твердости 2 (4F)). После снегопадов верхний слой свежеснежавшего снега 2–5 см имел плотность < 0.15 г/см³. В интервале 0–20 см встречались прослойки глубинной изморози с плотностью 0.25–0.28 г/см³, т.е. незначительно уступающей плотности зернистого рыхлого снега на этой глубине (рис. 3а).

При моделировании процессов теплообмена (кроме теплопроводности) необходимо знать коэффициенты температуропроводности и тепловой активности:

$$\alpha = 2.30p + 0.153p - 0.947; \quad (2)$$

$$E = (8.944p^3 - 3.683p^2 + 0.596p)^{1/2}. \quad (3)$$

По данным о вертикальном распределении плотности с помощью соотношений (1–3) были рассчитаны распределения тепло-, температуропроводности и тепловой активности (рис. 3б–г). На протяжении большей части сезона наблюдались медленные изменения теплофизических параметров. Наиболее однородна снежная толща по температуропроводности. На большей части разреза этот параметр находился вблизи минимума плотностной зависимости (3) и лежал в пределах 0.25–0.30 м²/с. Резкие изменения плотности и теплофизических параметров наблюдались с началом снеготаяния и уплотнения толщи.

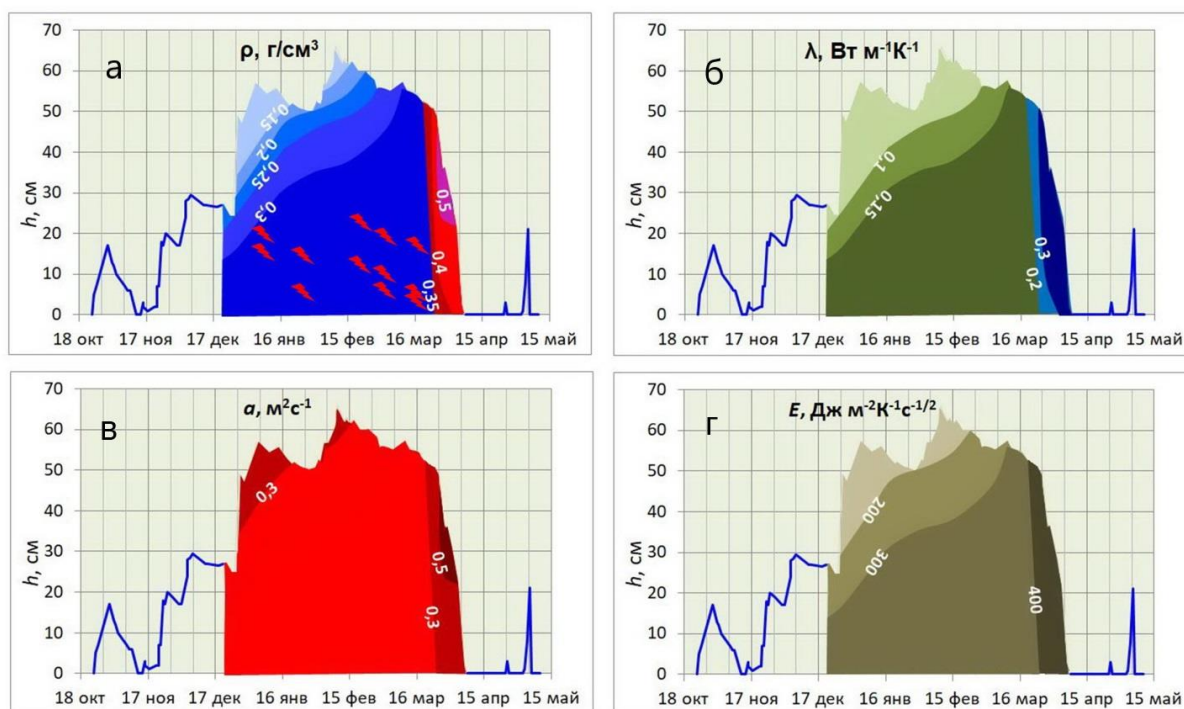


Рис. 3. Изменения высоты h , плотности ρ , теплопроводности λ , температуропроводности α и тепловой активности E по разрезу снежного покрова в сезоне 2023-2024 гг. в Екатеринбурге. Значками «молния» обозначены прослойки глубинной изморози.

Все полученные результаты будут полезны при моделировании теплового режима подстилающих поверхностей, при исследовании «городского острова тепла», а также при разработке региональных климатических моделей.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10018

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демежко Д.Ю. Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). Екатеринбург: УрО РАН, 2001, 144 с.
2. Илгашева Е.О., Ярмошенко И.В., Селезнев А.А., Малиновский Г.П. Снегогрязевая пульпа как индикатор экологических и седиментационных процессов в городской среде // Минералы: строение, свойства, методы исследования, 2020, № 11, С. 106-107.
3. Куваева Г.М., Сулаквелидзе Г.К. Физические свойства снежного покрова Большого Кавказа. М.: Наука, 1967. – 193 с.
4. Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В., Сократов С.А. О роли некоторых природных факторов в промерзании грунтов // Материалы гляциологических исследований, 2000, № 88, С. 41–45.
5. Павлов А.В. Исследование теплового баланса и теплофизических свойств снежного покрова в районе Загорска в период МГГ // МГИ, 1960, № 4, С. 109–118.
6. Селезнев А.А., Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Баглаева Е.М. Оценка запасов современных пылегрязевых отложений на урбанизированной территории (на

- примере г. Екатеринбурга) // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, 2018, № 3, С.74–85.
7. Фирц Ш., Армстронг Р.Л., Дюран И. и др. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова). Русское издание // Материалы гляциологических исследований, 2012, № 2, 80 с.
 8. Furberg A., Arvidsson R., Molander S. Dissipation of tungsten and environmental release of nanoparticles from tire studs: A Swedish case study // Journal of cleaner production, 2019, vol. XX, p. 920–928. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.004
 9. Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow // Journal of Glaciology, 1997, vol. XLIII, No. 143, p. 26–41. doi.org/10.3189/S0022143000002781
 10. Westerlund C., Viklander M. Particles and associated metals in road runoff during snow-melt and rainfall // Science of the Total Environment, 2006, vol. CCCLXII, p. 143–156. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.06.031

THERMAL PROPERTIES OF THE SNOW COVER (EXAMPLE FROM YEKATERINBURG)

*Fakaeva Nelly, Gornostaeva Anastasiya, Khatskevich Bogdan
IGF UB RAS, Yekaterinburg*

Summary. Snow cover plays an important role in the formation of the thermal regime of the city and an «urban heat island». In this article, the results describe of the laboratory and field studies of the snow different thermal properties in Yekaterinburg carried out in 2023–2024. The needle probe for the measuring the thermal conductivity of snow has been applied. The regional dependence of the snow thermal conductivity on its density and time sections of density, thermal conductivity, thermal diffusivity and thermal effusivity has been plotted based on the data obtained.

Key words: snow cover, thermal conductivity, density, thermal diffusivity, thermal effusivity, needle probe, Yekaterinburg.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Факаева Нелли Рафаэлевна

fakaeva.n@gmail.com

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, м.н.с.

Горностаева Анастасия Александровна

free_ride@mail.ru

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, с.н.с., к.ф.-м.н.

Хацкевич Богдан Дмитриевич

disaybl@yandex.ru

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, н.с.

Научный руководитель: Деめжко Дмитрий Юрьевич, г.н.с., д.г.-м.н.

УДК 550.348

ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ ПАРАМЕТРОВ B-VALUE И RTL СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В ЮЖНОЙ КАЛИФОРНИИ

Фомина Софья Алексеевна
МГУ им М.В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация: В данной работе проведен анализ аномалий сейсмического режима перед четырьмя крупнейшими землетрясениями (с магнитудами более 6.5) в период наблюдения 1981–2015 в окрестностях разлома Сан-Андреас в Южной Калифорнии. В качестве расчетных прогностических параметров выбраны наклон графика повторяемости и функция RTL. Обнаружены характерные образы предвестников перед каждым событием по обоим параметрам, а также определены временные границы соответствующих аномалий.

Ключевые слова: параметр b-value, параметр RTL, разлом Сан-Андреас, прогноз землетрясения, аномалии сейсмического режима

Аномалиями сейсмического режима называют геофизические эффекты, проявляющиеся на рассматриваемой территории при подготовке землетрясения. Сейсмический режим – это совокупность землетрясений, происходящих на определенной территории, в определенный временной промежуток, формирующая общий сейсмический фон этой территории, при сопоставлении с которым можно выявлять аномалии поведения сейсмичности. Определение пространственно-временных характеристик этих аномалий является важным этапом при разработке метода среднесрочного прогноза сильных землетрясений [4].

Поиск аномалий проводится на основе мониторинга нескольких параметров сейсмического режима, в частности параметра Гутенберга – Рихтера (b-value, или наклон графика повторяемости) и параметра RTL. Наклон графика повторяемости землетрясений характеризует соотношение вероятностей возникновения землетрясений различных энергий (магнитуд). Закон Гутенберга-Рихтера описывает взаимосвязь магнитуды и количества землетрясений в заданном сейсмоактивном районе:

$$N = 10^{a-bM} \quad (1),$$

где N – количество землетрясений с магнитудой M, a и b – константы, характеризующие изменение сейсмического режима в рассматриваемом районе. Соответствующий этому процессу образ предвестника выглядит как уменьшение величины b перед сильным землетрясением, обоснованное накоплением и слиянием сейсмогенных разрывов, которые приводят к образованию более крупных сейсмических событий. Параметр RTL представляет собой общее “сейсмовыделение” (накопление подвижек в очагах землетрясения, площадей разрывов и энерговыделение), рассчитываемое для каждой определенной точки пространства и каждого определенного момента времени, с учетом расстояния и времени от произошедшего землетрясения до рассматриваемых точки и момента времени. Он состоит из трех функций-распределений набора событий: по удалению от очага, по времени и по длине очага (R, T и L соответственно) и является их произведением:

$$R(x, y, z, t) = \sum_i^n \exp\left(-\frac{ri}{r0}\right) - Rs \quad (2)$$

$$T(x, y, z, t) = \sum_i^n \exp\left(-\frac{ti}{t_0}\right) - Ts \quad (3)$$

$$L(x, y, z, t) = \sum_i^n \left(\frac{li}{l_0}\right)^p - Ls \quad (4)$$

где ri , ti и li - эпицентральные расстояния от произошедших к моменту t сейсмических событий до рассматриваемой точки пространства, их времена и размеры очагов, r_0 и t_0 - коэффициенты, характеризующие степень убывания влияния более удаленных от рассматриваемой точки событий (в пространстве и во времени), p - вклад конкретного события, Rs , Ts и Ls - поправки на тренд и сезонные вариации. Соответствующий образ предвестника будет выглядеть как уменьшение параметра RTL, обусловленное сейсмическим затишьем, сменяющееся увеличением, связанным с форшоковой активизацией. Оба эффекта объясняются в рамках концепции ЛНТ процесса подготовки очага сильного землетрясения [3].

В работе использовался каталог землетрясений RSCSN (каталог был получен из открытых источников), включающий в себя 800 499 записей за интервал 18.01.1981-31.12.2015. Из очищенного каталога были выбраны 4 наиболее сильных землетрясения с магнитудами, лежащими в диапазоне от 6.6 до 7.3. При подготовке каталога была проведена стандартная процедура первичного анализа, включающая в себя проверку наличия дублей, идентификации и исключения афтершоков и других процедур, описанных в источнике [2]. Для каждого из рассматриваемых событий были построены пространственные карты распределения параметров b -value и RTL для моментов времени, предшествующих землетрясению. Характерные константы параметра RTL выбирались в соответствии с предшествующими работами в этом же районе ($r_0 = 50$ км, $t_0 = 1$ год, пороговая магнитуда $M=3$, расчетный радиус 130 км, $p=1$, временное окно 750 дней) [1]. Для выявления статистической значимости отклонения параметра b -value использовалась его Z-оценка. Порог по магнитуде подбирался из карт представительности, а временные окна варьировались из условий наибольшего проявления аномалии и обеспечения достаточной статистики событий, как представлено в таблице 2. Расчеты параметров проводились с использованием программного пакета, написанного на языке Python 3 с использованием необходимых библиотек обработки и визуализации данных (в том числе numpy, scipy, matplotlib).

Таблица 1

Параметры отобранных землетрясений

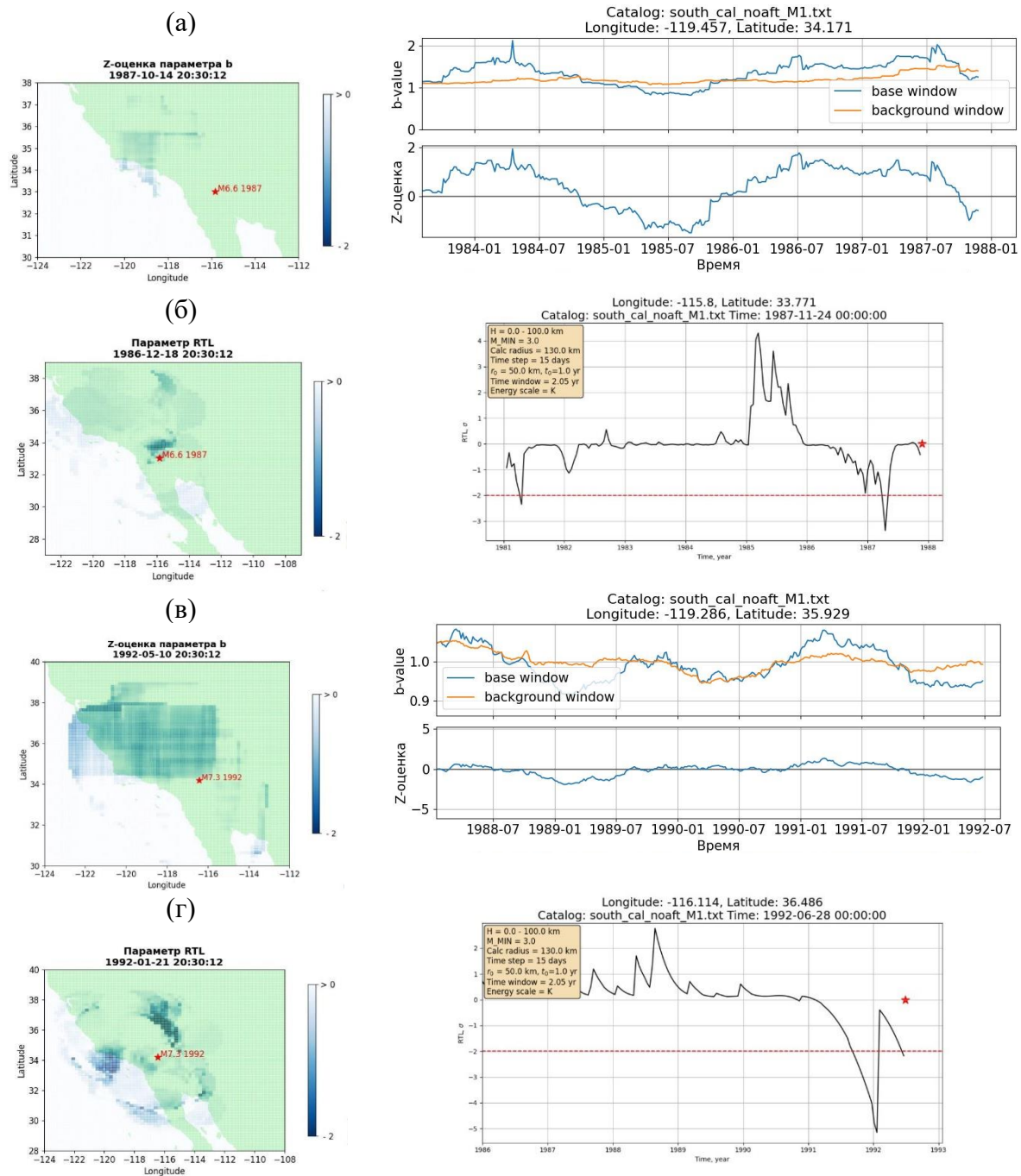
Номер	Дата	Долгота	Широта	Глубина, км	Магнитуда
1	24.11.1987	-115.829	33.017	12.4	6.6
2	28.06.1992	-116.435	34.201	6.59	7.3
3	16.10.1999	-116.272	34.596	7.66	7.1
4	04.04.2010	-115.294	32.274	13.99	7.2

Таблица 2

Расчетные параметры алгоритма b -value

Номер	Пороговая магнитуда	Базовое временное окно, дни	Фоновое временное окно, дни	Расчетный радиус, км
1	3	365	900	180
2	2	365	800	200
3	2	365	1000	200
4	3	365	800	170

На рисунке 1 представлены результаты этих расчетов, слева расположены пространственные карты распределения соответствующих параметров, построенные с помощью градиентной шкалы, а справа-временные графики изменения значений рассматриваемых параметров, на которых можно заметить характерные образы предвестников событий. Для b-value таким образом будет значительное понижение значения параметра перед событием, отвечающее уменьшению количества событий с малыми магнитудами, в соответствии с законом Гутенберга-Рихтера. Для RTL также можно обнаружить характерное поведение временного графика перед событием: понижение и последовательное увеличение значения параметра, что отражает формирование сейсмических затихий и форшоковую активизацию сейсмичности соответственно [4].



