

Санкт-Петербургский государственный университет
Евро-Азиатское геофизическое общество –
Санкт-Петербургское отделение
Федеральное государственное унитарное научно-производственное предприятие «Геологоразведка»

Геофизические методы исследования Земли и ее недр

**МАТЕРИАЛЫ VIII МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНКУРС-КОНФЕРЕНЦИИ
МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ
«ГЕОФИЗИКА-2011»
3–7 октября 2011 г.**

**MATERIALS OF THE VIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC
AND TECHNICAL CONFERENCE-COMPETITION
OF YOUNG SPECIALISTS
“GEOPHYSICS-2011”
October 3–7, 2011**

Под редакцией *С. В. Аглонова, В. П. Кальварской, В. Н. Трояна*

Санкт-Петербург 2012

ББК 26.2
УДК 550.3
Г-35

*Печатается по решению
Ученого совета геологического факультета
Санкт-Петербургского государственного университета*

**Г-35 Геофизические методы исследования Земли и ее недр:
Материалы VIII Международной научно-практической конкурс-конференции
молодых специалистов «Геофизика-2011». 3 – 7 октября 2011 г.**
/Под ред. С. В. Аплонова, В. П. Кальварской, В. Н. Трояна. – СПб.: СПбГУ, 2012. –152 с.,
ил. 124

ISBN 978-5-98340-286-7

В сборнике представлены работы молодых специалистов – участников VIII Международной научно-практической конкурс-конференции «Геофизика-2011» (Санкт-Петербург, СПбГУ, 3–7 октября 2011 г.). Они отражают современное состояние исследований в области физики Земли; прикладной геофизики; региональной, поисково-разведочной геофизики, включая нефтегазовую и рудную составляющие; морской и полярной геофизики; инженерной геофизики и геофизики в гидрогеологии и экологии. Представлены инновационные разработки в области влияния космических факторов на геофизические процессы, изучения предвестников землетрясений. Большое внимание уделяется созданию технических и методических средств, обеспечивающих проведение геологоразведочных работ и повышение их эффективности; математическому и физическому моделированию; геологическому истолкованию геофизических данных.

Значительная часть материалов связана с решением геологоразведочных задач на основе комплексных геофизических исследований (гравитационных, магнитных, сейсмических и электрических полей) на нефтегазоперспективных и рудоперспективных площадях. Преобладает сейсморазведочная тематика. Рассматриваются примеры геофизического мониторинга в целях экологической безопасности народонаселения.

Публикуемые материалы представляют научный и практический интерес для специалистов, занимающихся изучением физики Земли и геологических недр. Они могут быть полезны в профессиональном плане, особенно для молодых специалистов, включая студентов и аспирантов геофизической специальности.

ББК 26.2
УДК 550.3

© Авторы сборника, 2012
© С.-Петербургский государственный университет, 2012

ISBN 978-5-98340-286-7

Предисловие

VIII Международная научно-практическая конкурс-конференция молодых специалистов «Геофизика-2011» прошла в Санкт-Петербурге в годовщину 300-летия со дня рождения Великого россиянина – Михаила Васильевича Ломоносова.

М. В. Ломоносов (1711 – 1765) – первый русский ученый, естествоиспытатель мирового значения. Будучи мыслителем, историком, художником, поэтом, он способствовал созданию современного русского литературного языка. Главной своей специальностью М. В. Ломоносов считал горное дело и геологию. Им заложены основы физической химии, открыта атмосфера на планете Венера, дано описание строения Земли, описание происхождения многих полезных ископаемых и минералов. В 1746 – 47 гг. в стенах Санкт-Петербургского государственного университета по инициативе М. В. Ломоносова был введен курс физики на русском языке (Санкт-Петербургские ведомости, № 50, 24 июня 1746 г.). По своей сути, Михаил Васильевич был первым геологом-геофизиком.

Конференция молодых специалистов проводилась 3–7 октября 2011 г. традиционно на физическом факультете СПбГУ под сводами НИИФ им. В.А. Фока (Петергоф).

Организаторы конференции:

- Санкт-Петербургский государственный университет
- Евро-Азиатское геофизическое общество – Санкт-Петербургское отделение
- Федеральное государственное унитарное научно-производственное предприятие «Геологоразведка».

Проведению мероприятия содействовали:

- Министерство образования и науки РФ
- Министерство природных ресурсов и экологии России
- Федеральное агентство по недропользованию Минприроды России.

В форуме участвовало более 100 молодых специалистов: студенты и аспиранты 7 вузов страны (СПбГУ (ТУ), СПбГУ, РГУНГ, НГУ, Томский ГУ, Пермский ГУ и Грозненский ГНТУ); представители 9 институтов РАН (ИФЗ РАН, СПбФ ИЗМИРАН, ИГ СО РАН, Ги УрО РАН, ИНГГ СО РАН, НИЦ им. Курчатова, Институт озероведения, ИПФ РАН, Карельский НЦ РАН) и ИГФ НАН Украины; сотрудники ряда отраслевых предприятий России (ВСЕГЕИ, Севморгео, Нарьян-Марсейсморазведка, ПМГРЭ, ООО НПЦ «Геостра»). Географически они представляли 10 городов России (Москву, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Новосибирск, Пермь, Петрозаводск, Нижний Новгород, Уфу, Томск, Грозный) и столицу Украины – Киев.

3 октября напутственными словами конференцию открыл сопредседатель Оргкомитета форума Владимир Николаевич Троян, д-р ф.-м.н., зав. кафедрой «Физика Земли» физического факультета СПбГУ.

С приветствиями к молодым специалистам обратились: И. М. Кропачев (ректор СПбГУ); от Минприроды России – Н. В. Милетенко (и.о. директора Департамента государственной политики и регулирования в области геологии и недропользования).

Теплые слова в адрес участников и организаторов конференции «Геофизика-2011» были высказаны устно или поступили в виде письменных обращений от Евро-Азиатского геофизического общества, Российской Академии наук, Санкт-Петербургского государственного горного технического университета, Пермского госуниверситета, ФГУП «ВНИИОкеан-геология», ФГУНПП «Геологоразведка» и «Севморгео».

Во всех выступлениях, представленных в различной форме, конкурс-конференция оценивалась как событие, которое по праву считается значимым для молодых специалистов России и продолжает славную традицию северной столицы «поддержания преемственности, сохранения научных школ и направлений».

На пленарном заседании были заслушаны доклады по важнейшим геофизическим событиям 2009–2011 гг.:

- доклад, посвященный 100-летию российской электроразведки – А. А. Ковтун (д-р ф.-м.н., профессор физического факультета СПбГУ);
 - доклад «Геофизика, геодинамика и поисковые работы на нефть и газ» – С. В. Аплонов (д-р г.-м.н., декан геологического факультета СПбГУ);
 - доклад «Катастрофические землетрясения в последнее десятилетие в контексте мировой сейсмичности» – Т. Б. Яновская (д-р ф.-м.н., профессор физического факультета СПбГУ).
- Все доклады с интересом были выслушаны и оживленно обсуждались аудиторией.

В рамках Пленарного заседания прошла презентация Благотворительного фонда «Дом геолога».

С 4 по 6 октября проводились заседания конференции и конкурс докладов молодых специалистов по четырем основным направлениям:

- Физика Земли – секция I (руководители В. Н. Троян, д-р ф.-м.н., зав. кафедрой СПбГУ, профессор, академик РАЕН; С. С. Крылов, канд. ф.-м.н., доцент СПбГУ).
- Региональная и поисково-разведочная геофизика – секция II (руководители А. С. Долгаль, д-р ф.-м.н., профессор Пермского государственного университета; А. К. Сараев, канд. г.-м.н., доцент СПбГУ).
- Морская и полярная геофизика – секция III (руководители С. В. Аплонов, д-р г.-м.н., декан геологического факультета, профессор СПбГУ; Ю. В. Рослов, канд. ф.-м.н., директор по геофизике ООО «Сейсмо-Шельф»).

- Инженерная и скважинная геофизика, геофизика в гидрогеологии и экологии – секция IV (руководители К. В. Титов, д-р г.-м.н., профессор СПбГУ; С. Н. Мулев, заведующий лабораторией ОАО «ВНИМИ»).

Было заслушано и участвовало в конкурсе 52 доклада (из 58 заявленных). Каждый второй доклад представлен двумя авторами. В некоторых, предлагающих, как правило, инновационные решения, число авторов часто доходило до 4 и даже 5.

Распределенные по секциям работы представлялись в виде устных и стендовых докладов. Их обсуждение и оценка осуществлялись Конкурсной комиссией из 25 специалистов, включая 15 докторов наук, представляющих ВУЗы и отраслевые предприятия Минприроды РФ, в основном базирующиеся в Санкт-Петербурге. Конкурс проводился по пятибалльной шкале, при оценке учитывались следующие критерии: актуальность тематики, новизна исследований, объемы и эффективность внедрения, качество и наглядность оформления доклада, умение формулировать задачу и защищать основные положения работы.

Представленные на конференции «Геофизика-2011» доклады молодых специалистов по тематике в большей своей части были нацелены на развитие различных направлений науки и практики, формирование новых геолого-геофизических технологий, создание средств их реализации. Много работ было посвящено решению задач геологоразведочного производства, обеспечивающих возможность перехода от качественных к количественным результатам на базе совершенствования обработки и интерпретации полученных материалов.

Наряду с заседаниями секций была организована работа семинаров и круглых столов.

Семинар «Проблемы ВГКШ и пути их разрешения» был проведен А. Л. Пискаревым (д-р г.-м.н., главный научный сотрудник ФГУП «ВНИИОкеангеология»).

Семинар по теме «Реконструктивная томография магнитного и гравитационного полей» – А. И. Атаковым (ведущий научный сотрудник ФГУНПП «Севморгео»). Рассмотрение вопросов по проблемам фактически переросло в дискуссионный круглый стол по правомерности и корректности используемой терминологии («томография») по отношению к потенциальным полям.

Обстоятельно и с большим количеством практических примеров были представлены материалы семинара «Применение геофизических методов в мониторинге геодинамических процессов» (руководитель С. Н. Мулев, заведующий лабораторией ОАО «ВНИМИ»).

По результатам проведенного конкурса работ молодых специалистов призовые места распределились следующим образом.

I место

• «Оценивание проницаемости горной породы по микросейсмическим записям». Авторы: Шигапов Р. А., Александров Д. В. (СПбГУ) – секция I.

• «Применение модели капиллярного давления в концепции эффективного порового пространства при геологическом моделировании коллекторов нефти и газа». Авторы: Дешенков И. С., Петров А. Н., Кожевников Д. А., Коваленко К. В. (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина) – секция II.

• «Выявление перспективного на нефть и газ объекта в Северо-Чукотском прогибе на основе совместного анализа данных отраженных и преломленных волн (по материалам опорного профиля 5-AP). Автор Половков В. В. (ФГУНПП «Севморгео») – секция III.