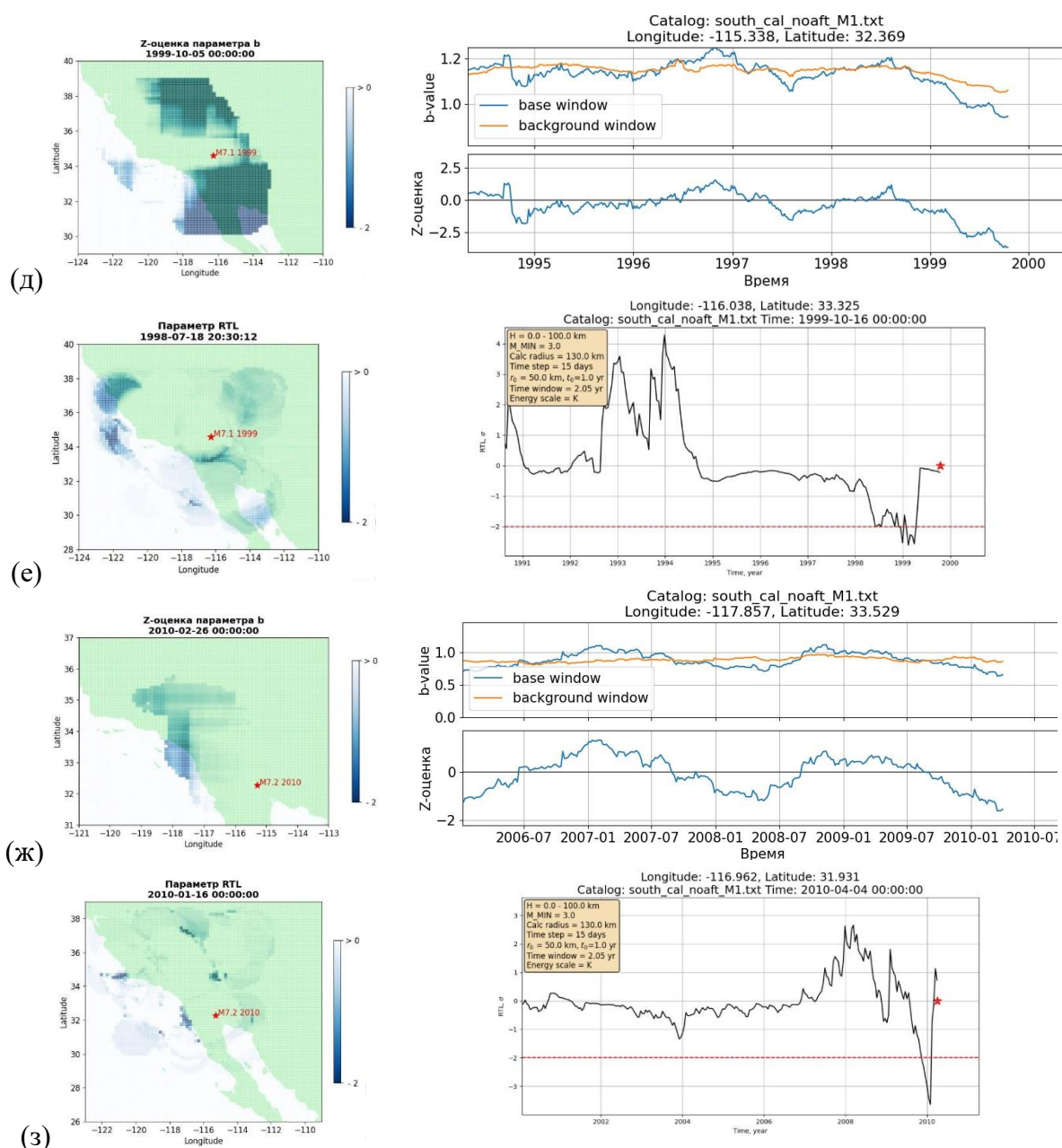


Рис. 1. Пространственные карты распределения и временные зависимости параметров b-value (а, в, д, ж) и RTL (б, г, е, з) в окрестностях разлома Сан-Андреас

Длительности аномалий представлены в таблице 3. В среднем, длительность аномалии RTL значительно больше, чем аномалии b-value, из чего можно сделать вывод об очередности их следования. Аномалия RTL начинается раньше, чем аномалия b-value для каждого события.

Таблица 3

Длительности аномалий (в годах до землетрясения)

Дата	Магнитуда	b-value	RTL
24.11.1987	6.6	0.25	2
28.96.1992	7.3	1	1.5
16.10.1999	7.1	1.2	1.6
04.04.2010	7.2	1	1.2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A.A. Petrushov, V.B. Smirnov, V.O. Mikhailov, S.A. Fomina Features of Seismicity Anomalies before Strong Earthquakes in California // *Physics of the Solid Earth*, 2024. pp 857-869.
2. Смирнов В.Б., Пономарёв А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН, 2020. 412 с.
3. Соболев Г.А. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // *Физика Земли*. 2019. № 1. С. 166–179.
4. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.

PROGNOSTIC ANOMALIES OF B-VALUE AND RTL PARAMETERS OF SEISMIC REGIME IN SOUTH CALIFORNIA

*Fomina Sofia
MSU, Moscow*

Summary. This work presents the results of study of four largest earthquakes (Magnitudes greater than 6.5) from 1981 to 2022 around San-Andreas fault zone, South California using b-value and RTL parameters. Before each earthquake, known “precursory patterns” of both parameters were detected. Additionally, temporal anomalies of seismic regime were calculated.

Key words: b-value parameter, RTL parameter, San-Andreas fault zone, earthquake prediction, seismic regime anomalies

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Фомина Софья Алексеевна

fominasofia2005@gmail.com

МГУ, г. Москва, студент

Научный руководитель: Смирнов Владимир Борисович, заведующий кафедрой и лабораторией сейсмологии, д.ф.-м.н., профессор

УДК 550.8:552.08

**АНАЛИЗ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГАББРОДОЛЕРИТОВ
НОВОГОЛЬСКОГО И СМОРОДИНСКОГО КОМПЛЕКСОВ
(ВОРОНЕЖСКИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ МАССИВ) С
ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ**

*Харин Алексей Юрьевич, Ильин Виталий Викторович
ФГБОУ ВО ВГУ, г. Воронеж*

Аннотация. В предлагаемой статье рассмотрены результаты анализа петрофизических моделей габбродолеритов новогольского и смородинского комплексов (Воронежский кристаллический массив) с применением метода группового учета аргументов. Изучение габбродолеритовых массивов новогольского и смородинского комплексов является важной задачей в связи с их перспективами на цветные и драгоценные металлы. Полученные модели, объединяющие различные петрофизические характеристики в едином модельном уравнении, можно рассматривать как комплексную петрофизическую характеристику пород.

Ключевые слова: петрофизические характеристики, статистический анализ, идентификационные модели.

Интерес к габбродолеритовым массивам смородинского и новогольского комплексов в настоящее время основан на возможности обнаружения в них благороднометальной минерализации [1]. Системное изучение петрофизических параметров пород (плотность, магнитная восприимчивость и скорость продольных волн) новогольского комплекса выполнено в последние годы в петрофизической лаборатории кафедры геофизики Воронежского госуниверситета. Физические характеристики измерялись и обрабатывались по стандартной методике. Результаты исследований представлены в [2-4]. Петрофизические данные пород смородинского комплекса были взяты из цифровой пространственной базы данных о породах Воронежского кристаллического массива (ВКМ) в объеме 243 определений плотности, 234 определений магнитной восприимчивости и 163 определений скорости распространения упругих волн. Представительность данных позволила выполнить не только полноценный статистический анализ (построение диаграмм распределения и расчет статистических характеристик петрофизических параметров), но и применить метод группового учета аргументов (МГУА) с целью создания идентификационных моделей, объединяющих петрофизические и пространственные атрибуты в едином характеристическом уравнении [5].

Интрузивные образования смородинского комплекса распространены в центральной части Курского блока, где они приурочены к северному сочленению Алексеевско-Воронежской и Белгородско-Михайловской рифтогенных структур (зон) и их жесткому активизированному обрамлению. Проявления смородинского комплекса также отмечены в пределах Новозыбковско-Почепского и Трубчевско-Новониколаевского глубинных разломов в пределах Брянской подзоны. Интрузии представлены многочисленными, разнообразными по морфологии, размерам, внутренней структуре, составу и степени дифференцированности плутоническими телами [1].

Магматогенные образования, относимые к новогольскому комплексу, распространены на северо-востоке ВКМ, в центральной части Хоперского мегаблока (Калач-Эртильская структурно-формационная подзона) [1, 6], где они преимущественно приурочены к зоне пересечения Шумилинско-Новохоперского, Воронежско-Курского и

Мичуринско-Поворинского региональных разломов [7]. Магматические тела сложной формы и разнообразные по размерам сосредоточены в рамках локального ареала.

На первом этапе статистический анализ данных выполнялся по стандартной методике – для каждого петрофизического параметра были построены вариационные кривые и рассчитаны основные статистические моменты. Первичная статистическая обработка позволила исключить нехарактерные значения и сформировать статистически однородные выборки данных, которые затем были проанализированы с помощью МГУА, эффективность использования которого для анализа петрофизических данных подтверждена результатами многочисленных исследований, выполненных на кафедре геофизики Воронежского госуниверситета [8-12]. Целью исследования было получить структурно параметрические уравнения (модели), связывающие петрофизические и пространственные атрибуты. Численная реализация метода была выполнена с помощью программного обеспечения, разработанного на кафедре геофизики.

Для анализа МГУА были сформированы входные таблицы данных для новогольского комплекса (248 образцов) и смородинского комплекса (219 образцов). В качестве зависимой переменной использована плотность горных пород, а в качестве переменных аргументов – магнитная восприимчивость, скорость прохождения продольных волн, а также глубина отбора образцов. В результате анализа МГУА для пород новогольского и смородинского комплекса были получены соответствующие идентификационные модели.

Модельные уравнения, в которых зависимой переменной является плотность, как для пород новогольского (1), так и для пород смородинского комплекса (2), имеют единую структуру и параметры, и отличаются только значениями числовых коэффициентов. Это зависимости плотности (σ) от магнитной восприимчивости (χ) и скорости упругих волн (V) (рис.1,2):

$$\sigma = 2.95 - 0.93 * \chi + 0.17 * V * \chi \quad (1)$$

$$\sigma = 2.58 + 0.05 * \chi + 0.00003 * V * \chi \quad (2)$$

Количественную оценку качества полученных моделей дает соотношение между стандартным отклонением выборки и среднеквадратичной невязкой модельных и экспериментальных данных. Для новогольского комплекса стандартное отклонение выборки плотности и также как и невязка модельных и экспериментальных значений составляет 0.04 г/см^3 . Для смородинского комплекса стандартное отклонение выборки составляет 0.07 г/см^3 , а невязка – 0.06 г/см^3 .

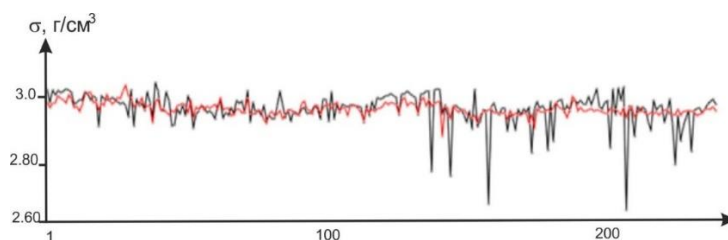


Рис. 1. Экспериментальные (черный график) и модельные (красный график) значения плотности пород новогольского комплекса

В результате анализа петрофизических параметров магматитов новогольского и смородинского комплексов обобщены данные о плотности, намагниченности и скорости упругих волн. Полученные модели, объединяющие различные петрофизические характеристики в едином модельном уравнении, можно рассматривать как комплексную петрофизическую характеристику пород.

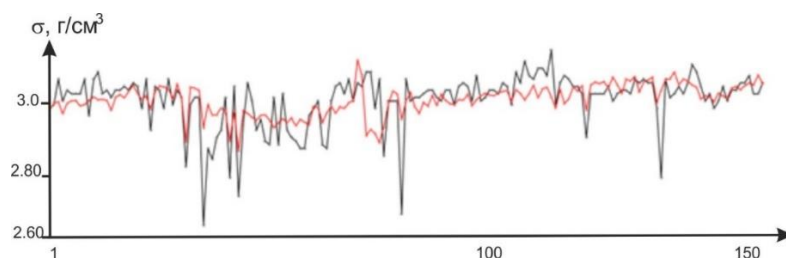


Рис. 2. Экспериментальные (черный график) и модельные (красный график) значения плотности пород смородинского комплекса

Использование моделей МГУА позволяет автоматизировать процедуру выявления и классификации выбросов при работе с большим объемом информации и обеспечивает гибкий подход, позволяющий максимально полно использовать уникальные экспериментальные данные. Выявленные статистические взаимосвязи между петрофизическими параметрами могут эффективно использоваться в процедуре комплексной интерпретации геофизических данных с целью построения реалистичных 3D-моделей строения верхней коры.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ №25-27-00209

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбеков А.Ю. Геология, петрология и минерагеническая оценка перспектив рудоносности габбродолеритовых массивов трапповой формации Воронежского кристаллического массива: автореф. дис. канд. геол.-минерал. наук. Воронеж, 2002. 24 с.
2. Глазнев В.Н., Муравина О.М., Жаворонкин В.И. и др. Петроплотностная карта докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива. Воронеж, «Научная книга», 2020. 101 с.
3. Жаворонкин В.И., Жилин Е.С. Петрофизические особенности магматитов новогольского комплекса (ВКМ). XXI Международная конференция. Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. М.: ИИЦ ФГБУ ИФЗ РАН, 2020. С. 79–82.
4. Ильин В.В., Харин А.Ю. Новые данные о физических свойствах магматитов новогольского комплекса. Геофизические и петрофизические исследования: методика и интерпретация данных. Воронеж, Научная книга, 2022. С. 44–47.
5. Муравина О.М. Возможности метода группового учета аргументов при статистической обработке петрофизических данных // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2009. № 2. С. 150–154.
6. Муравина О.М. Идентификационный анализ петрофизических характеристик пород осадочного чехла Воронежской антеклизы // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2013. № 2 (22). С. 20–25.
7. Муравина О.М., Пономаренко И.А., Минц М.В. Применение метода группового учета аргументов для анализа петрофизических данных // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2021. № 3 (51). С. 5–15.
8. Муравина О.М., Чернышова М.Н., Жаворонкин В.И. Идентификационный анализ ультрамафит-мафитовых интрузий мамонского комплекса Воронежского кристаллического массива // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2019. № 3 (43). С. 88–98.

9. Муравина О.М., Долгаль А.С., Аузин А.А. и др. Сферы применения современных статистических методов обработки геофизической информации // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2019. № 4. С. 79–84. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2019.4/2699>
10. Муравина О.М., Пономаренко И.А. Программная реализация метода группового учета аргументов при идентификационном моделировании геолого-геофизических данных // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2016. №2. С. 107–110
11. Ненахов В.М. Минерагенические исследования территорий с двухъярусным строением (на примере Воронежского кристаллического массива) / В.М. Ненахов [и др.]. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2007. 284 с.
12. Харин А.Ю. Петрофизическая модель магматитов новогольского комплекса (Воронежский кристаллический массив). Геофизические и петрофизические исследования - методика, результаты, интерпретация. Воронеж, Научная книга, 2023. С. 65–69.

ANALYSIS OF PETROPHYSICAL MODELS OF GABBRODOLERITES OF THE NOVOGOLSKY AND SMORODINSKY COMPLEXES (VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF) USING THE METHOD OF GROUP ACCOUNTING OF ARGUMENTS

*Kharin Alexey Yuryevich, Ilyin Vitaly Viktorovich
VSU, Voronezh*

Summary. The results of the analysis of petrophysical models of gabbrodolerites of the Novogolsky and Smorodinsky complexes (Voronezh crystal massif) using the method of group consideration of arguments are considered in the proposed article. The study of the gabbrodolerite massifs of the Novogolsky and Smorodinsky complexes is an important task in connection with their prospects for non-ferrous and precious metals. The obtained models, combining various petrophysical characteristics in a single model equation, can be considered as a complex petrophysical characteristic of rocks.

Key words: petrophysical characteristics, statistical analysis, identification models.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Харин Алексей Юрьевич

17.Kharin.2003.Alexey@mail.ru

ФГБОУ ВО ВГУ, г. Воронеж, магистр 1 курса

Научный руководитель: Муравина Ольга Михайловна, д.т.н.

Ильин Виталий Викторович

ФГБОУ ВО ВГУ, г. Воронеж, аспирант 1 курса

Научный руководитель: Глазнев Виктор Николаевич, д.ф.-м. н.

УДК 550.360 536.51

ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН: ПЕРСПЕКТИВА ПРЕЦИЗИОННЫХ МЕТОДОВ

*Хацкевич Богдан Дмитриевич, Горностаева Анастасия Александровна,
Факаева Нелли Рафаэлевна
ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург*

Аннотация. Рассмотрены основные методы геотермических исследований скважин, их формирование и развитие, а также области применения. Сложившееся простое представление о реакции прибора на изменение температуры окружающей среды применимо только для приборов малой точности (0.1 °C). Современные прецизионные термометры типа RBRsoloT, показывают, что аппаратный отклик на изменение температуры окружающей среды (релаксация) носит сложный характер. Уже через несколько секунд после погружения прибора в скважину он регистрирует температуру, близкую к температуре флюида. Но через 15-20 секунд измеряемая температура начинает «уходить» от невозмущенной. Наличие временного «окна», в пределах которого измеряемая температура наиболее близка к температуре флюида, позволяет оптимизировать методику прецизионных измерений.

Ключевые слова: геотермия, термокаротаж, термометр RBRsoloT, прецизионные измерения температуры, свободная тепловая конвекция.

Температурные измерения в скважинах – один из важнейших источников информации тепловом режиме недр и гидрогеологических процессах. Данные термометрии используются при моделировании осадочных бассейнов, нефтегазоносных систем, гидродинамических процессов, при разработке тепловых методов добычи высоковязких нефтей, поисков, разведки и разработке геотермальных месторождений, при решении задач в гидрогеологии, инженерной геологии, геоэкологии, геокриологии, глобальной тектоники, палеоклиматологии, геодинамики.

Наиболее распространенный тип геотермических исследований скважин - температурный каротаж. Он делится на два типа: поточечный (stop-and-go) и непрерывный. Поточечные измерения температуры впервые были проведены в 1832 году в скважине Прегны (Pregny) вблизи Женевы, несмотря на появление новых электронных датчиков и регистраторов методика измерений не сильно изменилась. Для измерений нужен прибор (или датчик), доставить на необходимую глубину с помощью лебедки (ручной или автоматической), и провести измерения в течение некоторого времени. Оно зависит от температурной инерции - параметра, описывающего реакцию прибора на изменение температуры окружающей среды. В первом приближении, которым обычно и ограничиваются на практике [2,3,5], регистрируемая во времени t температура определяется начальной температурой прибора T_1 , температурой окружающей среды T_2 и постоянной времени τ :

$$T(t) = T_2 + (T_1 - T_2) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

откуда время, необходимое для достижения требуемой точности $\Delta T = T(t) - T_2$, равно:

$$t = \tau \ln\left(\frac{(T_1 - T_2)}{\Delta T}\right). \quad (2)$$

Так, при разности температур термометра и окружающей среды $T_1 - T_2 = 1$ К и $\tau = 10$ с. необходимы 23 сек для достижения точности 0.1 К и 46 с. для достижения точности 0.01 К, при $\tau = 100$ с. – 230 и 460 с., соответственно. Постоянная времени зависит от тепловой массы прибора, площади его внешней поверхности и коэффициента теплоотдачи. Обычно величину τ определяют 1 раз и применяют для всех измерений с некоторыми корректировками в сторону увеличения времени наблюдения для большей точности.

Непрерывный каротаж скважин, как метод возник, когда на смену аналоговым термометрам пришли цифровые. Они обладали более высоким разрешением, что позволяло вести запись непрерывно. Реализация таких возможностей потребовала учесть ряд особенностей. Во-первых, измерения необходимо проводить при спуске прибора в скважину во избежание влияния перемешивания флюида. Во-вторых, необходима постоянная скорость спуска. В-третьих, исходя из уравнения (1), датчик реагирует на изменение температуры с некоторой задержкой, поэтому необходимо учитывать скорость спуска. Максимальная скорость $V_{\text{макс}}$ зависит от постоянной времени датчика τ , геотермического градиента G и допустимой погрешности регистрации температуры ΔT [4]:

$$V_{\text{макс}} = \frac{\Delta T}{G \tau}. \quad (3)$$

Так, при допустимой погрешности $\Delta T = 0.01$ К, геотермическом градиенте $G = 0.1$ К/м и $\tau = 1$ с имеем $V_{\text{макс}} = 360$ м/ч. При увеличении на порядок температурного градиента, например, в пределах температурной аномалии гидрогеологической природы, потребуется в 10 раз уменьшить точность каротажа. При этом мы получим распределение температуры в скважине с шагом 0.1 м при регистрации через 1 с. Такое разрешение необходимо для решения ряда задач промысловой и нефтяной геофизики, например для определения нефте-водопритоков, оценки расхода жидкости, выделения работающего пласта, выявления нарушения герметичности колонны, заколонных перетоков, и т.д. Температурные аномалии данных процессов имеют характерные формы и большую амплитуду (от нескольких десятых °С и выше), поэтому важна не точность, а разрешающая способность.

Все перечисленные методы геотермических исследований скважин основаны на представлении, что кривые релаксации (1) имеют форму экспоненты, и для более точных измерений необходимо более длительное нахождение на точке наблюдений (рис. 1), а при выполнении непрерывного каротажа точность наблюдаемых температур существенно ниже, чем при дискретном наблюдении.

Но для современных прецизионных термометров с выносным датчиком, заключенным в тонкой трубке, релаксация носит более сложный характер. Например, термометр RBRsoloT (рис. 2) уже через несколько секунд после погружения в воду регистрирует невозмущенную (на уровне 0.001) температуру, однако через 15–20 с. измеренная температура начинает все больше отличаться от невозмущенной и вновь возвращается к ней только через 1000–6000 с. Температурная аномалия в интервале 20–600 с. осложнена непериодическими колебаниями амплитудой 0.02–0.05, особенно заметными на кривой охлажденного термометра. Столь сложное поведение связано с большей постоянной времени корпуса прибора по сравнению с постоянной времени датчика. Температурная аномалия, создаваемая прибором, достигает датчика лишь через некоторое время после его термализации, и следующий возврат к невозмущенным температурам происходит гораздо медленнее. Непериодические вариации обусловлены конвективными течениями флюида, вызываемыми температурными градиентами вблизи корпуса прибора. Практический интерес представляет временное «окно», в пределах которого можно быстро и точно измерить невозмущенную температуру. Такая методика с ограниченным временем выгодно отличается от необоснованно применяемого в геотермии правила «чем дольше – тем точнее».

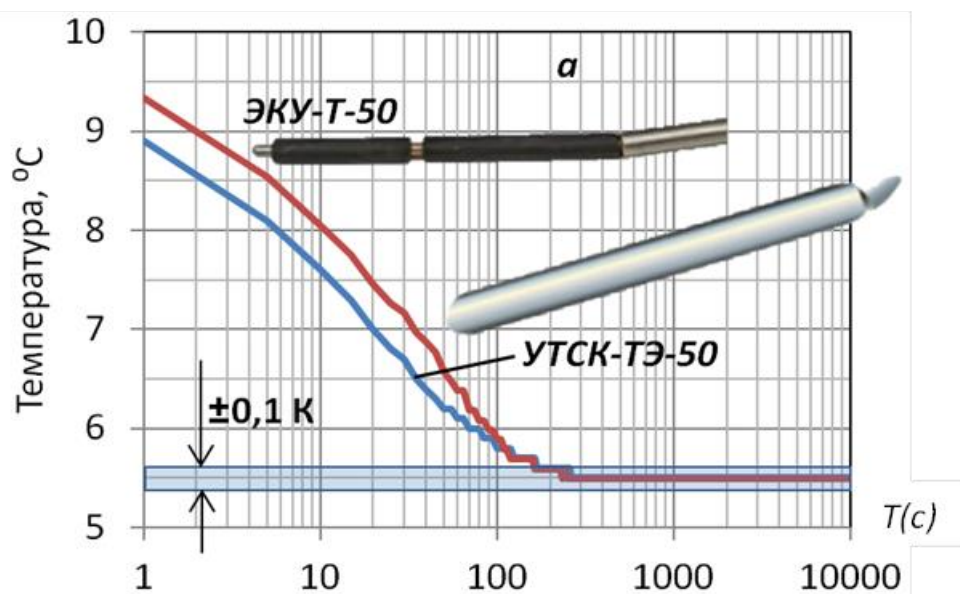


Рис. 1. Релаксационные кривые скважинных термометров ЭКУ-Т-50, УТСК-ТЭ-50

Теоретические и экспериментальные данные [1] показывают, что применение прецизионных термометров типа RBRsoloT эффективно при поточечной съемке в «окне». Благодаря этому не только уменьшится время съемки, но и увеличится точность измерений.

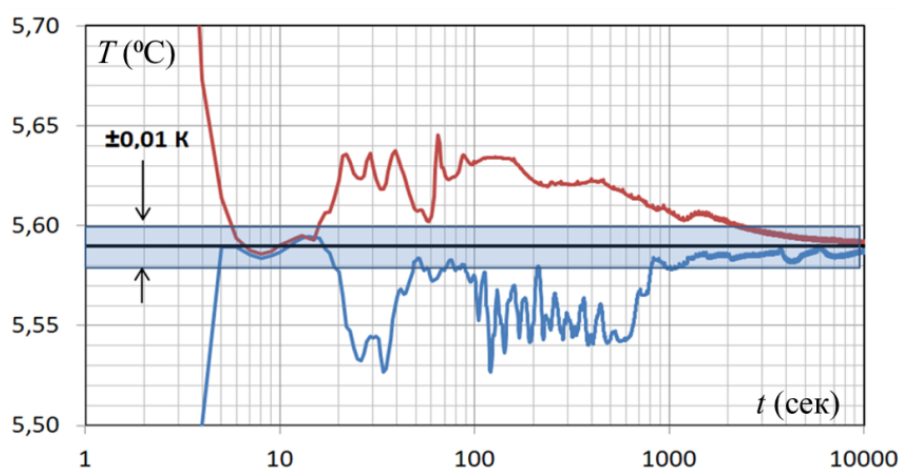


Рис. 2. Релаксационные кривые RBR-soloT (красная кривая – $T_1 > T_2$, синяя – $T_1 < T_2$)

Применение термометров данного типа при непрерывном каротаже также позволяет избежать появления температурных аномалий, связанных с охранным кожухом и корпусом прибора. Но в этом возникают проблемы привязки по глубине, требующие равномерного спуска и точной синхронизации внутренних часов термометра с работой подъемника. Скорость каротажа согласно [1] должна находиться в диапазоне от 60 до 120 м/ч.

Несмотря на появление высокоточных автономных скважинных термометров, существующие методики термокаротажа не совершенствуются и не позволяют эффективно использовать потенциал этих приборов. Считается, что отклик прибора на

изменение температуры окружающей среды носит монотонный, как правило, экспоненциальный характер. На этом основано распространенное мнение: чем больше время выдержки термометра, тем выше точность измерений. Исследования, проведенные с использованием автономного термометра RBRsoloT, показали, что температурная релаксация носит более сложный характер. Наличие «окна», в котором измеряемая температура наиболее близка к невозмущенной, может обеспечить высокую производительность и точность термокаротажа как в непрерывном, так и в дискретном вариантах. Очевидно, что и другие термометры, состоящие из массивного корпуса и вынесенного за его пределы термодатчика, имеют подобный характер релаксации. Применение прецизионных термометров по описанной методике позволит существенно расширить круг задач, решаемых скважинной термометрией, например выделять заколонные перетоки, вызывающие аномалии малой интенсивности, водоносные горизонты в обсаженном интервале гидрогеологической скважины. Повышение точности измерений дает возможность оценивать температурный градиент на коротких интервалах, что, мы надеемся, позволит на новом уровне возродить забытый ныне геотермический метод литологического расчленения разреза скважины. Теоретические зависимости ширины «окна» [1] от конструктивных параметров (постоянных времени датчика и прибора, расстояния датчика от корпуса прибора и диаметра корпуса) могут быть полезны разработчикам скважинных термометров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демежко Д. Ю. и др. О методике температурных исследований в буровых скважинах прецизионными термометрами //Георесурсы. – 2024. – Т. 26. – №. 2. – С. 92–98.
2. Costain, J.K., 1970. Probe response and continuous temperature measurements. *Journal of Geophysical Research*, 75(20), pp.3969-3975.
3. Nielsen, S.B. and Balling, N., 1984. Accuracy and resolution in continuous temperature logging. *Tectonophysics*, 103(1-4), pp.1-10.
4. Reiter M., Mansure A.J., Peterson B.K. (1980). Precision continuous temperature logging and comparison with other types of logs. *Geophysics*, 45(12), pp. 1857–1868. <https://doi.org/10.1190/1.1441070>
5. Saltus, R.W. and Clow, G.D., 1994. Deconvolution of continuous borehole temperature logs: Example from the Greenland GISP2 icecore hole. Department of the Interior, US Geological Survey. Report 94-254, 42 pp. элементов текста на английском языке соответствует русскому варианту.

GEOTHERMAL WELL RESEARCH: PRECISION METHODS PROSPECTS

*Bogdan Khatskevich, Anastasiya Gornostaeva, Nelly Fakaeva
IGF UB RAS, Yekaterinburg*

Summary. The main methods of geothermal well research, their methods and maintenance, as well as areas of application are considered. The complex simple idea of a device for measuring the ambient temperature is applicable only to low-precision devices (0.1 °C). Modern precision thermometers such as RBRsoloT show that the hardware response to changes in ambient temperature (relaxation) is complex. Within a few seconds after the device is immersed in the well, it registers a temperature close to the liquid temperature. But after 15-20 seconds, the measured temperature begins to "depart" from the undisturbed one. The

presence of a time "window" within which the measured temperature is closest to the liquid temperature allows you to adjust the precision measurement technique.

Key words: geothermy, borehole temperature logging, RBRsoloT logger, precise temperature measurements, free thermal convection.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Хацкевич Богдан Дмитриевич

disaybl@yandex.ru

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, н.с.

Горностаева Анастасия Александровна

free_ride@mail.ru

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, с.н.с., к.ф.-м.н.

Факаева Нелли Рафаэлевна

fakaeva.n@gmail.com

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, м.н.с.

Научный руководитель: Демежко Дмитрий Юрьевич, г.н.с., д.г.-м.н.

УДК 550.8.056

ВЕРТИКАЛЬНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ НАД УРАЛОМ

*Чебыкина Елена Валерьевна
ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург*

Аннотация. Рассматривается метод и данные вертикального электромагнитного зондирования ионосферы над Уралом за период с 1945 по 2024 годы, которые были получены в обсерваториях «Высокая Дубрава» и «Арти». Анализируется влияние солнечной активности на параметры ионосферы за 18-25 циклы.

Ключевые слова: ионосфера, ионозонд, вертикальное зондирование, параметры ионограмм, критическая частота, цикл солнечной активности.

Ионосфера представляет собой область атмосферы, располагающуюся выше 50 км от земной поверхности, в ней присутствует достаточное количество ионизированных частиц, которые существенно влияют на распространение радиоволн.

В обсерватории «Арти» ведутся наблюдения с 1977 года (предыдущее месторасположение ионозонда было в обсерватории «Высокая Дубрава»). Изначально данные получали с помощью быстродействующего регистрирующего устройства МИС-5, в 2002 году был установлен цифровой ионозонд «Парус», представляющий собой программно-управляемый комплекс с антенной системой, предназначенный для вертикального электромагнитного зондирования ионосферы (рис. 1) [1].