• «Изучение связи микросейсмической активности с отработкой продуктивных пластов на Верхнекамском месторождении калийных солей». Авторы: Верхоланцева Т. В., Шулаков Д. Ю. (Перм.ГУ, Горный институт УрО РАН) – секция IV.

II место

• «Идентификация ударных волн в солнечном ветре, возникающих в процессе пересоединения». Авторы: Винникова Е. О., Сасунов Ю. Л. (СПбГУ) – секция I.

• «Аппроксимация как инструмент успешного решения прикладных геофизических задач». Авторы: Пугин А.В., Симанов А.А., Мичурин А.В., Новикова П.Н. (ГИ УрО РАН); Шархимуллин А. Ф. (Перм.ГУ) – секция II.

• «Применение моделирования волновых полей для повышения достоверности результатов интерпретации сейсмической инверсии в Сирачойских отложениях северной части Тимано-Печорской провинции». Автор Буторин А. В. (ОАО «Нарьян-Марсейсморазведка») – секция III.

• «Совместная интерпретация каротажных данных ВИКИЗ и БКЗ с использованием фильтрационного моделирования». Авторы: Глущенко М. Н., Соколов А. Ю. (ИНГГ СО РАН) – секция IV.

III место

• «Сейсмичность на Верхнекамском месторождении калийных солей (2008 – 2010 гг.)». Авторы: Белевская М. А., Верхоланцев Ф. Г. (сектор сейсмического мониторинга Уральского региона, Геофизическая служба РАН) – секция I.

• «Прогноз структуры и коллекторских свойств пород в окколоскважинном пространстве на основе данных ВСП, НВСП». Авторы: Иркабаев Д. Р., Адиев А. Я. (ООО «НПЦ «Гео-стра») – секция II.

• «Окаймляющая зона в коллекторах как прямой признак их нефтеносности». Авторы: Сметанина Л. В. (ИНГГ СО РАН); Михайлов И. В. (НГУ, ИНГГ СО РАН) – секция II.

• «Обоснование моделей пористости при каротаже альб-аптских отложений Терско-Сунжинской нефтегазоносной провинции». Автор Эзирбаев Т. Б. (Грозненский государственный научно-технический институт) – секция IV.

На заключительном Пленарном заседании победители конкурса-конференции «Геофизика-2011» были награждены именными сертификатами.

Экспертами отмечены 17 работ, перспективных в диссертательном отношении. К публикации рекомендовано 34 доклада. Предложения к внедрению результатов в геологоразведочное производство одобрены в 6 работах и такое же количество работ рекомендовано Конкурсной комиссией для включения в состав лекционных вузовских курсов.

За прошедшие 15 лет деятельность форума «Геофизика» в определенной степени характеризуют успехи его «выпускников» в области науки, образования и производства в сфере геологии, геофизики и геохимии. К настоящему времени более 20% участников (~150) занимают ключевые позиции в отрасли, а также обеспечивают высокопрофессиональное проведение геологоразведочных работ и подготовку отраслевых кадров в вузах страны

(Н. Ю. Бобров, М. П. Кашкевич, Л. Ф. Московская, Р. Л. Певзнер, В. А. Тарасов, К. В. Титов, И. Г. Шнурман, Ю. А. Агафонов, А. К. Алексеева, Д. А. Амосов, А. И. Атаков, А. В. Бакулин, А. Л. Борисик, Я. В. Ванярхо, Е. Г. Васильева, И. В. Виноградова, Н. Н. Винничук, К. Г. Вискунова, Ю. Г. Гуторов, К. О. Дудкин, А. В. Екименко, Н. Н. Ефимова, М. К. Кашик, В. И. Кашкевич, Д. И. Киргизов, Д. И. Князев, И. А. Козлова, А. А. Корженевский, Д. Г. Кушнир, В. А. Лифантьев, Е. Л. Мазо, Л. Р. Маловичко, В. Н. Масолов, И. Б. Мовчан, М. С. Петрищев, А. В. Тарасов, В. В. Травников, С. В. Попов, В. А. Путанс, А. В. Чугунов, М. В. Шарлов и многие другие. К настоящему времени 82 из них защитили кандидатские, 9 – докторские диссертации.

Международный характер форума «Геофизика» в значительной мере влияет на состояние и развитие геолого-геофизического направления в ближнем и дальнем зарубежье.

- Аль-Хатиб-Моххамед Ханай возглавляет службу ГИС в Канадском филиале фирмы Шлюмберже;

- Алдас Г., Кадиоглу С., Улугергерли Е. обеспечивают решение вопросов инженерной геологии и участвуют в учебном процессе национального университета Турции;

- Бакулин А. В. (проживает в США) – консультант фирм Шлюмберже и Шелл по вопросам сейсморазведки;

- Вэнь-Байхун является зав.отделом Китайской национальной нефтяной компании;

- Газдова Р. (Пражский Карлов университет) и Вильгельм И. (Институт гидрогеологии, инженерной и прикладной геофизики, Прага) продолжают исследования в области малоглубинной сейсморазведки;

- Кашубин А. С. участвует в образовательном процессе в Упсальском университете (Швеция) и продолжает исследования в области сейсморазведки;

- Константарас А. И., Фоускитакис Г. Н., Макрис И.Р, Валлилатос Ф. Н. продолжают исследования электрических полей с целью прогнозирования землетрясений на территории Западного Крита по программе, финансируемой Европейским социальным фондом (Греция).

К положительным явлениям форума «Геофизика-2011» следует отнести возросшую активность академических организаций, от которых участвовало 20 молодых специалистов (17 докладов); кафедрой физики Земли СПбГУ представлены 14 докладов.

Большое удовлетворение Программная и Конкурсная комиссии получили от докладов молодых специалистов из Перми, в которых вопросы моделирования, обработки, интерпретации потенциальных полей «разгрызаются» ими, как тонкокорые орешки, и всегда с оценкой геологической эффективности полученных результатов. Поставленные геолого-геофизические задачи авторами разрешаются корректно, аккуратно, с оценкой положительных сторон и ограничений предлагаемых способов решений. Молодежный коллектив возглавляет научный руководитель, профессор Александр Сергеевич Долгаль, д-р ф.-м.н.

Представляется, что сложившийся в Перми на базе альянса Пермского ГУ и ГИ УрО РАН коллектив молодых специалистов является надежной основой современной развивающейся научно-производственной школы, которую можно отнести к достоянию геофизики XXI века. От всей души мы поздравляем с этим пермяков. Желаем дальнейших творческих успехов и процветания.

В целом конференция показала, что, несмотря на сложные финансово-экономические условия, отечественная геофизика располагает потенциалом кадров, способным развивать геофизическую науку, вести исследования как фундаментального, так и отраслевого характера, внедрять их результаты в практику.

Большое спасибо организациям СПбГУ, ФГУНПП «Геологоразведка», «Севморгео», ЦГИ «ТЕТИС», ВНИМИ, ПМГРЭ, ВНИИОкеангеология, ВСЕГЕИ, РФФИ, НОЦ «Нефтегазовый центр» МГУ, поддержавшим форум. Особая благодарность за спонсорскую поддержку компании SHELL Exploration и Европейской Ассоциации геоученых и инженеров EAGE.

I. Физика Земли

I. Physics of the Earth

УДК 550.34

М. А. Белевская, Ф. Г. Верхоланцев (ССМ Уральского региона, ГС РАН, Пермь, Россия)
СЕЙСМИЧНОСТЬ НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ (2008–2010 гг.)

M. A. Belevskaya, F. G. Verkholtantsev (SSM of the Ural region, GS RAS, Perm, Russia)
SEISMITY IN VERKHEKAMSKOYE POTASH MINES (2008-2010)

В статье приведены факты, подтверждающие влияние удаленных землетрясений на сейсмичность в подработанном соляном массиве. Проанализировано воздействие сильных землетрясений с очагами из различных сейсмоактивных районов. Получено соотношение между интенсивностью триггерных процессов в руднике и эпицентрными расстояниями инициировавших их землетрясений.

Ключевые слова: триггерные процессы, сейсмичность в шахте.

The article shows the facts which confirms the influence of teleseismic distant earthquakes to seismicity at undermined salt massif. The input of massive earthquakes with seismic focuses of different seismic zones is analized. The correlation between intensity of trigger process in potash mines and epicentral distances of earthquakes is established.

Keywords: trigger processes, seismicity in the mine.

Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей (ВКМКС) расположено на севере Пермского края, в зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и складчатого Урала. Важным отличием данного месторождения является сравнительно неглубокое залегание калийно-магниевого толщи (300–400 м), в связи с чем одним из важнейших вопросов, связанных с безопасной добычей полезного ископаемого, является сохранение целостности водозащитной толщи.

Одним из методов исследований и контроля за напряженно-деформированным состоянием подработанного массива является сейсмологический мониторинг [1, 2]. Он позволяет следить за развитием деформационных процессов и в опережающем режиме принимать меры по снижению нагрузки на водозащитную толщу [3]. Основными критериями контроля являются плотность потока сейсмической энергии и пространственное расположение очагов сейсмических событий (рис. 1, цв. вкл. стр. 116).

В калийных выработках выделение сейсмической энергии зависит от их возраста. Отмечается ее плавное нарастание в течение 10 лет после отработки, впоследствии энергия остается практически постоянной на протяжении длительного времени, а затем плавно убывает. Таким образом, можно принять, что на большинстве рудников, где имеются участки, отработанные десятки лет назад, общий уровень сейсмичности является более-менее постоянным, поэтому любое аномальное (в 2–3 раза) повышение сейсмической активности в течение ограниченного промежутка времени всегда требует объяснения.

Как нами было показано ранее [4, 5], для условий ВКМКС одним из факторов, повышающих уровень сейсмичности в узком временном промежутке (1–2 суток), является триггерный механизм. Прохождение упругих волн от удаленных землетрясений нарушает геодинамическое равновесие в напряженно-деформированном соляном массиве, что влечет за собой повышение выделения сейсмической энергии в ослабленных зонах.

Эффект триггерной сейсмичности известен давно [6, 7], во многих случаях он достаточно хорошо изучен [8, 9]. В случае с ВКМКС выявление и анализ данного эффекта осложняется несколькими факторами. Во-первых, количество сейсмических событий в калийных

рудниках сравнительно невелико, поэтому для получения устойчивого результата необходимы длительные ряды наблюдений. А во-вторых, месторождение расположено в слабосейсмичном районе и удалено на значительное расстояние от основных сейсмоактивных зон Земли. Это существенно сокращает количество землетрясений, которые можно использовать для анализа.