Рис. 1. Ионозонд «Парус»

В обсерватории «Арти» вертикальное зондирование ионосферы проводилось каждые 15 минут в частотном диапазоне от 1 до 20 МГц на высотах от 90 до 1000 км [1]. В периоды проведения экспериментов зондирование осуществлялось через 5 минут. На основании данных, полученных начиная с 1945 до 2024 годы, построены графики практически всех характеристик ионосферы и выполнен анализ их поведения. Среди них следующие основные параметры (рис. 2) [2,3]: f_{min} – минимальная частота отражений; hE – высота слоя E; hEs – высота спорадического слоя; hF – высота слоя F; $hF2$ – высота слоя F2; $foF2$ – критическая частота слоя F2; $foF1$ – критическая частота слоя F1; foE – критическая частота слоя E; $foEs$ – предельная частота обыкновенной волны спорадического слоя; $fbEs$ – экранирующая частота слоя Es; $M(3000)F1$, $M(3000)F2$ – стандартные коэффициенты максимально применимой частоты слоев F1 и F2 соответственно.

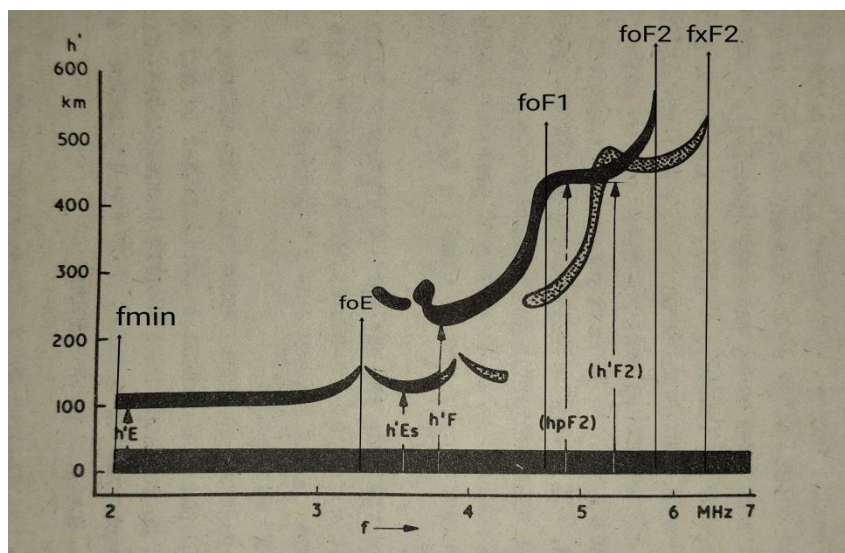


Рис. 2. Идеализированная ионограмма и основные определяемые параметры

В структуре ионосферы выделяют несколько областей, расположенных на различных высотах и имеющих разную степень ионизации. Самая нижняя — область D на высоте 50-90 км, ее мы не наблюдаем. Далее следует область E на высоте 90-180 км, где расположены слои E_1 , E_2 и E_s [1]. На рисунке 3 представлен график минимальной действующей высоты слоя E. Слой E существует в течение всего года на всём земном шаре только в дневные часы, поэтому графики построены для полуденных часов. Максимальные медианные месячные значения наблюдаются в зимние месяцы (декабрь, январь), а минимальные значения — чаще всего летом.

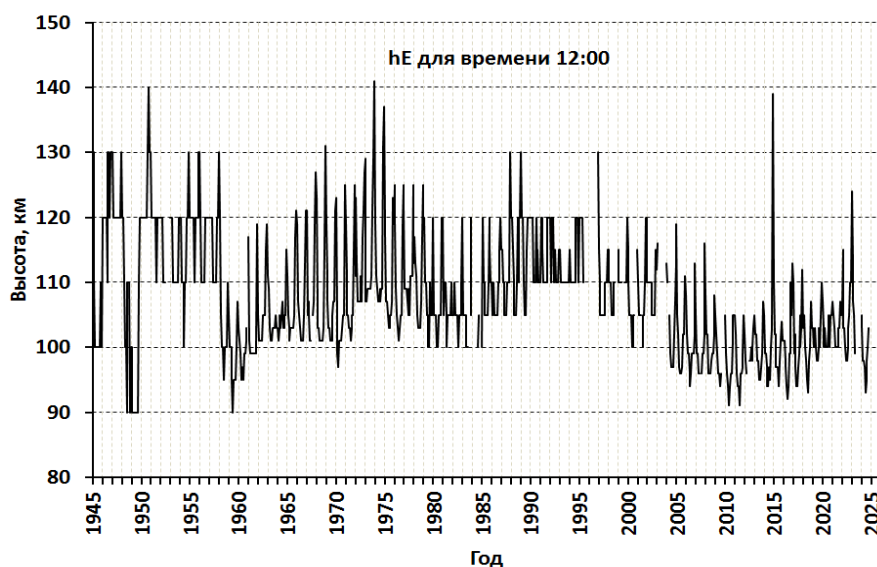


Рис. 3. График минимальной действующей высоты слоя E

Критической частотой (f_o) слоя называется самая высокая частота, на которой слой не только отражает волну, но и пропускает её. Критическая частота слоя является непосредственной мерой максимальной электронной концентрации N_{max} слоя [2].

На рисунке 4 представлен график критической частоты слоя E. Значение этого параметра варьируется от 2 МГц до 4 МГц. Его наибольшие значения отмечаются летом в июне-июле, а наименьшие значения — зимой, в декабре-январе. Такая картина

повторяется ежегодно. Это различие позволяет говорить об изменении максимальной электронной концентрации слоя в течение года примерно в 2.2 раза.

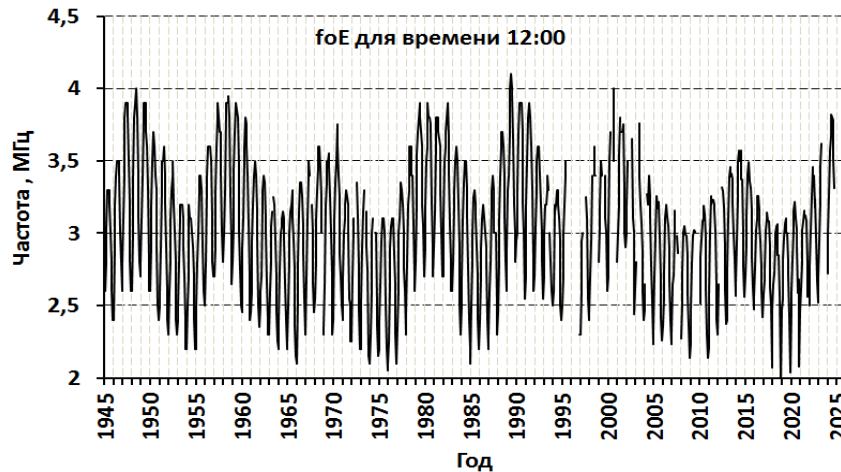


Рис. 4. График критической частоты слоя E

В максимуме солнечной активности критическая частота достигает летом значений 3.9-4.1 МГц и превышает примерно в 1.25 раза летние значения частоты в минимуме солнечной активности. Итак, годовые изменения полуденных критических частот слоя E наблюдаются на фоне одиннадцатилетней волны. Следовательно, максимальная электронная концентрация регулярного слоя E определяется не только положением Солнца над горизонтом, но и уровнем солнечной активности, с повышением которой электронная концентрация слоя увеличивается.

Ещё один частотный параметр, характеризующий спорадические образования — это параметр foEs - предельная частота обыкновенной волны, соответствующая наибольшей частоте, при которой наблюдается основной непрерывный след отражений от слоя Es [3]. Как проявляет себя параметр, можно посмотреть по графикам на рисунке 5 - в полдень и на рисунке 6 - в полночь.



Рис. 5. FoEs в полдень

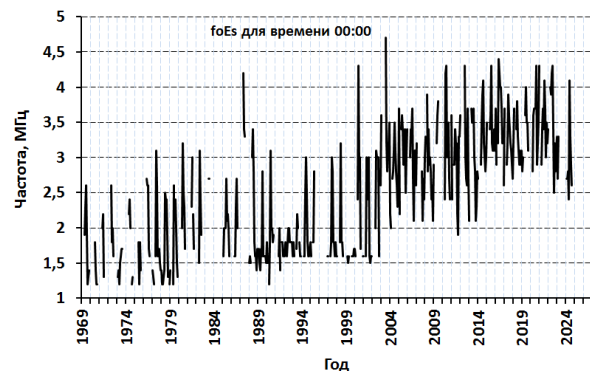


Рис. 6. FoEs в полночь

В полночь параметр фиксируется от 1.2 МГц до 4.4 МГц, в полдень — от 2.1 МГц до 5.7 МГц. Данный параметр в летнее время выше, чем в зимний период, хорошо прослеживается сезонность и ведёт себя довольно-таки стабильно из года в год. И для параметра fbEs, и для параметра foEs (особенно в дневные часы) характерно наличие периодичности, соответствующей 11-летнему циклу солнечной активности.

Следующая область F наблюдается на высоте от 180 км, здесь в основном выделяют слои F1 и F2. На рисунке 7 построены графики высоты слоя F в дневные часы и в полночь.

Высоты подвержены годовым колебаниям и в зимние месяцы они достигают максимума, а в летние месяцы – достигают минимума. С 2006 года параметр ведёт себя более стабильно. В дневные часы заметно проявление одиннадцатилетней волны солнечной активности.

В области F выделяют два регулярных слоя F1 и F2. Слой F1 наблюдается обычно с февраля по ноябрь каждого года только в дневное время суток. В декабре и январе он появляется очень редко (и никогда нет достаточно определённого мыса между слоями F1 и F2). Слой F1 подвержен сильному солнечному контролю. Критическая частота слоя F1 колеблется от 3 МГц в зимнее время и до 6.4 МГц в летний период времени.

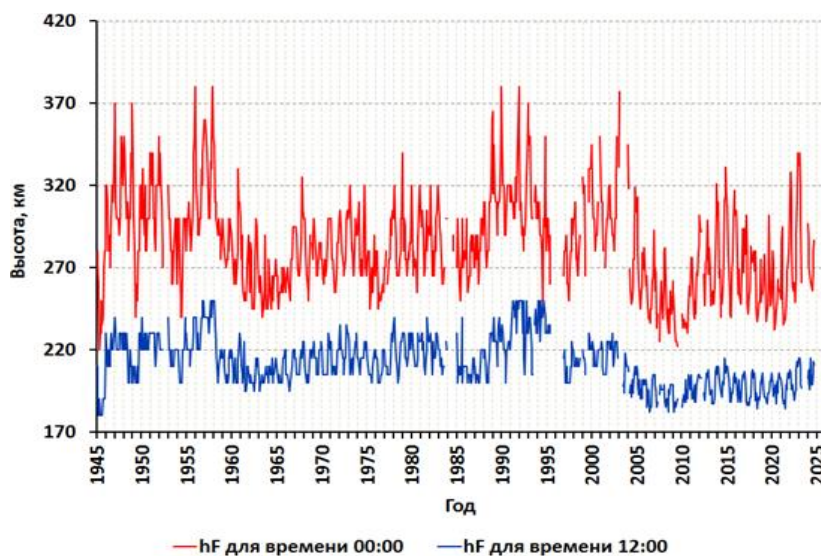


Рис. 7. Высота слоя F в дневные и ночные часы

Большинство данных, полученных на Урале, указывают на то, что в изменениях критической частоты слоя F2 присутствуют суточные, сезонные и годовые вариации. Большие критические частоты отмечаются в зимнее время. Наиболее отчётливо это проявляется в годы повышенной солнечной активности. На рисунке 8 приведены графики вариаций критических частот слоя F2 (f_oF2) в ночное (00:00) и дневное время (12:00) суток за весь период наблюдений на Урале с 1945 года.

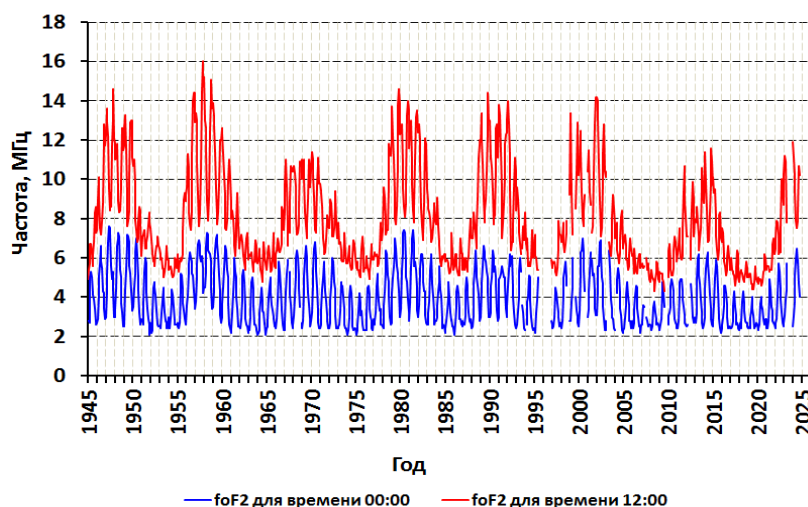


Рис. 8. Графики вариаций критических частот слоя F2 в ночное и дневное время

Приведённые данные указывают на существование годовых изменений критической частоты слоя как в дневное, так и в ночное время, которые наблюдаются на фоне одиннадцатилетней волны солнечной активности.

Сейчас мы находимся в 25 цикле солнечной активности. Летом 2018 года солнечная активность была минимальной: пятен на Солнце не наблюдалось, как и вспышек, даже самых слабых (что проявилось и в ионосфере). Значения ионосферных параметров в 2018-2020 годах практически держались на одном уровне. Все характеристики ионосферы находились в длинном, глубоком минимуме. Снижения параметров не отмечалось, но и явного повышения не зафиксировано, кроме параметра f_oE , значения которого начали расти в 2020 году, что говорит о начале нового солнечного цикла. Начиная с декабря 2021 года, астрономы фиксируют повышенную активность Солнца. В ионосфере с 2021 года хорошо заметно повышение всех критических частот. Повышение частот продолжилось и в 2024 году. Причём, хочется отметить быструю фазу роста всех параметров. На основе полученных данных можно утверждать, что новый 25 солнечный цикл приближается к своему максимуму, который должен наступить в 2025-2026 гг.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГФ УрО РАН, регистрационный номер НИОКТР 122062200030-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кусонский О.А. Геофизические обсерваторские исследования на Урале. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. – 280 с.
2. Руководящий документ РД 52.26.817-2023. Руководство по ионосферным, магнитным и гелиографическим наблюдениям. Часть 1. Ионосферные наблюдения. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2023. – 199 с.
3. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. М.: «Наука», 1977. – 342 с.

VERTICAL SENSING OF THE IONOSPHERE OVER THE URALS

*Chebykina Elena Valerievna
IGF UB RAS, Ekaterinburg*

Summary. The method and data of vertical electromagnetic sounding of the ionosphere over the Urals for the period 1945-2024, which were obtained at the Vysokaya Dubrava and Arti observatories, are considered. The influence of solar activity on the parameters of the ionosphere for 18-25 cycles is analyzed.

Key words: ionosphere, ionosonde, vertical sounding, ionogram parameters, critical frequency, solar activity cycle.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Чебыкина Елена Валерьевна

arti_elenka@mail.ru

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, инженер

Научный руководитель: Григорьева Светлана Анатольевна, ст. инженер.

УДК 550.389

**НАБЛЮДЕНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОБСЕРВАТОРИИ
«АРТИ»**

*Черепанова Елена Анатольевна
ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург*

Аннотация. Непрерывные мониторинговые наблюдения геомагнитного поля в стационарных условиях геофизических обсерваторий – это важная составляющая в современном комплексе наблюдений за окружающей средой. Приводятся сведения о методике наблюдений в обсерватории «Арти», дается краткая характеристика применяемых магнитометров и некоторые результаты наблюдения геомагнитного поля.

Ключевые слова: вековые вариации, международные модели, магнитные бури.

Наблюдения геомагнитного поля представляют собой ключевой аспект геофизических исследований, которые помогают лучше понять динамические процессы, происходящие в земной магнитосфере и атмосфере. Магнитное поле Земли является результатом сложных взаимодействий между внутренними процессами планеты и внешними явлениями.

Обсерватория «Арти» была введена в эксплуатацию в 1969 году. С тех пор данные наблюдения проводятся непрерывно и накоплен огромный научный материал. В обсерватории используются современные инструменты и технологии для измерения геомагнитного поля [1]. К ним относятся:

- Магнитометры - приборы для измерения магнитных полей с высокой точностью. Аппаратурный комплекс аппаратуры отвечает стандарту INTERMAGNET (Сертификат члена INTERMAGNET станции «Арти» (ARS) от 27 сентября 2011 г.);
- Анализ данных - компьютерные системы для обработки и анализа полученной информации.

Перечень магнитометров, используемых на обсерватории «Арти»:

- протонный оверхаузеровский магнитометр POS-1 для измерений модуля магнитной индукции геомагнитного поля F. Разрядность 0.001 нТл, среднеквадратичная ошибка измерения модуля магнитной индукции 0.05 нТл;
- 3-х-компонентная цифровая магнитно-вариационная станция (ЦМВС) «Кварц-4», погрешность 0.1 нТл, частота данных 1 Гц. Компоненты вектора D, H, Z, разрешающая способность, 0.02 нТл, период оцифровки, 0.05 секунд;
- протонный оверхаузеровский магнитометр POS-1 для измерений модуля магнитной индукции геомагнитного поля F. Расположен вблизи абсолютного павильона №6 на высоте 7 метров;
- векторный протонный оверхаузеровский магнитометр POS-3. Компоненты вектора H, Z, F, динамический диапазон измерения 20000-100000 нТл, разрешающая способность 0.05-0.5 нТл, период оцифровки, 3х3 сек.;
- феррозондовая магнитовариационная станция EDA. Компоненты вектора D, H, Z, разрешающая способность 0.25 нТл, цена деления цифрователя 0.1 нТл, период оцифровки 5 секунд;
- протонный магнитометр G-856. Компоненты вектора F, динамический диапазон измерения, 20000-90000 нТл, цена деления цифрователя 0.1 нТл, разрешающая способность 1 нТл.

В результате обработки файлов получаем среднесекундные, среднеминутные, среднечасовые, среднегодовые значения компонент магнитного поля. Полученные среднегодовые значения компонент геомагнитного поля за 2021-2024 гг. приведены в таблице 1.

Таблица 1
Среднегодовые значения компонент геомагнитного поля обсерватории «Арти» за период с 2021 по 2024 гг.

Год	D	H, нТл	I	X, нТл	Y, нТл	Z, нТл	F, нТл
2021	13°53.2'	15918	73°41.3'	15453	3820	54392	56674
2022	13°57.3'	15894	73°44.1'	15425	3833	54478	56750
2023	14°00.8'	15882	73°46.2'	15409	3846	54559	56823
2024	14°03.6'	15877	73°47.7'	15402	3857	54634	56895

Благодаря накопленной большой базы данных есть возможность сравнения с мировыми моделями магнитного поля, такими как EMM, WMM, IGRF2020 (рис. 1). Модель WMM действует с 2020 г., модель EMM – с 2001 г. Модели вполне удовлетворительно описывают как величину, так и морфологию векового хода и могут применяться для расчетов в случае использования при проведении магнитных съемок или для приведения карт геомагнитного поля, полученных в прошлые годы к современному периоду времени в уральском регионе.

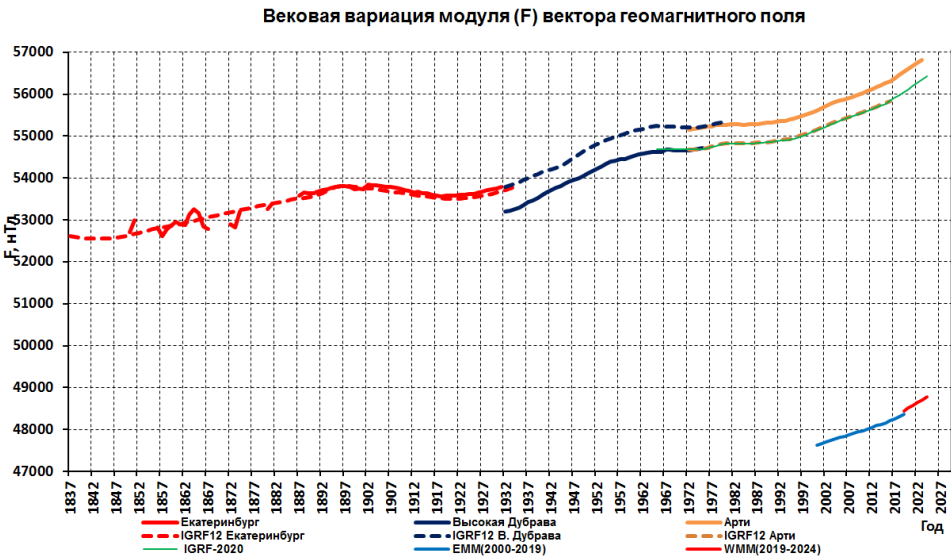


Рис. 1. Наблюдаемые и модельные (IGRF, WMM, EMM) значения векового хода компонент геомагнитного поля F в обсерватории «Арти» и их разница за период 2001-2024 гг.

В результате выполнения непрерывных наблюдений компонент геомагнитного поля D, H, Z, T определяются 3-х часовые K-индексы, из ряда наблюдений выделяются магнитные бури (рис. 2) и определяются их параметры. Выделение магнитных бурь из наблюдений – это процесс идентификации и анализа периодов значительного изменения магнитного поля, вызванных, как правило, воздействием солнечной активности, такой как солнечные вспышки или коронарные выбросы.

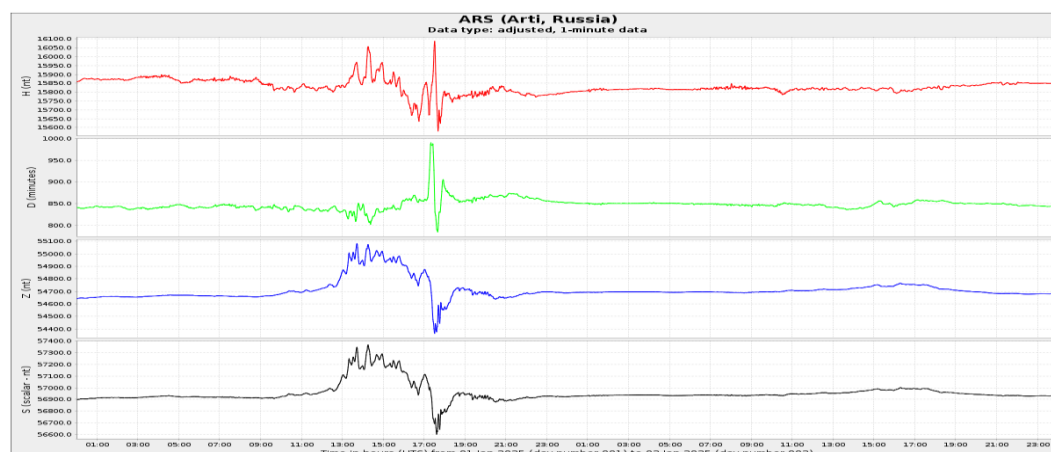


Рис. 2. Первичные магнитограммы станции ARS (Arti) с 31 декабря 2024 г. по 1 января 2025 г. очень большой магнитной бури №1, длительность 1 день 8 часов, $RD = 860$ нТл, $RH = 577$ нТл, $RZ = 719$ нТл

Разработана методика обработки получения данных, которые удовлетворяют требованиям INTERMAGNET. Базы данных находятся в открытом доступе. Найти информацию можно на сайте Института Геофизики имени Ю.П.Булашевича [3] и на сайте INTERMAGNET Data Viewer. Сделано сопоставление среднегодовых значений, полученных на обсерватории «Арти» и мировых моделей. Результаты геомагнитных наблюдений обсерватории «Арти» представляют собой важный вклад в изучение магнитного поля Земли. Эти исследования не только углубляют знания, но и имеют практическое значение для различных отраслей. Непрерывный сбор и анализ данных позволит в будущем продолжать исследования геомагнитного поля. Обсерватория участвует в международных научных проектах, что способствует интеграции данных на глобальном уровне.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГФ УрО РАН, регистрационный номер НИОКРТ 122062200030-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кусонский О.А. Геофизические обсерваторские исследования на Урале. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012, 280 с.
2. Jankowski J., Sucksdorff C. Guide for Magnetic Measurement and Observatory Practice / IAGA Working Group V-8: Analysis of the Global and Regional Geomagnetic Field and its Secular Variation. Boulder: NOAA Space Environment Center USA. Warszawa, 1996. 235 p.
3. Обсерватория АРТИ. Базы данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://igfuran.ru/struktura/observatoriya-arti/bazy-dannykh> (дата обращения: 20.02.2025)

OBSERVATION OF THE GEOMAGNETIC FIELD AT THE «ARTI» OBSERVATORY

Cherepanova Elena Anatolyevna
IGF UB RAS, Ekaterinburg

Summary. Continuous monitoring observations of the geomagnetic field in stationary conditions of geophysical observatories is an important component in the modern complex of environmental observations. Information about the observation methodology at the Arti Observatory is provided, a brief description of the

magnetometers used and some results of observing the geomagnetic field are given.

Key words: Secular variations, international models, magnetic storms.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Черепанова Елена Анатольевна

lena.cherepanova.91@mail.ru

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, инженер

Научный руководитель: Кусонский Олег Александрович, к.г.-м.н.

УДК 550.389.1

**АЭРОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭПИЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ
МАНЧАЖСКОЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ**

*Шибанов Ярослав Денисович, Данилова Евгения Антониновна
ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург*

Аннотация. Манчажская региональная магнитная аномалия была обнаружена в начале 30-х годов прошлого века и характеризуется увеличением аномального поля с темпом до 5 нТл/год. В 2021 году с целью дальнейшего изучения природы магнитного поля региональной аномалии сотрудниками Института геофизики Ю.П. Булашевича УрО РАН были выполнены новые аэромагнитные исследования по серии из трех профилей, пересекающих эпицентральною ее часть. В данной статье представлены результаты интерпретации данных по аэромагнитной разведке.

Ключевые слова: Манчажская региональная магнитная аномалия, аэромагнитная съемка, эпицентральноя часть, интерпретация, аномальное поле, разлом.

Манчажская региональная магнитная аномалия (РМА), обнаруженная в начале 30-х годов прошлого века наземными профильными съемками [12], характеризуется линейными размерами по нулевой изолинии около 100 км в поперечнике и интенсивностью T_a порядка 1200 нТл [2] (рис. 1). Ее возмущающий объект представлен блоками различной намагниченности, расположенными на глубинах от 4–5 до 18–20 км, с магнитной восприимчивостью 0,010–0,025 ед. СГС. Верхняя часть объекта представляет собой тело эллипсоидальной формы [3, 13], источником является горизонт железистых кварцитов [6].

В 1959 году в пределах Манчажской РМА была проведена аэромагнитная съемка ΔT масштаба 1:200000 на высоте 300 м с магнитометром АЭМ-49. В 1969 году при повторных наземных съемках была обнаружена тенденция к изменению во времени аномального магнитного поля Манчажской РМА [4, 5]. В пределах эпицентральной зоны РМА выделена протяженная область (40x10 км), где по 23 пунктам наблюдений зафиксировано увеличение аномального поля с темпом от 2 до 3 нТл/год. Исследователями было предположено, что аномалия векового хода имеет тектономагнитную природу и отражает динамику современных процессов в литосфере. Фактические данные, полученные по результатам многолетних наблюдений по площади и десятилетних измерений в обсерваториях Арти и Высокая Дубрава подтвердили тот факт, что аномальное магнитное поле в пределах Манчажской РМА монотонно увеличивается [9, 10]. С целью дальнейшего изучения природы аномалии в 2021 году сотрудниками Института геофизики Ю.П. Булашевича УрО РАН (Щапов В.А. и др.) были выполнены новые аэромагнитные исследования магнитного поля эпицентральной зоны Манчажской РМА на высоте порядка 700 м квантовым магнитометром. Нами проводилась интерпретация полученных данных, результаты которой представлены в настоящей работе. Аэромагнитная съемка магнитного поля эпицентральной зоны Манчажской РМА выполнялась на самолете Sokata MC-800 по трем профилям (рис. 1). На проходку каждого профиля было затрачено не более 30 минут. Вылеты производились из аэродрома в селе Михайловское. Во время полетов велась запись координат по системе GPS, времени проведения измерений и другой технической информации. Магнитометр был непосредственно интегрирован в хвост фюзеляжа самолета, что позволило минимизировать девиацию путем исключения влияния вибраций и покачиваний ветра, а также проводки самолета и намагниченных тросов.

Азимутальная погрешность не выходила за пределы 60° , прибор находился в нужном диапазоне температур (порядка 40°C).

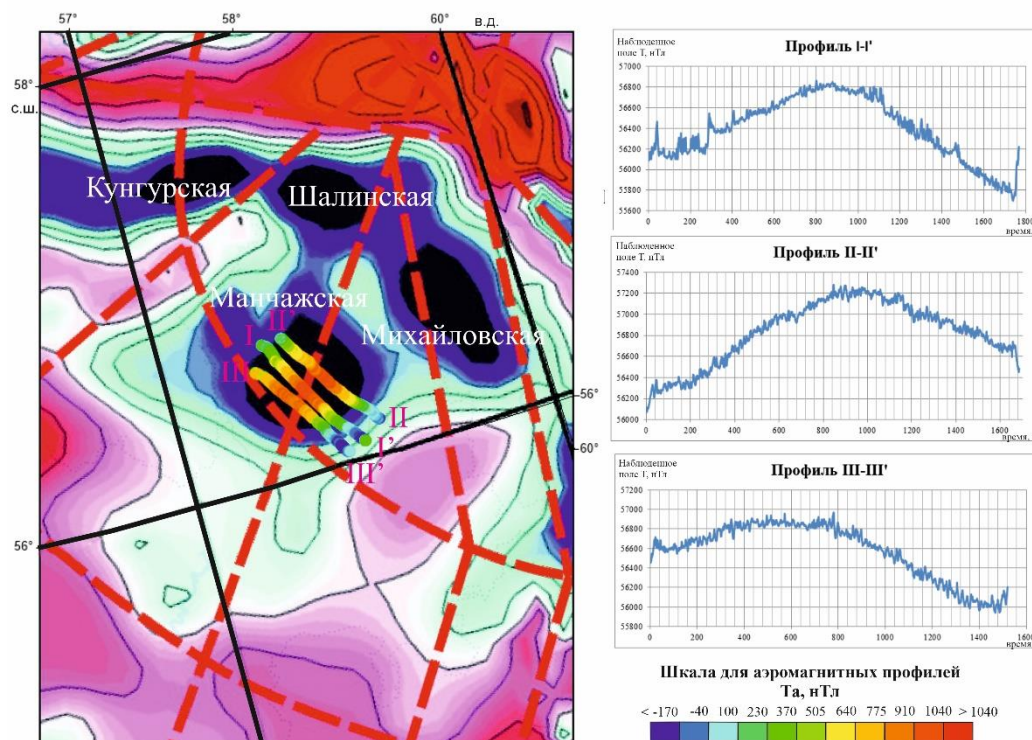


Рис. 1. Фрагмент карты магнитных аномалий EMAG2 [14] с нанесенными аномальными значениями поля T_a вдоль профилей аэромагнитных исследований. Графики распределения наблюдаемого поля T по профилям, пересекающим Манчажскую магнитную аномалию, представлены справа от карты. Красным пунктиром обозначены предполагаемые тектонические нарушения Свердловской кольцевой мегаструктуры [8]. Римскими цифрами обозначены профили аэромагнитных исследований

Учет вариаций при проведении аэромагнитных съемок осуществляется наземными магнитовариационными станциями (МВС). На момент исследований, одна такая станция была установлена на аэродроме в селе Михайловское. Она также служила точкой привязки поля для дальнейшего расчёта аномального поля Манчажской РМА.

На Михайловской МВС и в самолете использовался квантовый магнитометр, обеспечивающий высокую скорость измерений и высокую разрешающую способность. Ценой деления прибора составляет ± 0.01 нТл, а датчик был выполнен из цезия. Полный цикл измерений составляет одну секунду. В самолете, он был закреплён в хвосте фюзеляжа, и на всем протяжении исследуемых профилей магнитометр давал показания вплоть до выхода из аномального поля в нормальное.

Каждый профиль в длину составлял порядка 70 км, а скорость полета составляла порядка 160 км/час при высоте полетов порядка 700 м. Такая высота обуславливается большими значениями превышения рельефа местности вплоть до 350 м. Дискретность измерений составила 40 м.

Интерпретация данных аэромагнитных исследований проводилась в программных комплексах Surfer, ZondGM3D и GIS-Integro. Построены графики распределения аномального поля T_a по трем профилям, пересекающим Манчажскую магнитную аномалию в эпицентральной ее части (рис. 1), график значений поля T на вариационной станции во времени и проекция наблюдаемого поля T по данным трех профилей (рис. 2).