Опираясь на предыдущие исследования, для анализа мы выбрали землетрясения с магнитудой более 5. Землетрясения выбирались из различных сейсмоактивных районов Земли на эпицентральных расстояниях до 35° . Также был рассмотрен вариант влияния сильных землетрясений ($M \geq 6,5$) всего земного шара. Изменения сейсмичности в руднике анализировались во временном интервале шириной 120 ч (60 ч – до времени прихода волны от землетрясения и 60 ч – после). В качестве меры влияния использовалась величина R_E , равная отношению суммарной энергии событий в руднике, выделившейся до и после землетрясения.

Таблица

Значение коэффициента R_E для различных регионов

Регион	Количество землетрясений за 2008–2010 гг.	Диапазон эпицентральных расстояний	R_E
JAN MAYEN ISLAND REGION	37	27,6 – 32,1	1,35
EASTERN MEDITERRANEAN SEA	63	26,1 – 33,3	1,40
SOUTHERN IRAN	146	28,8 – 33,3	1,32
PAKISTAN	114	24,3 – 33,3	1,64
XINJIANG	169	18,0 – 27,9	2,15
Все зоны ($\Delta < 35^\circ$, $M > 5$)	529	18,0 – 33,3	1,67
Все землетрясения ($M > 6,5$)	108		1,04

Всего за период с 2008 по 2011 гг. было отобрано более 500 землетрясений. Общее количество сейсмических событий, произошедших за этот период, составило 1702. Как показал анализ (таблица) влияние землетрясений со всего мира однозначно установить сложно, так как величина R_E близка к единице. Для близких расстояний это влияние более ощутимо и меняется в диапазоне от 1,32 до 2,15. Рассматривая влияние относительно близких землетрясений ($\Delta \leq 35^\circ$), более детально можно установить, что между отношением R_E и эпицентральной расстоянием имеется обратная связь (рис. 2, цв. вкл. стр. 116), которая в первом приближении может быть выражена зависимостью $R_E = -0,1\Delta + 4,3$. Если экстраполировать данную зависимость в сторону увеличения Δ , то можно отметить, что влияние удаленных землетрясений на сейсмичность в руднике стоит ожидать только на эпицентральных расстояниях до 3800 км.

Полученные результаты позволяют подтвердить присутствие триггерной сейсмичности в рудниках ВКМКС. Причем влияние удаленных землетрясений из различных районов неодинаково. Наиболее заметный прирост локальной микросейсмической активности дают очаги с $M \geq 5$ на эпицентральных расстояниях до 3800 км.

Список литературы

1. Маловичко А. А. Сейсмический контроль за динамикой развития аварийной ситуации на калийном руднике // Горные науки на рубеже XXI века. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – С. 171–176.

2. Malovichko A. A. Comprehensive monitoring of the large mine-collapse at the Upper Kama potash deposit in Western Ural // Rockbursts and seismicity in mine. Dynamic rock mass response to mining. The South African institute of mining and metallurgy. – Johannesburg. – 2000. – P. 309–312.

3. Шулаков Д. Ю. Совместное использование данных сейсмического и маркшейдерского мониторинга для контроля деформационных процессов в подработанном массиве района // Проблемы безопасности и совершенствования горных работ. – Пермь: ГИ УрО РАН, 1999. – С. 246–248.

4. Верхованцев Ф. Г. О влиянии крупных землетрясений на сейсмическую активность в рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей (на примере ОАО «Сильвинит») // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 30–34.

5. Белевская М. А. Удаленные землетрясения как фактор, влияющий на сейсмическую активность в подработанном соляном массиве // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 21–25.

6. Николаев А. В. Об инициировании землетрясений землетрясениями // Геофизика. – 1991. – № 3. – С. 320–324.

7. Anderson G. Seismicity in the western Great Basin apparently triggered by the Landers, California, earthquake, 28 June 1992 // Bulletin of the Seismological Society of America. – Jun. 1994. – V. 84. – P. 863–891.

8. Сорокин Л. В. Инициирование землетрясений сейсмическими волнами // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия Физика. № 1 (13). – 2005. – С. 141–148.

9. Pankow K. L. Triggered Seismicity in Utah from the 3 November 2002 Denali Fault Earthquake // Bulletin of the Seismological Society of America. – Dec. 2004. – V. 94. – P. 332–347.

10. Jiang T. Remotely Triggered Seismicity in Continental China following the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake // Bulletin of the Seismological Society of America. – Nov. 2010. – V. 100. – P. 2574–2589.

11. Верхованцев Ф. Г. Об инициировании землетрясениями сейсмических событий в калийном руднике // Современные проблемы сейсмологии, гидрогеологии и инженерной геологии. – Узбекистан, Ташкент: Институт сейсмологии им. Г. А. Мавлянова, 2010. – С. 17–20.

Рецензент – доктор физико-математических наук Т. Б. Яновская.

ВОЛНА КРАУКЛИСА В ТРЕХСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ

KRAUKLIS WAVE IN A TRILAYER

Волна Крауклиса в трехслойной модели имеет различные режимы распространения, которые зависят от параметров модели. Полученные асимптотические решения являются хорошим приближением точных решений, аналитическое условие – точной оценкой перехода от режима распространения в случае тонких пластин к волне Крауклиса для случая полупространств. Условия резонанса для волны Крауклиса подтвердили существование резонансов в диапазоне сейсмических частот в лабораторном эксперименте.

Ключевые слова: волна Крауклиса, режимы распространения, критерий перехода, низкочастотные резонансы.

Krauklis wave in a trilayer has different propagation regimes depending on model parameters. The obtained asymptote solutions revealed good coincidence with the exact solutions. Obtained analytical conditions accurately evaluate the transitions between different asymptote. With decreasing thickness of the elastic plate wave dispersion increases and the phase velocity decreases. Resonance conditions for the Krauklis wave have confirmed the existence of resonances within the seismic frequency range at a laboratory scale.

Keywords: the Krauklis wave, propagating regimes, transition condition, low-frequency resonances.

Введение

Проблема распространения упругих волн в слоистых средах интенсивно изучается в сейсмологии, акустике, физиологии и физике материалов в течение последних полутора столетий. Отдельную историю имеет и проблема трехслойной среды в случае, когда слой, заполненный флюидом, заключен между двумя упругими средами. Как показал Крауклис [1], в такой модели возникает «жидкостная» волна, скорость которой стремится к нулю по мере стремления частоты к нулю. Крауклис получил свои результаты в аналитической форме в общем случае двух полупространств с различными упругими параметрами. Аналогичные результаты были получены отдельно в акустике [2] и в сейсмологии [3]. Первые авторы численно исследовали задачу, когда упругие слои имели конечную толщину (пластины), и обнаружили «медленную» жидкостную волну. Позднее Coulouvat и др. [4] получили аналитическое выражение для скорости жидкостной волны, используя вариационный подход с предположением тонкости пластин, называя эту моду струйной волной. Bell и Fletcher [5] утверждают, что медленная жидкостная волна, образующаяся в ушной улитке, является основным механизмом передачи энергии акустических волн к нейронам и, таким образом, ответственна за физиологию восприятия слуха животными и человеком. Акустическая волна длиной в 15 м способна вызвать резонанс в ушном канале, размеры которого порядка десяти микрон.

Медленные флюидные волны были обнаружены в лаборатории [6] в килогерцовом диапазоне и в полевых измерениях [7]. Существует мнение, что именно эти волны определяют механизм наблюдаемых низкочастотных эффектов над нефтяными и газовыми месторождениями и возникновение резонансов сейсмических волн в районах подобных месторождений. Возможность возбуждения этих волн остается открытой проблемой в связи с шероховатостью реальных трещин и малоизученностью физики граничных условий. Также неизученным остается вопрос о применимости асимптотических представлений для условий лабораторных экспериментов и реальных моделей сейсмических сред.

В данной работе рассмотрены режимы распространения волны Крауклиса в трехслойной модели, а также найдены условия перехода между различными режимами. Получено условие резонанса волны Крауклиса в лабораторной модели и найдены первые резонансные частоты.

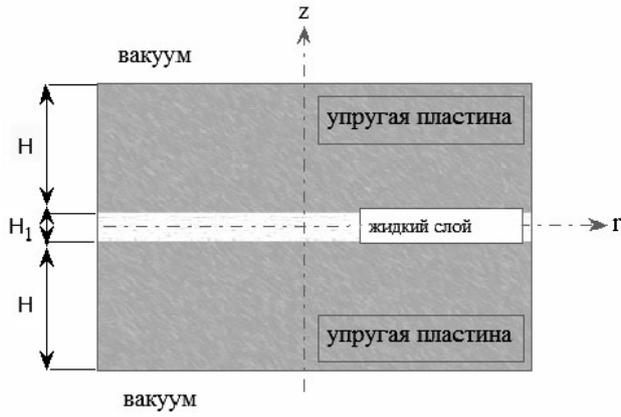


Рис. 1. Схема модели

Теория

В цилиндрической системе координат (r, θ, z) рассматривается симметричная трехслойная модель, состоящая из слоя жидкости $-H_1/2 \leq z \leq H_1/2$, окруженного двумя одинаковыми, изотропными и однородными упругими пластинами $H_1/2 \leq z \leq H_2/2$ и $-H_2/2 \leq z \leq -H_1/2$. Ось r расположена посередине жидкого слоя, ось z направлена вертикально вверх. Ввиду симметрии задачи, выберем начало координат в центре жидкого слоя (рис. 1). Упругие пластины имеют одинаковую толщину H и состоят из одного и того же материала, имеющего

плотность ρ , скорость продольных v_p - и поперечных v_s -волн. Толщина жидкого слоя H_1 , плотность ρ_f , скорость звука v_f .

Уравнение движения упругой изотропной среды имеет вид

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot \vec{u} + \mu\Delta\vec{u} + \omega^2\rho\vec{u} = 0, \quad (1)$$

где λ, μ – параметры Ламе; ρ – плотность среды; ω – круговая частота. В упругих средах связь между скоростями и упругими параметрами среды определяется выражениями:

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (2)$$

В жидкой среде $\mu=0$, $v_p^2 = \lambda / \rho$.