Расчёт аномального поля выполнялся посредством использования данных международной модели нормального поля Земли IGRF [15]. Далее выполнялось сопоставление полученных результатов с картой магнитных аномалий EMAG2 [14] (рис. 1) и новейшими данными по геологическому строению изучаемой территории.

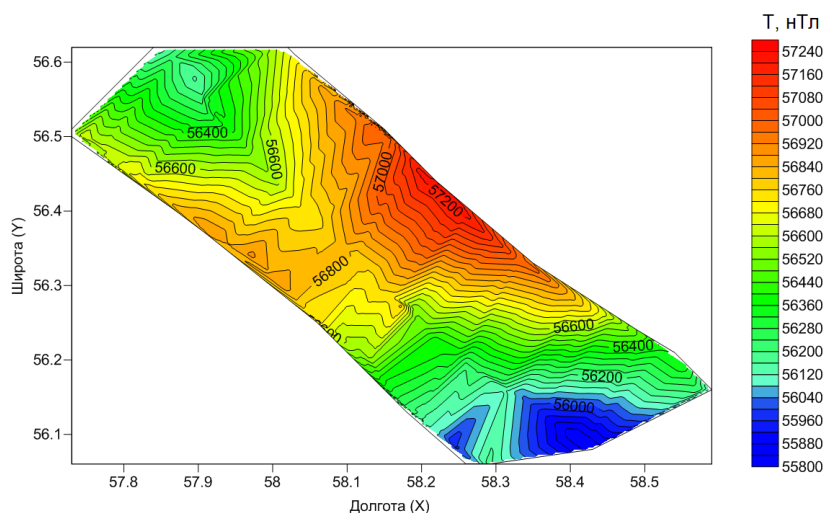


Рис. 2. Проекция наблюдаемого поля T в программе Surfer. Магнитное поле представлено изолиниями. Цветотоновая шкала демонстрирует значения наблюдаемого поля

Аэромагнитная съемка по всем трем профилям показала, что максимальные значения T_a приурочены к центральной части Манчажской РМА. На профиле II–II' они составили более 1040 нТл. Значение напряженности магнитного поля по сравнению с 1969 годом увеличилось на 2100 нТл. И наоборот, аномальное поле по сравнению с 1969 годом уменьшилось на 100 нТл. Исходя из данных по аэромагнитным исследованиям 2001–2002 годов [1], интенсивность аномалии составила порядка 1230 нТл, после чего интенсивность аномалии начала снижаться. Также находит свое объяснение предположение, что она имеет тектоническую природу и отражает динамику современных процессов в земной коре [4], ведь область максимальных значений Манчажской магнитной аномалии совпадает с предполагаемым радиальным разломом юго-западного простирания Свердловской кольцевой мегаструктуры диаметром 2400 км, выявленной Даниловой Е.А. в 2024 году как перспективный центр аккумуляции углеводородов [8] (рис. 1). Юго-западнее к зоне этого же тектонического нарушения, скорее всего, приурочена Оренбургская магнитная аномалия (52°с.ш. 54°в.д.), в пределах которой исследованиями прошлых лет также было зафиксировано увеличение магнитного поля (+5 нТл в год) [11]. Высокие значения T_a фиксируются также в начале профиля III–III' (около 775 нТл), приближенного к кольцевому разлому мегаструктуры.

Манчажская магнитная аномалия располагается в сложной тектонической обстановке. На северо-востоке к ней примыкают Кунгурская, Шалинская и Михайловская магнитные аномалии (рис. 1), также, вероятно, приуроченные к зонам разломов Свердловской кольцевой мегаструктуры. К юго-востоку от Манчажской РМА в зоне складчатых сооружений Урала простираются подтвержденные геологическими исследованиями [7] нарушения первого порядка юго-западных румбов со сдвигами в южную сторону: Зюраткульский, Верхнеайский, Североуралтайский. Юго-западное направление вышеуказанных тектонических дислокаций совпадает с простиранием предполагаемого радиального разлома Свердловской кольцевой мегаструктуры.

В результате интерпретации результатов аэромагнитных исследований в 2021 года были получены графики распределения наблюдаемого поля Т по трем профилям, пересекающим Манчажскую РМА, график значений поля Т на вариационной станции во времени и построена проекция наблюдаемого поля Т аномалии.

Аэромагнитная съемка показала, что максимальные значения T_a приурочены к центральной части Манчажской РМА. На профиле II–II' они составили более 1040 нТл. Значение напряженности магнитного поля по сравнению с 1969 годом увеличилось на 2100 нТл. Аномальное поле – уменьшилось на 100 нТл. В 2021 году зафиксировано снижение интенсивности аномалии по сравнению с данными начала 2000-ых годов, когда она составляла порядка 1230 нТл.

Максимальные значения T_a (более 1040 нТл) приурочены к эпицентральной части Манчажской РМА, где исследованиями прошлых лет было зафиксировано увеличение магнитного поля. Этой же зоне соответствует предполагаемый радиальный разлом юго-западного простирания Свердловской кольцевой мегаструктуры, выявленной Даниловой Е.А. в 2024 году как перспективный центр аккумуляции углеводородов. Высокие значения фиксируются также в начале профиля III–III' (около 775 нТл), приближенного к кольцевому разлому мегаструктуры.

Рекомендуем продолжить геолого-геофизическое изучение Манчажской РМА. В первую очередь здесь необходимо выполнить современные наземные магниторазведочные работы с применением новейшей аппаратуры, а также малоглубинное бурение с извлечением керна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бебнев А.С. Влияние Манчажской магнитной аномалии на вековой ход компонент геомагнитного поля на обсерватории «Арти» в период 1972–2004 гг. // Восьмая Уральская молодежная научная школа по геофизике: сборник научных материалов, [г. Пермь, 19-23 марта 2007 г.]. Пермь, 2007а. С. 25–29.
2. Бебнев А.С. Динамика интенсивности Манчажской магнитной аномалии в районе обсерватории Арти в период 1980–2005 гг. // Четвертые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. 2007б. С. 156–158.
3. Бугайло В.А., Дружинин В.С., Орлов Г.Г., Рыбалка Л.Ф. К вопросу о геологической природе Манчажской магнитной аномалии. – В кн.: Строение и развитие земной коры и структур рудных полей Урала по геофизическим данным. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1976, С. 29-36.
4. Булашевич Ю.П., Шапиро В.А. Аномальность векового хода геомагнитного поля в обсерватории Арти // Геомагнетизм и аэрономия. 1975. Т 15. № 2. С 382–383.
5. Булашевич Ю.П., Шапиро В.А. В кн.: Магнитные аномалии земных глубин. Киев: Наукова Думка, 1976, С. 26.
6. Буданов Н.Д., Орлов Г.Г. Магнитные аномалии в Среднем Предуралье и их практическое значение // сб. «Земная кора и структуры рудных полей Урала по геофизическим данным». Свердловск, УНЦ АН СССР, 1981, С.86-89.
7. Горожанкин В.Т. Горизонтальное движение земной коры и их структурные формы проявления, прогнозирование месторождений полезных ископаемых // Известия Уральского горного института. Сер.: Геология и геофизика. 1993. Вып. 2. С. 63–67.
8. Данилова Е.А. Свердловская радиально-концентрическая структура – центр аккумуляции углеводородов в зоне сочленения плит // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2024. № 1 (314). С. 27–36.
9. Кусонский О.А. Геофизические обсерваторские исследования на Урале. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 277 с.

10. Федорова Н.В. Исследование аномалии векового хода геомагнитного поля в обсерватории Арти и на Манчажском полигоне // Уральский геофизический вестник. 2005. № 1 (7). С. 61-69.
11. Шапиро В.А. Остаточная намагниченность – причина Манчажской региональной магнитной аномалии. Докл. АН СССР. 1981. Т 259. №6. С. 1339–1344.
12. Янковский Б.М. Тр.Нефт. геол.-разв. ин-та, сер. Б, 1932, вып. 30, С. 27.
13. Ярош А.Л., Дементьева Г.Д., Кассин Г.Г. Тр. Строение поверхностей переходного и базальтового слоев земной коры восточных районов Русской платформы // Тр. Свердл. горн. ин-та. 1968. Вып. 5. С. 5–20.
14. Meyer B., Saltus R., Chulliat A. EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arcminute resolution) Version 3. National Centers for Environmental Information, NOAA. Model [Electronic resource] 2017. DOI:10.7289/V5H70CVX (Access date: 20.02.2018).
15. Magnetic field calculators. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml?useFullSite=true#igrfwm>

AEROMAGNETIC SURVEY AT THE EPICENTRAL ZONE OF MANCHAZH REGIONAL MAGNETIC ANOMALY

*Shibanov Y.D., Danilova Y.A.
IGF UB RAS, Yekaterinburg*

Summary. In the early 1930s, Manchazh regional magnetic anomaly was first discovered by land surveys. Further, it is categorized by its yearly increase of the anomalous field by 5 nT/year. In 2021, in order to further study the regional anomaly's nature of the magnetic field, new aeromagnetic studies were carried out by employees of the *Institute of Geophysics UB of RAS* on a series of three profiles crossing its epicentral part. Interpretation results of the aeromagnetic survey are presented in this work.

Key words: Manchazh regional magnetic anomaly, aeromagnetic survey, epicentral part, interpretation, anomalous field, fault.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шибанов Ярослав Денисович

Yarilo-r@mail.ru

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, инженер

Научный руководитель: Данилова Евгения Антонинова, к.г.-м.н.

Данилова Евгения Антониновна

yevgeniya.antoninovna@bk.ru

ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург, с.н.с., к.г.-м.н.

УДК 550.34

К ВОПРОСУ ИЗМЕНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ВО ВРЕМЕНИ

¹*Асаншоева Шамсия Асаншоевна, ²Шозиёв Шокарим Првонашоевич,*³*Шозиёва Аклимо Парвонашоевна*¹*ХГУ имени М. Назаршоева, г. Хорог*²*ИГССС, г. Душанбе*³*ФМГУ имени М.В. Ломоносова, г. Душанбе*

Аннотация. В настоящее время весьма актуальной темой научных сообщений остаётся разработка компьютерных программ и алгоритмов анализа сейсмической активности по сейсмологическим данным. Для эффективной и простой визуализации используются «тепловые карты». В решении поставленной цели рассмотрим, как использовать цветные карты библиотеки Seaborn. Поэтому в статье проанализирована динамика сейсмической активности во времени на территории Таджикистана инструментами библиотек Seaborn программы Python.

Ключевые слова: Python, землетрясения, сейсмическая активность, Памиро-Гиндукуш, каталог землетрясений Таджикистана.

Введение. Важными характеристиками сейсмического режима, являются сейсмическая активность A , наклон γ графика повторяемости землетрясений и максимальное возможное (энергетический класс K_{max}) землетрясение. Г.А. Гамбурцевым неоднократно было подчеркнуто, что землетрясения не случайные события, а являются следствием тектонической жизни земной коры и подкорового вещества [1].

Традиционно активностью и значением тангенса угла наклона графика повторяемости характеризует сейсмический режим выбранной территории [2]. Под активностью в данном случае понимается среднее количество событий выше десятого энергетического класса за единицу времени. В отличие от стандартной сейсмической активности, используемый параметр не нормировался на сейсмогенный объём, предложенный в [3].

Источник данных. В качестве исходных данных использовался локальный каталог сейсмических событий за период 1991-2009 гг., составленный по данным сейсмических станций Таджикистана. Более подробно данные описаны в работе [4] согласно которой, представительная магнитуда указанного периода выше $K \geq 10$. Выборка данных за указанный период и заданной представительностью составляет 8496 сейсмических событий.

Методика анализа. Тепловая карта определяется как графическое представление данных с использованием цветов для визуализации значений матрицы. При этом для представления более распространенных значений или более высоких видов активности используются более яркие цвета, в основном красные, а для представления менее распространенных значений или значений активности предпочтительны более темные цвета. Тепловая карта также определяется как матрица затенения. Тепловые карты в Seaborn можно построить с помощью функции `seaborn.heatmap` [5].

Чтобы построить тепловую карту с помощью библиотеки Seaborn, нам сначала нужно импортировать все необходимые модули/библиотеки в нашу программу. Затем мы генерируем "матрицу" определенного размера, а затем строим тепловую карту с помощью функции `heatmap` и передаем набор данных в функцию.

Визуализирует двумерную таблицу в виде «тепловой карты». Тепловая карта определяется как графическое представление данных с использованием цветов для

визуализации значений матрицы. В этом случае для представления более распространенных значений или более высоких активностей используются более яркие цвета, в основном красноватые, а для представления менее распространенных значений или активностей предпочтительны более темные цвета. Тепловая карта также определяется именем матрицы затенения. Тепловые карты в Seaborn можно построить с помощью функции `seaborn.heatmap()`. Аннотации тепловой карты - отличный способ показать дополнительную информацию о строках и столбцах тепловой карты. Как правило, для отображения значений данных поверх тепловой карты мы устанавливаем параметру «`ann`» значение «True», но, если вы хотите добавить текст в аннотации ячеек. Типичное применение — визуализация корреляции между признаками.

Для примера загрузим данные о количестве сейсмических событий за каждый месяц с 1991 по 2009 год.

Двумерную таблицу месяца-год для землетрясений создадим с помощью функции `pivot_table`. Подробнее об этом можно будет найти в материалах по Pandas [5].

Результаты и обсуждения. Вариации сейсмической активности (количества землетрясений в единицу времени) представлены на рисунке 1. Помимо ожидаемого увеличения активности на рисунке видна задержка максимума активности относительно начала крупных событий (Ванджское, Нурское и Пакистанское). После 2000 года сейсмическая активность в районе высокая, но до этого была слабой. Сейсмическая активность существенно усилилась в начале 2003 года, а следующий скачок наблюдается в 2008 году. Объяснить высокую сейсмическую активность, возникшую после 2000 года связано с крупными землетрясениями. Существуют и другие гипотезы, например, авторы [6,7] связали сейсмическую активность с взаимодействием разломов.

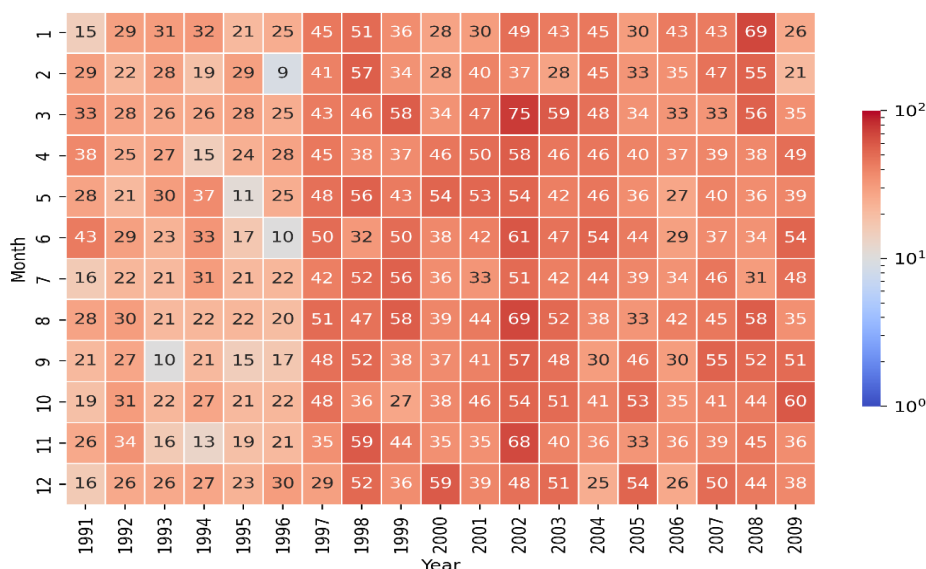


Рис. 1. Вариация сейсмической активности во времени по наблюдаемым данным на территории Таджикистана без разделения событий на коровые и глубокофокусные с классом ($K \geq 10$) за 1991–2009 гг.

В остальное время года на рисунке 1 видны три пика активности: с августа по сентябрь, в декабре-январе и весной с марта по апрель. В первом случае летний, августовский максимум значительно превосходит активность во все другие месяцы. Во втором случае максимальным является весенний пик, сместившийся с марта на апрель, а два остальных пика — в август и декабре-январе — имеют примерно одинаковую величину.