Поля смещений u_r и u_z и напряжений t_{rz} и t_{zz} определяются в виде интегралов Фурье-Бесселя

$$\begin{aligned} u_r(r, z, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} d\omega \int_0^{+\infty} U_r(z, \omega, k) J_1(kr) dk, \\ u_z(r, z, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} d\omega \int_0^{+\infty} U_z(z, \omega, k) J_0(kr) dk, \\ t_{rz}(r, z, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} d\omega \int_0^{+\infty} T_{rz}(z, \omega, k) J_1(kr) dk, \\ t_{zz}(r, z, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega t} d\omega \int_0^{+\infty} T_{zz}(z, \omega, k) J_0(kr) dk, \end{aligned} \quad (3)$$

где подынтегральные функции U_r, U_z, T_{rz}, T_{zz} имеют представления:

$$\begin{aligned} U_r &= kC_p e^{\alpha_p(z-\frac{H_2}{2})} + kD_p e^{-\alpha_p(z-\frac{H_1}{2})} - \alpha_s C_s e^{\alpha_s(z-\frac{H_2}{2})} + \alpha_s D_s e^{-\alpha_s(z-\frac{H_2}{2})}, \\ U_z &= -\alpha_p C_p e^{\alpha_p(z-\frac{H_2}{2})} + \alpha_p D_p e^{-\alpha_p(z-\frac{H_1}{2})} + kC_s e^{\alpha_s(z-\frac{H_2}{2})} + kD_s e^{-\alpha_s(z-\frac{H_2}{2})}, \\ T_{rz} &= 2\mu k \alpha_p C_p e^{\alpha_p(z-\frac{H_2}{2})} - 2\mu k \alpha_p D_p e^{-\alpha_p(z-\frac{H_1}{2})} + \mu b C_s e^{\alpha_s(z-\frac{H_2}{2})} + \mu b D_s e^{-\alpha_s(z-\frac{H_2}{2})}, \\ T_{zz} &= \mu b C_p e^{\alpha_p(z-\frac{H_2}{2})} + \mu b e^{-\alpha_p(z-\frac{H_1}{2})} + 2\mu k \alpha_s C_s e^{\alpha_s(z-\frac{H_2}{2})} - 2\mu k \alpha_s D_s e^{-\alpha_s(z-\frac{H_2}{2})}. \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнениях (4) применены следующие обозначения: $b = \omega^2 v_s^{-2} - 2k^2$; $\alpha_i = \sqrt{k^2 - \omega^2 v_i^{-2}}$; где $i = f, S, P$; $k = \omega / v$; v – фазовая скорость.

Граничные условия для смещений и напряжений имеют вид:

1. На свободных границах упругих пластин компоненты вектора напряжения равны нулю

$$T_{rz} = 0, \quad T_{zz} = 0. \quad (5)$$

2. На границах жидкости и упругости компоненты смещения и напряжения непрерывны

$$[U_z] = 0, [T_{zz}] = 0, \quad (6)$$

касательная компонента напряжения равна нулю

$$T_{rz} = 0. \quad (7)$$

Подстановка выражений для смещений и напряжений (4) в граничные условия в общем случае приводит к линейной системе уравнений 10×10 . Рассматривается только симметричное решение по отношению к центру жидкого слоя, удовлетворяющее условию (8), которое позволяет свести систему к размерности 5×5 .

$$\begin{aligned} u_z^f(r, z, t) &= -u_z^f(r, -z, t), \\ u_x^f(r, z, t) &= u_x^f(r, -z, t). \end{aligned} \quad (8)$$

Равенство нулю определителя этой системы дает дисперсионное уравнение:

$$\Delta(\omega, k) = 0.$$

После стандартной замены $k = \omega \zeta$, получаем:

$$\begin{vmatrix} 2\zeta\alpha_p & b & -2\zeta\alpha_p e^{-\alpha_p\omega H} & b e^{-\alpha_s\omega H} & 0 \\ b & 2\zeta\alpha_s & b e^{-\alpha_p\omega H} & -2\mu\zeta\alpha_s e^{-\alpha_s\omega H} & 0 \\ 2\zeta\alpha_p e^{-\alpha_p\omega H} & b e^{-\alpha_s\omega H} & -2\zeta\alpha_p & b & 0 \\ -\alpha_p e^{-\alpha_p\omega H} & \zeta b e^{-\alpha_s\omega H} & \alpha_p & \zeta & \alpha_f \tanh\left(\frac{\alpha_f\omega H_1}{2}\right) \\ \mu b e^{-\alpha_p\omega H} & 2\mu\zeta\alpha_s e^{-\alpha_s\omega H} & \mu b & -2\mu\zeta\alpha_s & -\rho_f \end{vmatrix} = 0, \quad (9)$$

где $b = v_s^{-2} - 2\zeta^2$; $\alpha_i = \sqrt{\zeta^2 - v_i^{-2}}$; $i = f, S, P$; $\zeta = 1/v$ – медленность.

Задача решается методом поиска корней дисперсионного уравнения (9), возникающего вследствие удовлетворения смещений и напряжений граничным условиям для симметричной поверхностной моды. При малых частотах это уравнение имеет два вещественных корня. Первый корень V_1 соответствует волне, основная часть энергии которой лежит в упругости, второй корень V_2 – волне, основная часть энергии которой лежит в жидкости.

Эта задача допускает асимптотический анализ на уровне исходной матрицы. В случае бесконечно толстых стенок $H \rightarrow \infty$ матрица становится блочно-диагональной, где верхняя левая 2×2 подматрица – уравнение Релея для V_1

$$R \equiv 4\zeta^2 \alpha_p \alpha_s - \left(\frac{1}{v_s^2} - 2\zeta^2 \right)^2 = 0, \quad (10)$$

а нижняя правая 3×3 подматрица – уравнение Крауклиса для V_2

$$\mu v_s^2 R \xi_1 + \rho_f \alpha_f = 0, \quad (11)$$

где $\xi_1 = \alpha_f \tanh(\alpha_f \omega H_1 / 2)$. Если в уравнении (11) предположить $\alpha_f \omega H_1 \ll 1$, $v/v_f \ll 1$, $v/v_s \ll 1$, $v/v_p \ll 1$, то получается низкочастотное приближение для фазовой скорости медленной волны, которое может быть представлено в форме

$$v_{f_0} = \left(\frac{\mu \omega H_1}{\rho_f} (1 - \gamma^2) \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (12)$$

где $\gamma = v_s / v_p$.

В случае низких частот и толщины пластин меньшей по сравнению с длиной волны $\lambda = 2\pi v / \omega$, фазовая скорость медленной волны приближенно дается выражением

$$v_B = \left(\frac{\mu H_1 \omega^4 H^3 (1 - \gamma^2)}{6\rho_f} \right)^{\frac{1}{6}}, \quad (13)$$

где E – модуль Юнга; σ – коэффициент Пуассона; h – полутолщина упругих плит. Уравнение (13) совпадает с результатом для модели с тонким слоем [4], полученным вариационным способом. При этом в упругом слое распространяется симметричная волна Лэмба со скоростью $V_L = 2\sqrt{1-\gamma^2}v_s$.

Уравнение Крауклиса (11) содержит параметр ξ_1 , в который входит функция $\tanh(\alpha_f \omega H_1 / 2)$. При малых значениях аргумента $\tanh(x) \approx x$, при больших значениях аргумента $\tanh(x) = const$. Переход между двумя асимптотиками происходит, когда $x \approx 1$. Таким образом, для медленной волны в жидкости получен критерий перехода от режима струйной волны в случае тонких пластин к волне Крауклиса для случая полупространств:

$$\frac{H}{2} \left(\frac{\omega^2 \rho_f}{H_1 \mu (1-\gamma^2)} \right)^{\frac{1}{3}} \approx 1. \quad (14)$$

Численные результаты

На рис. 2 представлены дисперсионные зависимости фазовых скоростей от частоты в системе слой жидкости толщиной ($H_1=1$ мм, $\rho_f=1000$ кг/м³, $v_f=1481$ м/с), помещенный между двумя упругими мраморными плитами толщиной ($H=3$ см, длиной $l=60$ см, $\rho=2670$ кг/м³, $v_s=3135$ м/с, $v_p=5587$ м/с). Точка перехода, отмеченная на рисунке, соответствует переходу из режима струйной волны в случае двух пластин к режиму волны Крауклиса в случае двух полупространств (14). На рис. 3 те же кривые представлены как функции толщины упругой пластины. Твердой линией представлены дисперсионные кривые, полученные численным решением точного дисперсионного уравнения (9), и их асимптотические приближения: V_K – корень уравнения (11); V_R – корень уравнения (10); V_{j0} – низкочастотная асимптотика уравнения Крауклиса (13).

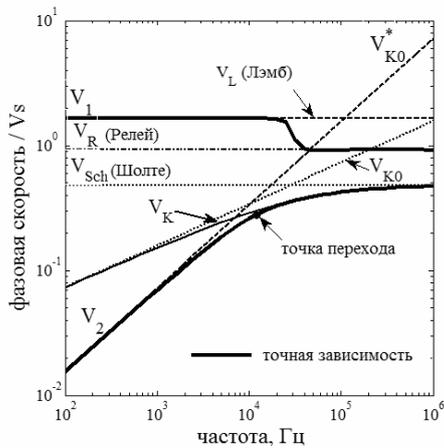


Рис. 2. Вещественная часть нормированной фазовой скорости в зависимости от частоты

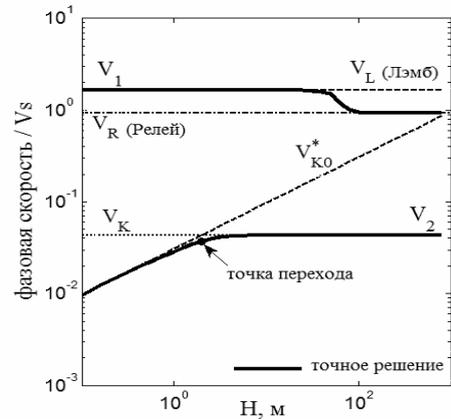


Рис. 3. Вещественная часть нормированной фазовой скорости в зависимости от толщины упругой пластины

На рис. 4, 5 представлены сейсмограммы радиальной u_r и вертикальной u_z компонент поля смещения. Точечный источник (типа центра расширения) расположен в центре жидкого слоя. Временная функция источника – первая производная функции Гаусса с центральной частотой 50 Гц. Волновое поле регистрируется вертикальной линией, состоящей из 60 приемников, расположенной на расстоянии 5 м от источника. Расстояние между приемниками $\Delta z=5$ м. Дисперсионная волна на сейсмограмме – волна Крауклиса. Амплитуда радиальной компоненты в центре жидкого слоя настолько большая, что остальные волны, распространяющиеся в этой модели, не видны. К вертикальной компоненте применен амплитудный множитель 100.