Сезонная сейсмическая активность по нашим данным требует дополнительного анализа. Сильнейшие землетрясения (Ванджское, Нурское и Пакистанское и др. с $M > 5$)

инициировали сейсмическую активность. Отметим, что повышенная активность после события 1997 года обнаруживается здесь несмотря на то, что афтершоки этого события были удалены из рабочего каталога.

В работе [8] показано, что оценки сейсмической активности чувствительны к процедуре декластеризации каталога. Поэтому каталог землетрясений был очищен от афтершоков крупных землетрясений. Изменения во времени помесечных чисел ощутимых землетрясений представительностью $K \geq 10$ приведены на рисунке 1.

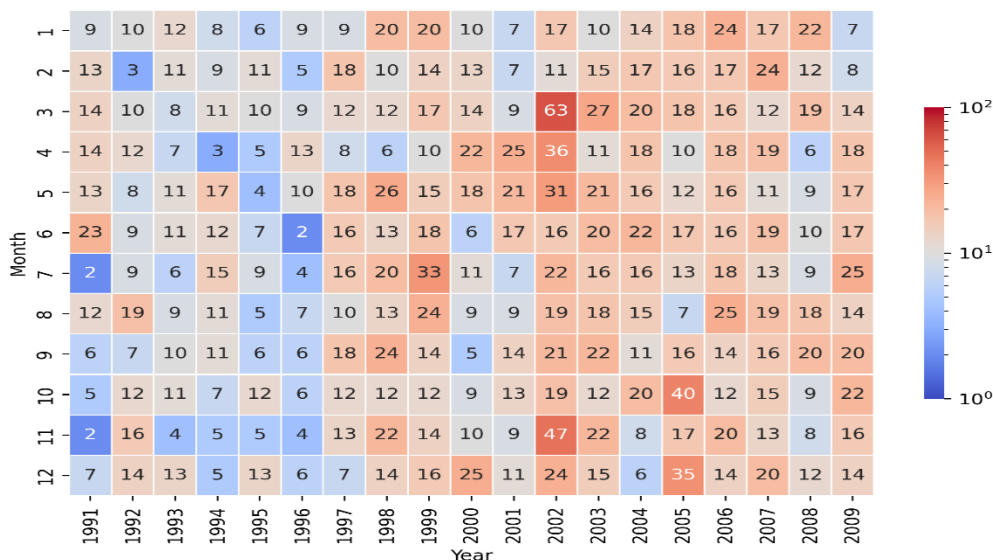


Рис. 2. Вариация сейсмической активности во времени по наблюдаемым данным на территории Таджикистана для коровых событий с классом ($K \geq 10$) за 1991–2009 гг.

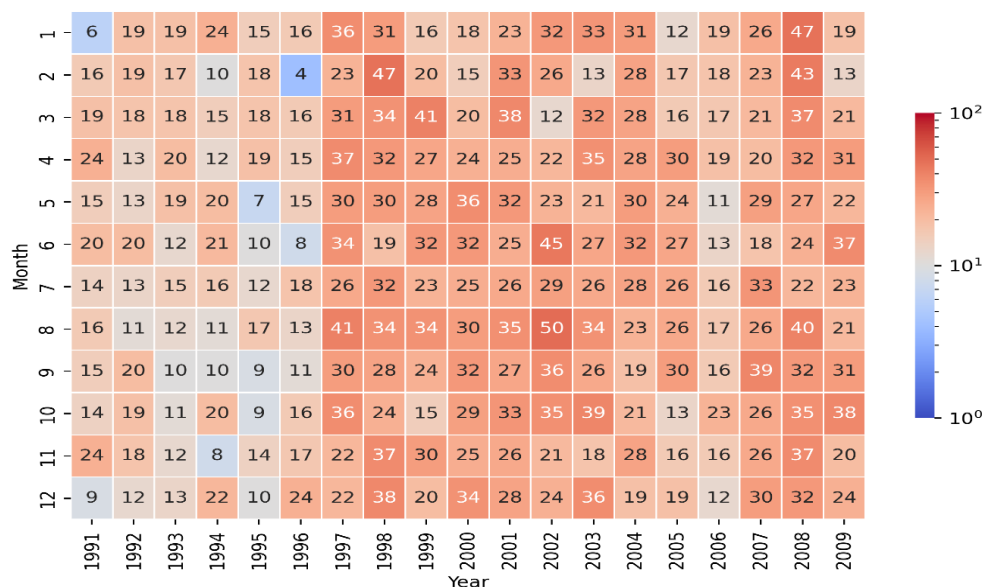


Рис. 3. Вариация сейсмической активности во времени по наблюдаемым данным на территории Таджикистана для глубокофокусных событий с классом ($K \geq 10$) за 1991–2009 гг.

Следуя фактам о пространственном существовании коровых и мантийных землетрясений [9] на территории Таджикистана, нужно проанализировать сейсмическую активность во времени по отдельности: для коровых ($h < 70$ км) землетрясений и мантийных глубокофокусных землетрясений Памиро-Гиндукуша ($h \geq 70$ км). Сопоставление

полученных графиков (рис. 2, 3) показывает явное чередование коровых и глубокофокусных событий Памира-Гиндукуша, что говорит о том, что сейсмичность не только меняется по месяцам, но и от года в году. Такая природа не противоречит результатам работ по сезонной вариации землетрясений и взаимозависимости по разломам Памира [10,11].

Сейсмическая активность смещается по разломам на протяжении всего периода наблюдений, поэтому данная задача должна изучаться для отдельных разломов. Для разных типов «тепловых карт» можно использовать разные виды цветowych карт, чтобы детально изучить изменения сейсмической активности во времени и в пространстве.

Заключение. В настоящее время обнаружены три пика активности: с августа по сентябрь, в ноябре-декабре и весной с марта по апрель. Сейсмическая активность для мартовского максимума значительно превосходит активность во все другие месяцы. Максимальным является весенний пик, смесивший с марта на апрель, а два остальных, в августе и декабре-январе, имеют примерно одинаковую величину. Сильнейшие землетрясения региона (Пакистанское 2008, Ванджское 2010 и др. с $M > 5$) инициировали сейсмическую активность. Сезонная сейсмическая активность по этим данным требует дополнительного анализа в основе создания приложений для автоматизированного анализа временных данных из каталога сейсмических событий, код которого построен с помощью инструментов программы Python.

С поступлением дополнительной информации в каталог землетрясений Таджикистана и развитием кода не исключаем получения детальной картины сейсмической активности как долгосрочного прогностического индикатора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамбурцев Г.А. Избранные Труды. – М: Издательство АН СССР, 1960, 463 с.
2. Смирнов В.Б. Закономерности и природа переходных режимов сейсмического процесса: диссертация ... доктора физико-математических наук: 25.00.10 // [Место защиты: Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова]. – Москва, 2018. – 444 с.
3. Ризниченко Ю.В. Метод суммирования землетрясений для изучения сейсмической активности // Изв. Академии наук СССР. Серия геофизическая, 1964, № 7, – С. 969–977.
4. Шозиёв Ш.П., Айдаров Ф.А., Смирнов В.Б. Оценка представительности данных каталога землетрясений Таджикистана // Геофизические исследования, Том 17, номер 2, 2016, – С.54–65.
5. 10 Ben Stephenson. The Python Workbook: A Brief Introduction with Exercises and Solutions, Springer, 2015, –165 p.
6. Мирзоев К.М., Бабаев А.М., Ачилов Г.Ш., Михайлова Р.С. Сейсмогенные зоны Памира // Геология и геофизика Таджикистана. – Душанбе: «Дониш», 1985, –С.117–138.
7. Шозиёв Ш.П. Сезонный ход землетрясений по сейсмогенным зонам Памира // Материалы V международной молодежной конференции «современные техника и технологии в научных исследованиях», 24 – 25 апреля 2013 г., – г. Бишкеке, –С.110–112.
8. Van Stiphout T., Schorlemmer D., Wiemer S. The effect of uncertainties on estimates of background seismicity rate // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2011. – Vol. 101. – № 2. – doi: 10.1785/0120090143
9. Лукк А.А., Нерсесов И.Л. Глубокие Памиро-Гиндукушские землетрясения // В сб. Землетрясения в СССР в 1966 году. – М: Наука, 1970, – С.118–132.
10. Маламуд А.С., Николаевский В.Н. Циклы землетрясений и тектонические волны. Душанбе: «Дониш», 1989, –141 с.

11. Шозиёев Ш.П., Айдаров Ф.А. Анализ цикличности землетрясений Таджикистана // Научная конференция молодых учёных и аспирантов ИФЗ РАН, – ИФЗ РАН, Россия, 25-26 апреля 2016. – С.75.

TO THE ISSUE OF CHANGING SEISMIC ACTIVITY OVER TIME

¹*Asanshoyeva Shamsia Asanshoyeva*, ²*Shozyoyev Shokarim Prvonashoyevich*,

³*Shozyoyev Aklimo Parvonashoyeva*,

¹*KhSU named after M. Nazarshoyev, Khorog*

²*IGSSS, Dushanbe*

³*FMSU named after M.V. Lomonosov in Dushanbe*

Summary. Currently, the development of computer programs and algorithms for analyzing seismic activity based on seismological data remains a very relevant topic for scientific communities. For effective and simple visualization, "heat maps" are used. In solving this goal, we will consider how to use color maps of the Seaborn library. Therefore, the article analyzes the dynamics of seismic activity over time in Tajikistan using the tools of the Seaborn libraries of the Python program.

Key words: Python, earthquakes, seismic activity, Pamir-Hindu Kush, earthquake catalog Tajikistan.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Асаншоева Шамсия Асаншоевна

shamsiyaasanshoeva@gmail.com

ХГУ имени М. Назаршоева, заведующая кафедры общей физики

Шозиёев Шокарим Парвонашоевич

shokarim@mail.ru

ИГССС, с.н.с., к.ф.-м.н.

Шозиёева Аклимо Парвонашоевна

aklimoparvonashoevna@mail.ru,

ФМГУ им. М.В. Ломоносова, преподаватель

УДК 550.34 551.24

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, СВЯЗАННЫХ С СИЛЬНЕЙШИМИ ЧИЛИЙСКИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ НАЧАЛА XXI В., ПО ДАННЫМ ГНСС

*¹Щевьёва Надежда Сергеевна, ^{1,2}Владимирова Ирина Сергеевна**¹ИО РАН, г. Москва**²ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск*

Аннотация. В работе исследованы деформации земной поверхности Чилийского побережья до и после ряда сильнейших землетрясений начала XXI века. Поле скорости плоской деформации рассчитывается на основе метода Шена по данным непрерывных ГНСС-измерений на территории Чили и Аргентины. Установлено, что в период, предшествующий землетрясению, вблизи очага наблюдается рост скорости деформации. В период, следующий за землетрясением, наблюдается уменьшение скоростей деформации в ближайшей окрестности его очага, что отражает постепенную релаксацию накопленных напряжений. Очаги землетрясений формируются вблизи области выраженных градиентов полей величин, отражающих деформации земной поверхности.

Ключевые слова: Чилийская зона субдукции, сильнейшие землетрясения, деформации земной поверхности, спутниковая геодезия, метод Шена, региональные разломы.

Современная геодинамика Чилийского побережья определяется субдукцией литосферной плиты Наска на севере и Антарктической плиты на юге под Южноамериканскую плиту. В северной и центральной частях региона скорость субдукции достигает 67–69 мм/год, а её направление почти перпендикулярно Перуанско-Чилийскому желобу [7].

Помимо непосредственно процесса субдукции, на особенности региональной сейсмотектоники Чилийского побережья влияют крупные геологические структуры, вызывающие перераспределение напряжений в земной коре. В первую очередь, это зоны разломов Вальдивии и Мокка, глубинные разломы Санта-Мария и Ланалуэ, подводные хребты Икике и Хуан Фернандес, область полуострова Арауко, трансформный разлом Челленджер [1, 3].

Чилийское побережье является крайне сейсмически активным регионом Земли. В прошлом десятилетии в Чилийской зоне субдукции произошло три сильных землетрясения: Мауле магнитудой $M_w=8.8$ 27 февраля 2010 г. в Центральном Чили, Икике магнитудой $M_w=8.1$ 1 апреля 2014 г. в Северном Чили, Ильяпель магнитудой $M_w=8.3$ и 16 сентября 2015 г в Центральном Чили. Возникновение сразу трех сильнейших землетрясений за такой короткий временной период говорит о сейсмической активизации региона [4].

Построение поля скорости поверхностной деформации позволяет выявить особенности тектонического строения исследуемого региона и протекающих в нем геодинамических процессов. Исходные данные для оценки скорости деформации представляли собой поле векторов скоростей смещения точек земной поверхности на Чилийском побережье, полученных по результатам анализа данных Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС), предоставленных Геодезической обсерваторией Невады [2]. Оценки скоростей смещения ГНСС-станций были получены с использованием регрессионного анализа временных рядов [5].

В силу небольшого количества и неравномерности распределения ГНСС-станций для получения непрерывных полей величин, характеризующих деформацию земной поверхности, необходимо использовать методы интерполяции исходных дискретных данных. В регионе исследования количество пунктов наблюдения начало увеличиваться в 2010 году после землетрясения Мауле. До этого события количество ГНСС-станций было мало, что делает невозможным получение непрерывных полей величин в период до 2010 года.

Для расчёта компонент тензора деформаций в работе использован метод Шена [6]. В качестве регулярной сетки измерений выбрана прямоугольная сетка. Согласно методу Шена предполагается, что деформация однородна в пределах некоторой окрестности расчетной точки. Искомые горизонтальные компоненты скорости смещения U_x , U_y , компоненты тензора скорости деформации $\dot{e}_{xx}$, $\dot{e}_{xy}$, $\dot{e}_{yy}$ и скорость вращения ω в центрах выбранной сетки связаны со скоростью смещения ГНСС-станций V_x^i , V_y^i по формуле:

$$\begin{pmatrix} V_x^i \\ V_y^i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 10\Delta x_i \Delta y_i & 0 & \Delta y_i \\ 0 & \Delta x_i \Delta y_i & -\Delta x_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ \dot{e}_{xx} \\ \dot{e}_{xy} \\ \dot{e}_{yy} \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_x^i \\ \varepsilon_y^i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_x^i = \sigma_x^i \cdot \exp(2\Delta x_i^2 / \sigma_D^2)$ и $\varepsilon_y^i = \sigma_y^i \cdot \exp(2\Delta y_i^2 / \sigma_D^2)$ – взвешенные ошибки скоростей V_x^i , V_y^i , σ_x^i и σ_y^i – ошибки измерения компонент X и Y скорости смещения, соответственно, Δx_i – X и Δy_i – Y – расстояние по оси X и по оси Y от i-ой точки наблюдения (x_i , y_i) до искомой точки (X, Y), σ_D – параметр, контролирующий вес измерения (distance decaying constant, DDC).

Параметр DDC выбирается исходя из решаемой задачи. Из-за больших расстояний между точками наблюдения параметр DDC был выбран равным 50 км. DDC уменьшает влияние на полученные оценки измерений на ГНСС-станциях, находящихся на большом расстоянии от точки расчёта. В вычислениях используются станции, расположенные в радиусе 2DDC от точки расчёта. Приведенное выше матричное уравнение решается методом наименьших квадратов.

Рассчитанные компоненты тензора скорости деформации позволяют определить удлинения и укорочения вдоль главных направлений скорости плоской деформации. Для этого тензор приводится к главным осям:

$$(\dot{e}_1) = \begin{pmatrix} \dot{e}_1 & 0 \\ 0 & \dot{e}_2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где диагональные компоненты равны собственным значениям тензора и могут быть рассчитаны по формулам:

$$\dot{e}_{1,2} = \frac{(\dot{e}_{xx} + \dot{e}_{yy}) \pm \sqrt{4\dot{e}_{xy}^2 + (\dot{e}_{xx} - \dot{e}_{yy})^2}}{2}, \quad (3)$$

где $|\dot{e}_1| > |\dot{e}_2|$.

Собственные векторы тензора задают главные направления скорости плоской деформации. Собственные векторы рассчитаны с помощью функции `linalg.eig()` Python-библиотеки `numpy`. Азимут большей главной оси деформации θ_2 рассчитывается по формуле:

$$\theta_2 = \frac{180^\circ}{\pi} \arccos(\vec{n} \cdot \vec{S}_1), \quad (4)$$

где $\vec{n}$ – единичный вектор, направленный на север, $\vec{S}_1$ – собственный вектор тензора скорости деформации, совпадающий с большей главной осью деформации.