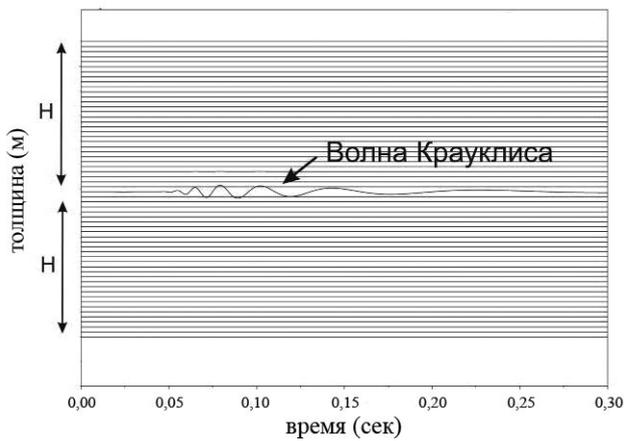


Рис. 4. Радиальная компонента поля смещения для вертикального расположения приемников на расстоянии 5 м от источника

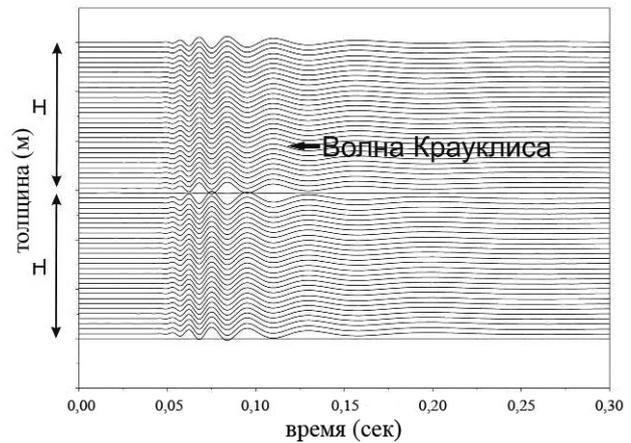


Рис. 5. Вертикальная компонента поля смещения для вертикального расположения приемников на расстоянии 5 м от источника (усиление 100)

На рис. 6, 7 показаны радиальные компоненты поля смещения для модели, когда линия приемников является горизонтальной и располагается в центре жидкого слоя на расстоянии 5 м от источника. С уменьшением толщины упругих пластин скорость волны Крауклиса уменьшается, а дисперсия увеличивается.

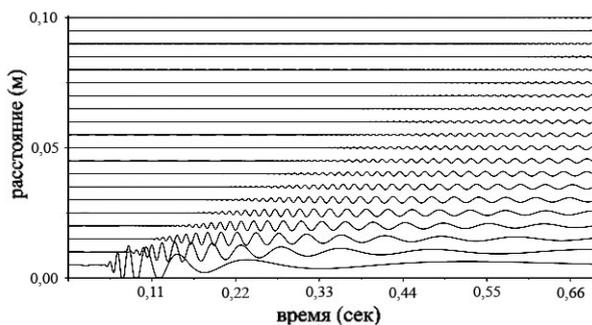


Рис. 6. Радиальная компонента поля смещения для горизонтального расположения приемников, $H=0,03$ м

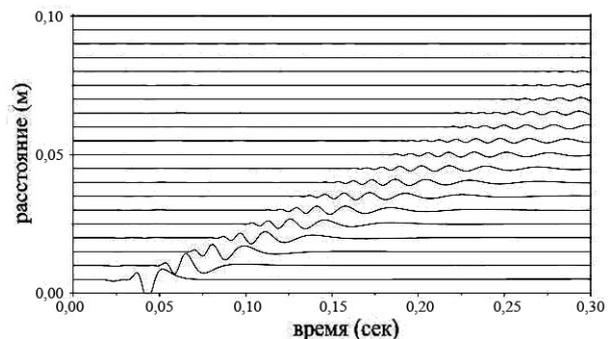


Рис. 7. Радиальная компонента поля смещения для горизонтального расположения приемников, $H=\infty$

Для того, чтобы наблюдать медленную волну в лаборатории, рассмотрим модель конечной длины $l=60$ см. Толщина жидкого слоя – 1 мм, толщина упругих пластин – 3 см. Предположим, что жесткость на концах модели большая, так что скорость волны Крауклиса в этих точках равна нулю, что дает условие резонанса: $l/\lambda = n/2$, ($n=1, 2, 3, \dots$). Для модели, состоящей из мрамора и воды, вытекают следующие резонансные частоты: частота первого колебания $f=6,7$ Гц, второго – $f=53,7$ Гц, третьего – $f=177$ Гц. Первые три частоты колебания находятся в сейсмическом диапазоне частот. Это приводит к выводу, что медленную волну можно наблюдать в лабораторном эксперименте.

Заключение

Флюидная мода при увеличении толщины слоя из струйной волны переходит в решение, полученное Крауклисом. При уменьшении частоты, так же как и при уменьшении толщины упругих пластин, асимптотическое решение для тонкого слоя и точное решение совпадают.

Аналитическая форма критериев перехода из одного асимптотического режима в другой подтверждена сравнением с решением точной задачи. Рассчитаны условия резонанса

флюидной волны трехслойной модели в лабораторном эксперименте. Нижний диапазон этих резонансов лежит в области сейсмических разведочных частот, что открывает возможность изучения этих волн в лаборатории.

Выражаю благодарность за помощь в проведении исследований В. Корнееву (Беркли), Б. М. Каштану (Санкт-Петербург).

Список литературы

1. Крауклис П. В. О некоторых низкочастотных колебаниях жидкого слоя в упругой среде // Прикладная математика и механика. – 1962. – №6. – С. 1111–1115.
2. Lloyd P., Redwood M. Wave propagation in a layered plate composed of two solids with perfect contact, slip, or a fluid layer at their interface // *Acustica*. – 1965. – N. 16. – P. 224–232.
3. Paillet F. L., White J. E. Acoustic models of propagation in the borehole and their relationship to rock properties // *Geophysics*. – 1982. – N. 47. – P. 1215–1228.
4. Coulouvrat F., Rousseau M., Lenoir O., Izbicki J. Lamb-Type Waves in a Symmetric Solid-Fluid-Solid Trilayer // *Acustica*. – 1998. – N. 84. – P. 12–20.
5. Bell A., Fletcher N. H. The cochlear amplifier as a standing wave: “Squirting” waves between rows of outer hair cells // *JASA*. – 2004. – N. 116 (2). – P. 1016–1024.
6. Tang X. M., Cheng C. H. Wave propagation in a fluid-filled fracture—an experimental study // *Geophysical Research Letters*. – 1988. – N. 15. – P. 1463–1466.
7. Ferrazzini V., Chouet B., Fehler M., Aki K. Quantitative analysis of long-period events recorded during hydrofracture experiments at Fenton Hill, New Mexico: Implications for volcanic tremor // *Journal of Geophysical Research*. – 1990. – N. 95. – P. 21871–21884.

Рецензент – кандидат физико-математических наук Ю. В. Киселев.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТНОГО СТРОЕНИЯ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНО-ВОЛНОВОЙ ТОМОГРАФИИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**DETERMINATION OF UPPER MANTLE VELOCITY STRUCTURE BY THE NOISE SURFACE WAVE TOMOGRAPHY ACCOUNTING INFLUENCE OF EARTHQUAKE**

Поверхностно-волновая томография, основанная на анализе внешнего сейсмического шума, широко используется в течение последнего десятилетия. Предполагается, что коррелированная компонента шума состоит из поверхностных волн, генерируемых источниками, распределенными по поверхности Земли более или менее равномерно. В этом случае кросс-корреляционную функцию (ККФ) на двух станциях можно рассматривать как функцию Грина поверхностной волны. Эта функция должна быть симметричной относительно нулевого времени. Однако реальная ККФ на станциях, расположенных на Восточно-Европейской платформе, нередко оказывалась асимметричной. Так как из непрерывной сейсмической записи выделить чистый шум невозможно из-за наложения записей землетрясений, в методе расчета ККФ сигналы от землетрясений подавляются путем нормализации на бегущее среднее, но при этом они остаются в составе шума. Отрезками записей, содержащих волны от землетрясений, пренебрегают из-за их относительно малой доли по времени. В настоящей работе показано, что в действительности этот вклад оказывается преобладающим на периодах более 20–40 с. Иначе говоря, то, что понимается как «шум», в действительности представляет собой наложение сигналов от землетрясений. Это приводит к искажениям функции Грина и определяемой по ней дисперсионной кривой поверхностной волны, используемой в поверхностно-волновой томографии, в тех случаях, когда в интервале времени, используемом для построения ККФ, происходит большое число землетрясений в малой по размерам области в стороне от продолжения межстанционной трассы (кластеризация). Описаны способы уменьшения этого эффекта. Дисперсионные кривые на трассах между станциями на Восточно-Европейской платформе и в Западной Европе использованы в процедуре шумовой сейсотомографии в регионе, включающем зону Тессейра-Торнквиста. Показано, что эта зона разделяет структуры, различающиеся до глубины 300 км.

Ключевые слова: внешний сейсмический шум, поверхностно-волновая томография, землетрясения, структура верхней мантии, Восточно-Европейская платформа.

Surface wave tomography method based on analysis of ambient noise is widely used during the last decade. It is assumed that correlated component of noise is composed of surface waves generated by sources distributed over the Earth's surface more or less uniformly. In such a case the cross-correlation function (CCF) at two stations may be considered as the Green's function of surface wave. This function should be symmetric relative to zero time. However analysis of CCF at the stations located at the East-European Platform shows that as a rule CCFs are characterized with strong asymmetry. Since 'pure' noise cannot be extracted from seismic records due to superposition of earthquake signals, the method for calculation of CCF includes amplitude normalization for suppression of earthquakes that reduces signals from earthquakes to a noise level. The parts of records containing waves from earthquakes are neglected because of minor duration. Present study shows that this contribution turns out to be dominant at periods larger than 20–40 s. In other words, what we assume as 'a noise' in reality is a superposition of signals from earthquakes. This fact results in distortion of the Green's function and of surface wave dispersion curve used in surface wave tomography in cases when in the time interval used for calculating CCF many earthquakes occur within a narrow area apart of a continuation of interstation path (clustering). Means for reducing this effect are outlined. Dispersion curved at the paths between the stations at the East European Platform and in West Europe were used for the ambient noise tomography of the region including Tesseire-Tornquist Line. It was shown that this line divides different structures up to the depth of 300 km.

Keywords: ambient seismic noise, surface wave tomography, earthquakes, upper mantle structure, East-European platform

Одним из наиболее эффективных методов для изучения скоростного строения верхней мантии является метод поверхностно-волновой томографии. Модификация этого метода, основанная на анализе кросс-корреляционной функции (ККФ) «внешнего» сейсмического шума (ambient noise) на двух станциях, широко применялась в зарубежных исследованиях [1, 2]

для оценки детального строения коры при использовании шума на сравнительно высоких частотах (выше $\sim 0,05$ Гц). Предполагалось, что шум представляет результат наложения полей поверхностных волн от случайно распределенных источников. При этом, ККФ определяет функцию Грина поверхностной волны, по которой можно определить дисперсионную кривую ее групповой скорости на трассе между двумя станциями, и использовать такие данные на множестве пар станций при определении латеральных вариаций скорости поперечной волны методом поверхностно-волновой томографии [3]. При равномерном распределении источников ККФ должна быть симметричной относительно нулевого времени, и в этом случае она определяется вкладом только от источников, расположенных на продолжениях межстанционной трассы в противоположные стороны. На высоких частотах источником шума являются, в основном, штормовые и ветровые микросейсмы, и предположение о равномерности распределения источников правомерно, если строить ККФ усреднением за длительный период времени. Обычно таким промежутком времени принимают один год.

Этот метод используется и на более низких частотах с целью применения шумовой томографии для исследования строения верхней мантии [4]. Таким же способом были получены предварительные сведения о строении верхней мантии асейсмичной Восточно-Европейской платформы (ВЕП) [5].

При этом, была обнаружена существенная асимметрия ККФ на трассах, ориентированных в широтном направлении: на низких частотах амплитуда ККФ, обусловленная источниками с востока, оказывалась значительно выше, чем с запада, и наоборот, на высоких частотах более интенсивной оказывалась ККФ от источников с запада. Это объясняется только природой источников низкочастотного сейсмического шума и, соответственно, их неравномерным распределением по поверхности. Исследованиями авторов работы [6] показано, что источниками низкочастотного сейсмического шума, в основном, являются землетрясения. Поскольку получить из сейсмических записей «чистый» шум невозможно (на них всегда присутствуют сигналы от землетрясений) в методике построения ККФ для подавления сигналов от землетрясений используют тот или иной способ амплитудной нормализации [7], считая, что сигналы от землетрясений занимают очень небольшую часть записи, и их вкладом в ККФ можно пренебречь.

На рис. 1 (цв. вкл. стр. 117) приведен пример асимметрии корреляционной функции. Видно, что на восточном продолжении трассы PUL-ARU находится гораздо больше очагов землетрясений, чем на западном. В то же время с запада следует ожидать прихода высокочастотного шума, обусловленного штормами в Атлантике и на Балтике. Таким образом, несмотря на амплитудную нормализацию шума, в ККФ остается определенный вклад от землетрясений. Неравномерное распределение очагов землетрясений по поверхности Земли приводит не только к асимметрии ККФ, но может приводить и к существенным ее искажениям, если за используемый промежуток времени имело место скопление очагов в какой-то узкой области, расположенной не на продолжении трассы между парой станций. Пример такого искажения ККФ приведен в работе [6] для пары станций ААК-ДРС, построенной по записям шума за 2000 год, когда имело место скопление землетрясений в узкой области вблизи Японии.

В то же время, для целей томографии необходимо использовать дисперсионные кривые поверхностных волн, построенные по данным неискаженных ККФ. Поэтому необходимо проводить дополнительную коррекцию записей шума с тем, чтобы подавить влияние таких землетрясений, которые приводят к искажению ККФ.

Можно полагать, что вклад в ККФ от землетрясений будет тем больше, чем больше магнитуда землетрясения. Сигналы от них будут достаточно интенсивными на обеих станциях, так что после нормализации (мы используем нормализацию на бегущее среднее) на записи будет подавлен шум, а сигналы от землетрясений останутся чистыми и внесут вклад в ККФ. Поэтому наиболее простым способом избавления от таких искажений представляется исключение (зануление) участков записи шума, в которых присутствуют сигналы от землетрясений. Конечно, при этом следует ограничиться некоторым пороговым значением магнитуды.

туды, выше которой соответствующие участки записи будут исключаться из рассмотрения. В качестве такого порога мы выбрали значение магнитуды равное 5. Таких землетрясений в год возникает в среднем на земном шаре около 1000.

Если исключать для каждого землетрясения участок записи продолжительностью 40 мин, то за год будет исключено менее 10% всей записи. На рис. 2 показана кросс-корреляционная функция, рассчитанная разными способами на паре станций OBN-ARU.

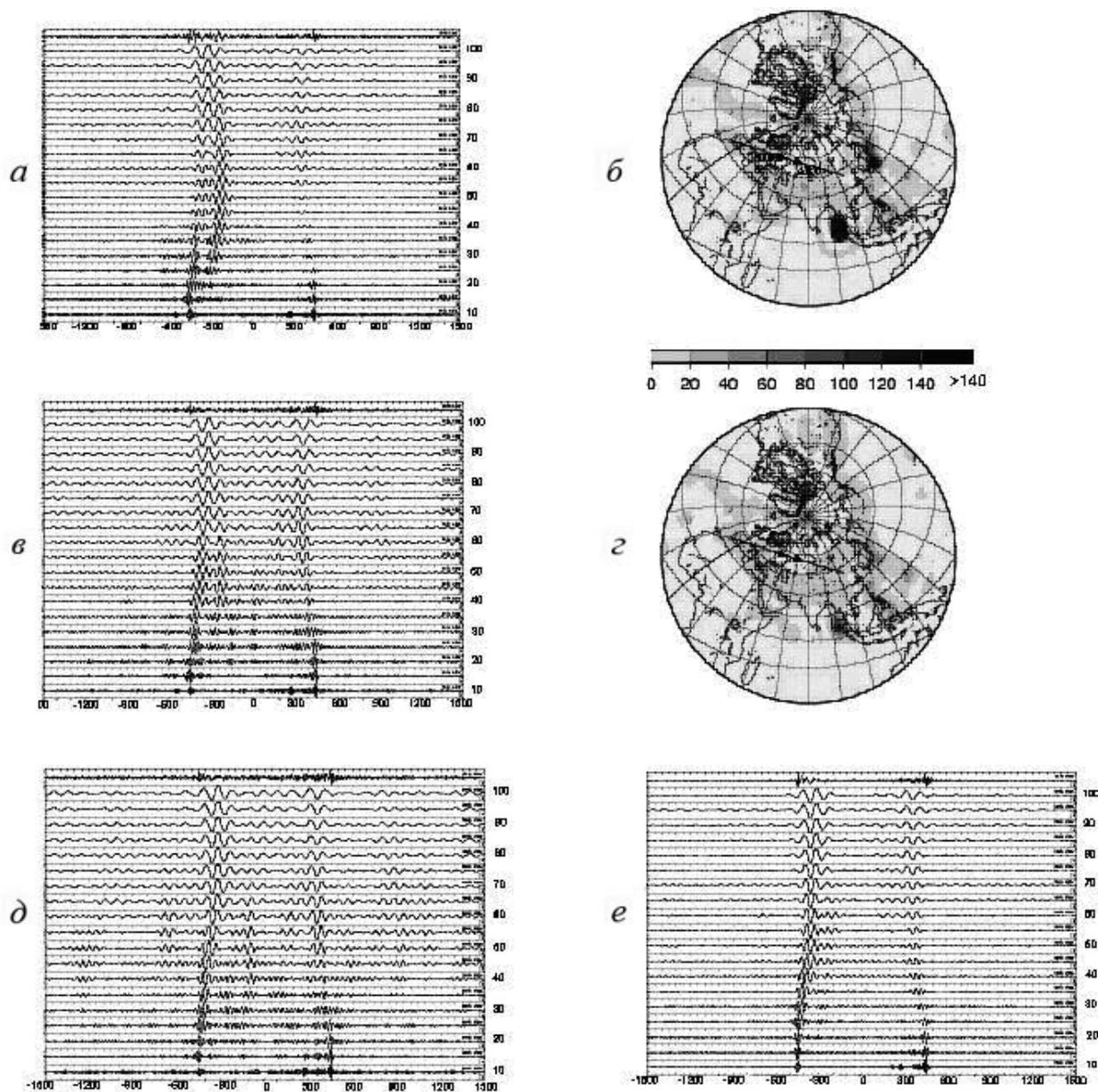


Рис. 2. Кросс-корреляционная функция, рассчитанная разными способами на паре станций OBN-ARU по данным шума за 2005 г. и результаты ее фильтрации:

a – ККФ; *б* – карта распределения плотности землетрясений; *в* – ККФ без учета землетрясений, магнитуда которых $M > 5$; *г* – карта распределения плотности без учета землетрясений, магнитуда которых $M > 5$; *д* – ККФ без учета записей с амплитудами от землетрясений больше некоторого порога A ; *е* – результат суммирования ККФ за 2001–2004, 2006 гг.

В случае, когда была использована вся запись полностью без исключения участков с землетрясениями (рис. 2, *a*), – в левой части, соответствующей приходу волн с востока от трассы, выявляется интенсивный максимум раньше «полезного», т.е. ожидаемого за счет прихода волн от источников, находящихся на продолжении трассы. Такое искажение ККФ обусловлено наличием кластера землетрясений в районе Индонезии (рис. 2, *б*). На рис. 2, *в* изобра-

жена аналогичная ККФ, но построенная при исключении записей землетрясений с $M > 5$. Ложный максимум на ККФ сохраняется, но имеет меньшую интенсивность, чем полезный. На карте плотности эпицентров при исключении землетрясений с $M > 5$ (рис. 2, з) максимум плотности в районе Индонезии сохраняется, но он значительно менее резко выражен.

Более корректным представляется исключение участков записи, на которых амплитуда колебаний от землетрясения превышает определенное значение. А амплитуда зависит не только от магнитуды землетрясения, но и от эпицентрального расстояния. Считая, что зависимость амплитуды поверхностной волны от магнитуды и эпицентрального расстояния определяется известной эмпирической формулой $M = \log A + 1,66\Delta + 2$, можно для каждого землетрясения по величине магнитуды и эпицентрального расстояния ближайшего к очагу станции, определить амплитуду на этой станции и отбрасывать участок записи с землетрясением, амплитуда которого превышает заданный порог. Результаты, полученные таким способом очистки записи от землетрясений, приведены на рис. 2, д. Здесь уже практически исчезает опережающий максимум, но на ККФ появляются дополнительные колебания. Наконец, чтобы источники были как можно более равномерно распределены по поверхности, следовало выполнять суммирование индивидуальных ККФ за возможно более длительный промежуток времени, исключая при этом годы, в которые имеет место кластеризация очагов землетрясений. Такими годами за первое десятилетие стал 2000 г., когда имел место кластер в районе Японии [6], и 2005 г. (рис. 2, б). Суммирование ККФ за пять лет (2001–2004, 2006 гг.) дает уже значительно более приемлемую картину (рис. 2, е), при которой фильтрованные ККФ (справа и слева от нуля) хотя и различаются по интенсивности, дисперсионные кривые, построенные по максимумам их огибающих, оказываются идентичными. Это и является критерием правильности построения ККФ.