Ось максимальной скорости деформации сдвига направлена под углом 45° к главным осям деформации. Величину максимальной скорости деформации сдвига можно найти по формуле:

$$\gamma \frac{\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2}{2} \max. \quad (5)$$

Скорость плоской дилатации I_1 и интенсивность скорости плоской деформации I_2 вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} I_1 &= \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2, \\ I_2 &= \dot{\epsilon}_1 \cdot \dot{\epsilon}_2. \end{aligned} \quad (6)$$

В качестве примера результатов расчета на рисунках 1 и 2 приведены временные вариации полей скорости максимальной деформации сдвига и скорости плоской дилатации в районе землетрясения Икике 2014 г. за годовые интервалы.

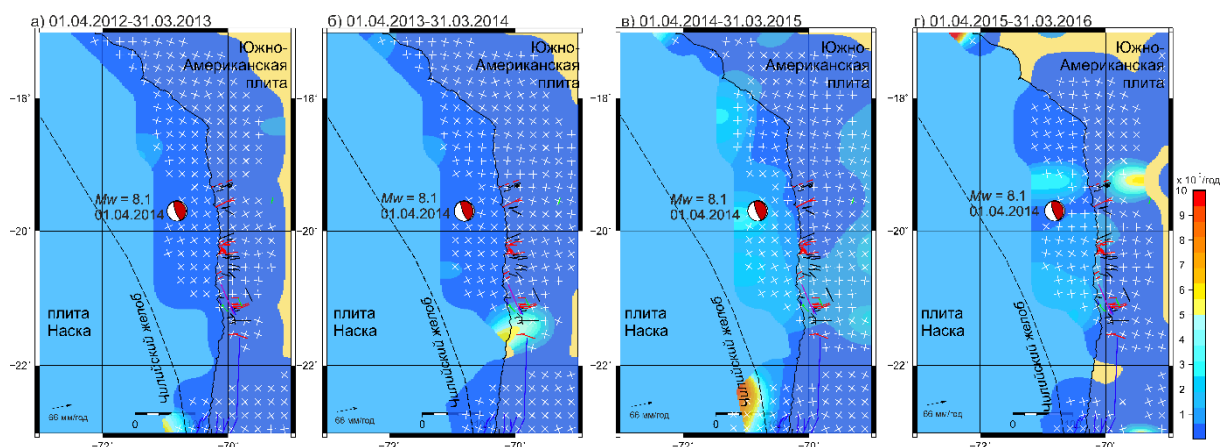


Рис. 1. Поле скорости максимальной деформации сдвига, рассчитанное за годовые интервалы. Белые черточки показывают направление осей скорости максимальной деформации сдвига. Цветными линиями показаны разломы разных типов: красный – взброс, синий – сброс, зелёный – правосторонний сдвиг, фиолетовый – правосторонний сдвиг-взброс, черный – тип не определён

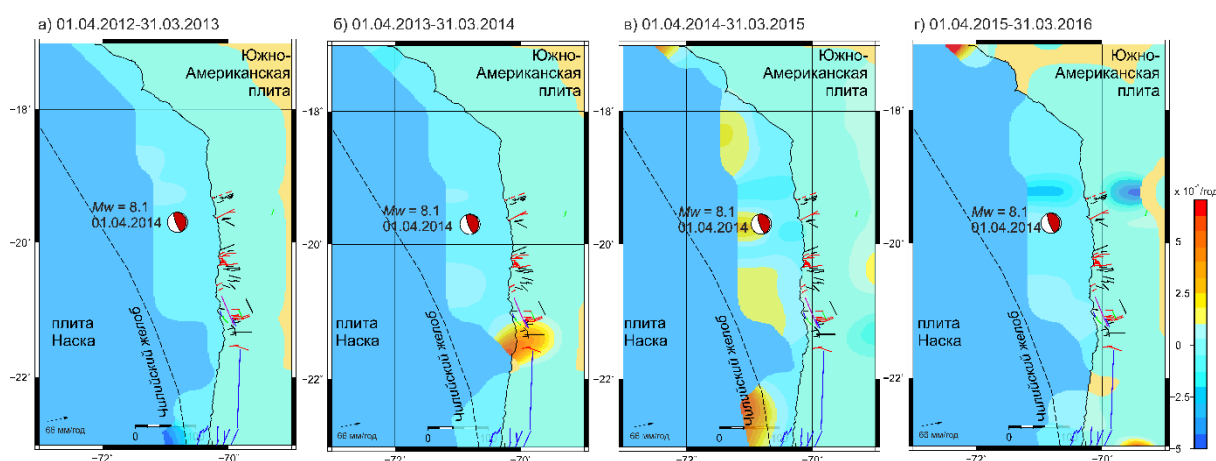


Рис. 2. Поле скорости плоской дилатации, рассчитанное за годовые интервалы. Цветными линиями показаны разломы разных типов: красный – взброс, синий – сброс, зелёный – правосторонний сдвиг, фиолетовый – правосторонний сдвиг-взброс, черный – тип не определён

Из рисунков 1а и 2а видно, что за два года до сильнейшего землетрясения Икике 2014 г. деформация на всей рассматриваемой площади практически однородна. Однако в год, предшествующий землетрясению, к югу от очага готовящегося события

появилась аномальная зона высоких скоростей деформации (рис. 1б и 2б). Очаг землетрясения Икике сформировался на границе области высокого градиента скоростей деформации. В течение двухлетнего периода, следовавшего за землетрясением Икике, наблюдается постепенное падение (рис. 1г и 2г) изначально высоких (рис. 1в и 2в) скоростей деформации в ближайшей окрестности его очага. Следовательно, поля скоростей максимальной деформации сдвига и скорости плоской дилатации отражают процессы подготовки землетрясения Икике и релаксации среды после него.

При этом направление одной из осей скорости максимальной деформации сдвига (рис. 1) субпараллельно направлению субдукции и простирацию региональных разломов, секущих край Южно-Американской плиты. Это вполне закономерно, поскольку характер деформирования рассматриваемой области по большей части определяется именно процессом погружения плиты Наска под Южно-Американскую плиту. Однако выраженного влияния региональных разломов на вариации полей скорости деформации в данном случае не выявлено. Вероятно, это связано с тем, что пункты ГНСС-наблюдений на Чилийском побережье расположены на достаточно больших расстояниях друг от друга, что не позволяет проследить эффекты более мелкого масштаба.

Вследствие погружения океанической плиты под континентальную зона субдукции представляет собой трехмерную структуру. Однако анализ полей скорости плоской деформации позволяют выделить в деформационном поле аномалии, связанные с подготовкой сильнейших землетрясений и релаксацией среды после них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Active faulting and heterogeneous deformation across a megathrust segment boundary from GPS data, south central Chile (36–39°S). Moreno M.S., Klotz J., Melnick D., Echtler H., Bataille K. // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008. V. 9 (12).
2. Blewitt G., Hammond W. C., Kreemer C. Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science // *Eos*. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <http://geodesy.unr.edu/index.php> (дата обращения: 10.10.2023).
3. Contreras-Reyes E. Structure and tectonics of the Chilean convergent margin from wide-angle seismic studies: a review // *The Evolution of the Chilean-Argentinean Andes*. Cham: Springer, 2018. P. 3–29.
4. Focal depth, magnitude, and frequency distribution of earthquakes along oceanic trenches. Hammed O.S., Popoola O.I., Adetoyinbo A.A. et al. // *Earthq Sci*. 2013. №26, P. 75–82.
5. Nikolaidis R. Observation of geodetic and seismic deformation with the global positioning system: Ph.D. Thesis. // University of California, San Diego, 2002. 305 p.
6. Shen Z.-K., D. D. Jackson, and B. X. Ge. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101, P. 27,957–27,980.
7. Tectonic Processes along the Chile Convergent Margin. Ranero C.R., von Huene R., Weinrebe W., Reichert C. // In O. Oncken, et al. (Eds.), *The Andes—Active subduction orogeny*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. P. 91–121.

ANALYSIS OF EARTH SURFACE DEFORMATIONS ASSOCIATED WITH THE STRONGEST CHILEAN EARTHQUAKES IN THE EARLY 21TH CENTURY, BASED ON GNSS DATA

¹*Nadezhda Shcheveva*, ^{1,2}*Irina Vladimirova*

¹*IO RAS, Moscow*

²*GS RAS, Obninsk*

Summary. The paper addresses the deformations of the earth surface of Chilean coastline prior and after a series of the strongest earthquakes of the early 21th century. The plane strain velocity field was calculated using the Shen method based on continuous GNSS measurements in Chile and Argentina. It is found that in the period preceding the earthquake, an increase in the strain rate is observed near the source. In the period following an earthquake, a decrease in the strain rate is observed in the nearest vicinity of its source, which reflects a gradual relaxation of accumulated stresses. Earthquake sources are formed near the region of intense gradients of the deformation fields.

Key words: Chilean subduction zone, strong earthquakes, deformation of the earth's surface, satellite geodesy, Shen method, regional faults.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Щевьёва Надежда Сергеевна

Nadezhda.Shchevyeva@yandex.ru

ИО РАН, г. Москва, аспирант, инженер

Научный руководитель: Владимирова Ирина Сергеевна, к.ф.-м.н.

Владимирова Ирина Сергеевна

vladis@gsras.ru

ИО РАН, г. Москва, с.н.с., старший преподаватель

ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, в.н.с.

СОДЕРЖАНИЕ

ОГАНЕСЯН А.О., АВДАЛЯН А.Г. Разломно-блоковая структура и сейсмичность Армении.....	3
АНВАРОВА С.Г. Количественная оценка повторяемости землетрясений в зоне влияния Каркидонского водохранилища	8
АНДРИАНОВ С.В., МИНГАЛЕВА Т.А. Диагностика состояния тоннельных конструкций посредством анализа изменений спектра собственных колебаний.....	13
БАБУРКИН И.А., КРЯЧКОВ И. В. АНДРЕЕВ Д.О. Рациональный комплекс геофизических методов для проведения сейсмического микрорайонирования с целью обеспечения водоснабжения населённого пункта на примере городского округа г. Сочи.....	19
БАНАДЫСЕВА М.Д. МИРОШНИЧЕНКО Ю.В. ШАЯПОВА Р.В., ОСИПОВ А.С. Использование классификации для выделения перспективных областей при поиске месторождения золота карлинского типа.....	24
БИРЮЛИН С.В. Особенности проведения мониторинга объёмной активности радона в различных геодинамических условиях.....	29
БУХТЕЕВ Е.М. Эффективный алгоритм решения прямой задачи ВЭЗ методом линейной фильтрации	34
ГОДУНОВА А.С., РАХМАТУЛЛИН В.С., АХМЕТШИН Р.Р., БАРАНОВ Д.С. Сравнение принципов построения и результатов геологического моделирования при использовании отечественного и зарубежного программного обеспечения.....	39
ГРЕКОВ Е.М. Анализ сейсмического режима процесса интрузии перед извержением вулкана Августина 2006-го года.....	46
ДОБРОВОЛЬСКАЯ А.Е. Особенности обработки данных повторяющихся трехмерных сейсмических съемок.....	51
ЕЗИМОВА Ю.Е. Линеаментный анализ южной части Печоро-Кожвинского мегавала.....	55
ЖАББОРОВ У.Ч. УГЛИ, ХАМИДОВ Л.А. Геолого-геофизическая изученность зоны влияния Чарвакского водохранилища Узбекистана.....	59
ЖИДКИХ О.С., БУЛУЧЕВСКАЯ П.А., СОТНИКОВ А.А. Методика обработки данных для создания синтетической карты магнитного поля территории Воронежского кристаллического массива.....	65
ИНДАКОВ Г.С., КАЗНАЧЕЕВ П.А. Анализ данных лабораторных экспериментов по термическому воздействию на образцы метаморфизированных песчаников	69
КИРСАНОВ С. К. Обоснование режимных сейсморазведочных наблюдений на основе оценки качества данных.....	74
КОКШАРОВ В. В., НАБАТОВ В.В. Выявление опасных участков при контроле состояния целиков и водозащитной толщи на гипсовых рудниках	78
КУЗНЕЦОВА К.И., ХОЗЯИНОВ М.С. Использование гидродинамической модели нефтяного месторождения для расчета фильтрации закачиваемой воды по высокопроницаемым прослоям.....	82
ЛИЧНАЯ А.Е. Оценка влияния параметров рудного тела (индукционной массы и глубины залегания) на электромагнитные сигналы ЗСБ	87
МЕДВЕДЕВ П.Д., КОЧЕТОВ М.В. Комплексные геофизические исследования при решении инженерно-геологических задач на шельфе Карского моря.....	92
МИЗЁВА Е.В. Уточнение калибровочной кривой шкалы локальных магнитуд для Уральского региона	98
МИНГАЛЕВА Т.А., КУЗНЕЦОВ М.А. Анализ корреляционных зависимостей между данными геофизических исследований и результатами лабораторного	

опробования грунта для участков, длительное время загрязненных нефтепродуктами	103
МОЛОКОВА А.П. Изучение эффекта ближней зоны для землетрясений вблизи Ключевской группы вулканов.....	109
МУРШУДОВ Н.И.-Л., ИСМАИЛОВА А.Т. Вариации геофизических полей в Шамаха-Исмаиллинской сейсмогенной зоне.....	113
НАБАТОВ В.В. Комплексирование признаков, вычисляемых по результатам измерений с помощью геофизических методов при выявлении полостей в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов.....	118
ОНАМУН Д.Л.А. Применение сейсмических атрибутов для изучения турбидитовых песков конуса выноса в Гвинейском заливе.....	122
ПАЩЕНКО Р.А. Анализ акустических сигналов в горных породах и перспективы автоматизации исследований	127
ПУСТОВАЯ Т.Л. создание цифровых баз данных геомагнитного поля на обсерватории «Арти».....	130
РАХИМОВ Э.А. Методика обработки поверхностных волн, зарегистрированных с целью изучения состояния заобделочного пространства, на примере участка Нижегородского метрополитена.....	135
РЫЖОВ Н.В. Экспериментальная оценка помехоустойчивости эволюционных алгоритмов при решении обратной задачи ВЭЗ.....	140
СИТНИКОВА Е.А. Анализ гравитационных эффектов моделей астроблем.....	145
СЛОКВЕНКО В.В. Геолого-геофизическая характеристика золоторудного месторождения Сухой Лог (Патомское нагорье).....	150
СОТНИКОВ А.А., ЖИДКИХ О.С. Петромагнитная характеристика пород Курского мегаблока Воронежского кристаллического массива.....	155
ТЕРЕЩЕНКО К.В., БЕЛЯЕВА В.А., МАТИНОВИЧ Ю.В., РАЕЦКАЯ О.С. Экспериментальные работы по поиску пустот под асфальтовым покрытием	159
ФАКАЕВА Н.Р., ГОРНОСТАЕВА А.А., ХАЦКЕВИЧ Б.Д. Тепловые характеристики снежного покрова (на примере Екатеринбурга).....	165
ФОМИНА С.А. Прогностические аномалии параметров b-value и RTL сейсмического режима в южной Калифорнии	170
ХАРИН А.Ю., ИЛЬИН В.В. Анализ петрофизических моделей габбродолеритов Новогольского и Смородинского комплексов (Воронежский кристаллический массив) с применением метода группового учета аргументов.....	175
ХАЦКЕВИЧ Б.Д., ГОРНОСТАЕВА А.А., ФАКАЕВА Н.Р. Геотермические исследования скважин: перспектива прецизионных методов	179
ЧЕБЫКИНА Е.В. Вертикальное зондирование ионосферы над Уралом.....	184
ЧЕРЕПАНОВА Е.А. Наблюдение геомагнитного поля на обсерватории «Арти».....	189
ШИБАНОВ Я.Д., ДАНИЛОВА Е.А. Аэромагнитные исследования в эпицентральной части Манчжурской региональной магнитной аномалии.....	193
АСАНШОЕВА Ш.А., ШОЗИЁЕВ Ш.П., ШОЗИЁЕВА А.П. К вопросу изменения сейсмической активности во времени.....	198
ЩЕВЬЁВА Н.С., ВЛАДИМИРОВА И.С. Анализ деформаций земной поверхности, связанных с сильнейшими чилийскими землетрясениями начала XXI в., по данным ГНСС.....	203

Научное издание

Двадцать Шестая Уральская молодежная
научная школа по геофизике

Сборник научных материалов

Рекомендовано к изданию Ученым советом «ГИ УрО РАН»
Протокол № 5 от 18.04.2025

Компьютерная верстка: Верхованцев Ф.Г., Злобина Т.В., Гусева Н.С.



Сдано в набор 21.04.2025. Подписано в печать 22.04.2025.

Формат 60х90/8.