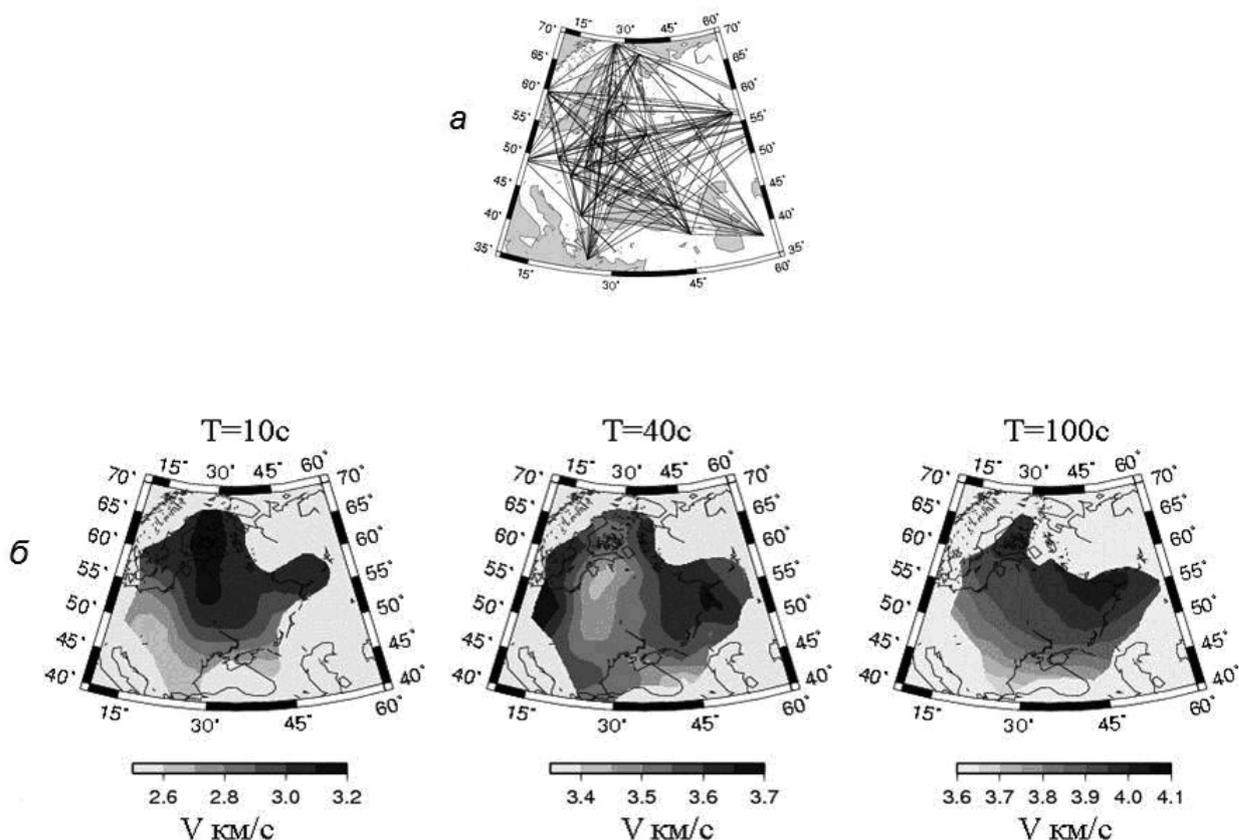


Рис. 3. Межстанционные трассы (а); карты распределения вариаций групповой скорости (б)

Такой подход был применен для построения дисперсионных кривых на трассах между станциями, расположенными в восточной части Европы (в России и в смежных с ней странах), а также был использован для построения вариаций скоростного строения верхней мантии методом поверхностно-волновой томографии.

На рис. 3, *a* изображены трассы между станциями (пересекающиеся линии), на которых определялись дисперсионные кривые по кросс-корреляционным функциям шума, вычисленным описанным выше способом. На рис. 3, *б* – примеры латерального распределения групповой скорости волны Релея для трех периодов. Карты строились для периодов в интервале 5–100 с с шагом 5 с. По ним восстанавливались локальные дисперсионные кривые в точках поверхности с шагом 3° по широте и 3° по долготе. Эти дисперсионные кривые обращались в вертикальные скоростные разрезы для поперечных волн путем решения одномерной обратной задачи (скорости продольных волн и плотности мало влияют на дисперсионные кривые).

По полученным скоростным разрезам можно было восстановить 3D-распределение скорости. На рис. 4, *a* изображено распределение средней скорости в коре; на рис. 4, *б* – в вертикальных сечениях по профилям, обозначенным на рис. 4, *a*.

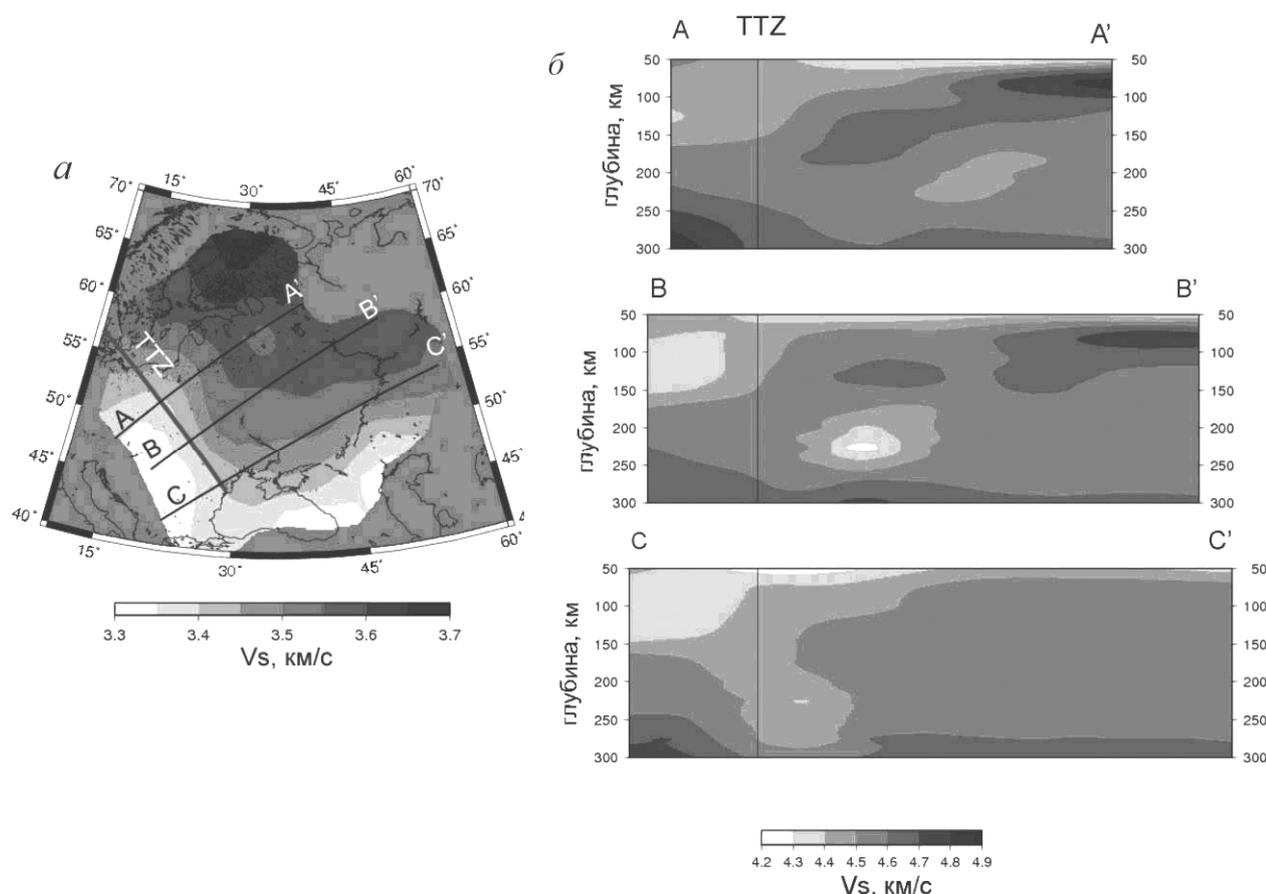


Рис. 4. Распределение средней скорости в коре (*a*), и в вертикальных сечениях по профилям (*б*) AA', BB', CC' – профили, по которым восстанавливали 3D-распределение скорости

На этих же рисунках показано положение линии Торнквиста-Тессейра (TTZ), которая разграничивает стабильную Восточно-Европейскую платформу (ВЕП) с более молодыми образованиями Западной Европы. Видно, что четко разделяются структуры коры с востока и запада от линии Торнквиста-Тессейра. Средняя скорость в коре уменьшается с востока на запад в направлении, перпендикулярном линии ТТ, с 3,6 до 3,3 км/с. Плавность этого изменения является кажущейся – она обусловлена сглаживанием в процедуре поверхностно-волновой томографии (П. Г. Дитмар, Т. Б. Яновская, 1987). В действительности, по видимому, имеет место резкий переход от высокоскоростной к низкоскоростной коре именно вдоль линии TTZ. Это согласуется с полученными ранее результатами распределения скоростей продольных волн, полученными методами ГСЗ в рамках проектов POLONAISE и

CELEBRATION. Похожее по характеру уменьшение скорости наблюдается и на южной границе ВЕП – Альпийско-Гималайском сейсмическом поясе, перекрывающем часть зоны ТТЗ на территории Румынии (Карпатский складчатый пояс). Это объясняется тем, что древняя докембрийская платформа граничит с более молодыми образованиями – палеозойской корой Западной Европы и преимущественно кайнозойской корой Крыма-Турции-Кавказа.

Разделение структур с востока и запада от линии ТТЗ имеет место не только в коре, но и в верхней мантии, что отчетливо видно на вертикальных разрезах, изображенных на рис. 4, б. Интересно отметить, что понижение скорости к западу от линии ТТЗ выявляется на глубинах ~ 200 км, а ниже – наоборот, происходит повышение скорости по сравнению с ВЕП. Возможно, что такое повышение скорости (и соответственно, повышение плотности пород) обусловлено изостатической компенсацией.

Работа поддержана грантом РФФИ 05-11-00335а. Авторы выражают благодарность своему научному руководителю Т. Б. Яновской.

Список литературы

1. *Brenguier F., Shapiro N. M., Campillo M., Nersessian A., Ferrazini V.* 3-D surface wave tomography of the Piton de la Fournaise volcano using seismic noise correlation // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – V. 34. – L02305. – doi: 10.1029/2006GL028586.

2. *Moschetti M. P., Ritzwoller M. H., Shapiro N. M.* Surface wave tomography of the western United States from ambient seismic noise: Rayleigh wave group velocity maps // *Geochem., Geophys. Geosyst.* – 2007. – V. 8 (8). – A08010. – doi: 10.1029/2007GC001655.

3. *Яновская Т. Б.* Развитие способов решения задач поверхностно-волновой томографии на основе метода Бэйкуса-Гильберта // *Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. /Вычислительная сейсмология.* – 2001. – вып. 32. – С. 9–26.

4. *Королева Т. Ю., Яновская Т. Б., Патрушева С. С.* Использование сейсмического шума для определения структуры верхней толщи Земли // *Физика Земли.* – 2009. – № 5. – С. 3–14.

5. *Королева Т. Ю., Яновская Т. Б., Патрушева С. С.* Скоростное строение верхней мантии Восточно-Европейской платформы по данным сейсмического шума // *Физика Земли.* – 2010. – № 10. – С. 38–47.

6. *Яновская Т. Б., Королева Т. Ю.* О влиянии землетрясений на кросс-корреляционную функцию сейсмического шума // *Физика Земли.* – 2011. – № 9. – С. 1–10.

7. *Bensen G. D., Ritzwoller M. H., Barmin P., Levshin A. L., Lin F. C., Moschetti M. P., Shapiro N. M., Yang Y.* Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements // *Geophys. J. Int.* – 2007. – V. 169. – P. 1239–1260.

Рецензент – доктор технических наук С. А. Кириллов.

ВЛИЯНИЕ ГОЛОВНЫХ ВОЛН НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ МЕТОДОМ ОБРАЩЕНИЯ ПОЛНОГО ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

V. V. Kazei, A. V. Ponomarenko (SPbSU, Saint-Petersburg, Russia)

HEAD WAVES AND THE QUALITY OF THE ACOUSTIC INHOMOGENEITY RECOVERING WITH FULL WAVEFORM INVERSION

В работе рассматривается задача рассеяния акустических волн на скоростной неоднородности в опорной модели, состоящей из двух однородных изотропных акустических полупространств. В рамках приближения Борна получено аналитическое выражение для пространственного спектра поля в зависимости от пространственного спектра неоднородности. Предложен эмпирический способ разделения волнового поля на поле прямых, отражённых и головных волн в аналитическом виде. С использованием данного способа проведена оценка чувствительности поля рассеянных головных волн к изменениям в пространственном спектре неоднородности. Оценка представлена в форме диаграмм для различных скоростных контрастов между слоями и позволяет сделать заключение о влиянии головных волн на качество восстановления пространственного спектра неоднородности методом обращения полного волнового поля.

Ключевые слова: обращение полного волнового поля, головные волны.

The problem of acoustic scattering on the velocity perturbation in the reference model consisting of two homogeneous isotropic acoustic half-spaces is considered. Explicit analytic expressions are found with use of Born approximation for the spatial spectrum of the received signal in dependence of the spatial spectrum of the inhomogeneity. Empirically method for the separation of the wave field in direct, reflected and head-wave in an analytical form is established. All this allowed us to estimate the sensitivity of the field of head waves to the changes in the spatial spectrum of inhomogeneity. Estimation is presented as diagrams for various speed contrasts between the layers and leads to the conclusion about the importance of head waves in the recovery of the spatial spectrum of inhomogeneity with the full waveform inversion method.

Keywords: full waveform inversion, FWI, head waves.

Введение

Обращение полного волнового поля – один из самых прогрессивных на данный момент методов обработки данных сейсмической разведки. Идея метода состоит в минимизации функционала невязки, смоделированного и зарегистрированного в эксперименте волновых полей варьированием параметров среды. Еще в 1989 г. Р. Мора в своей работе [1] показал, что данный метод объединяет в себе потенциальные возможности томографической и миграционной инверсий. Другим важным преимуществом метода является отсутствие необходимости пикировать полученные данные, как например, в лучевой томографии.

Основным недостатком метода полной инверсии поля является наличие большого числа локальных минимумов в целевом функционале, которое многократно возрастает в случае отсутствия в зондирующем сигнале низких частот. Головные волны в лучевой ассимптотике и на практике имеют частоту более низкую, чем отраженные, на которых обыкновенно предполагается производить инверсию. Таким образом, они могут дать дополнительную информацию о низких пространственных частотах в спектре исследуемой неоднородности за счет усиления низких частот в спектре источника, что снизит общее количество глобальных минимумов функционала невязки и улучшит его гладкость [2].

Опорная модель

Опорная модель состоит из двух изотропных однородных акустических полупространств. Рассматриваются источники и приемники, расставленные на протяжении всей горизонтальной дневной поверхности. Как видно на рис.1 (цв. вкл., стр. 117), все головные вол-

ны, создаваемые источниками, распространяются под критическим углом до рассеяния на неоднородности, что приводит к освещению неоднородности лишь с одного ракурса. Простая кинематика делает возможным суммирование по источникам для улучшения соотношения сигнал-шум в случае однократного рассеяния – приближения Борна.

Метод восстановления

Основной целью работы является исследование влияния головных волн на качество восстановления неоднородности. Задача распространения волн в рассмотренной модели решена на основе приближения Борна [3, 4]. Применение пространственного преобразования Фурье по горизонтальным координатам источников и приёмников приводит к выражению для спектра поля, создаваемого неоднородностью (будем называть его возмущением поля). Использование аналитического выражения для функции Грина опорной среды [5] позволяет преобразовать полученную зависимость в линейную связь между пространственным спектром возмущения полного поля и пространственным спектром неоднородности. Далее было проведено разбиение функции Грина на слагаемые по типам волн, основанное на выделении членов, имеющих точки ветвления в комплексной плоскости. Получены связи между возмущением поля головных волн, создаваемым неоднородностью и пространственным спектром неоднородности.

Результаты исследования

Зависимость между пространственным спектром поправки поля головных волн и пространственным спектром неоднородности представлена в виде диаграмм чувствительности. На рис. 2 приведены три диаграммы чувствительности поля головных волн к изменениям в пространственном спектре неоднородности для трёх значений скоростных контрастов между полупространствами в опорной модели. Для сравнения на рис.3 представлены диаграммы чувствительности полного поля, аналогично для трёх скоростных контрастов между полупространствами в опорной модели. Максимальный коэффициент чувствительности доходит до 1 и отмечен белым цветом, соответственно, чем темнее область, тем ниже чувствительность поля к изменениям в данных областях спектра неоднородности. Светлые окружности на рис. 2 определяют области спектра, для восстановления которых пригодны головные волны. Эти области достаточно малы; таким образом, лишь небольшая часть спектра неоднородности может быть построена при помощи головных волн.

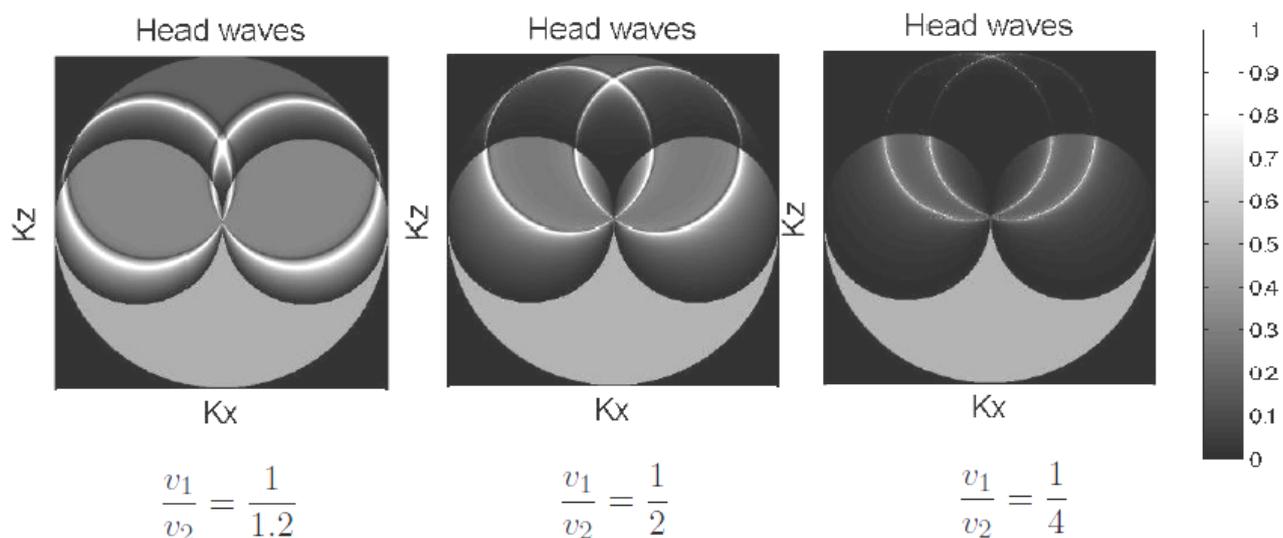


Рис. 2. Диаграммы чувствительности пространственного спектра поля головных волн к изменениям в пространственном спектре неоднородности

Линейная зависимость масштабов диаграмм от частоты (диаграмма ограничена линиями $K_x = \pm 2\omega/V_1$, $K_z = \pm 2\omega/V_1$), позволяет ограничиться рассмотрением монохроматических источников.

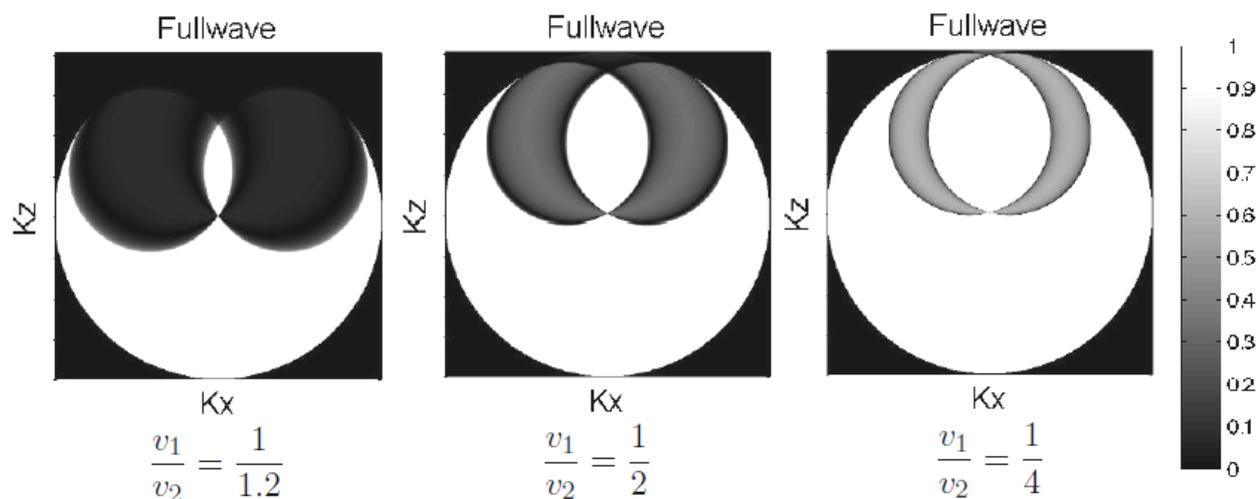


Рис. 3. Диаграммы чувствительности пространственного спектра полного поля к изменениям в пространственном спектре неоднородности

Выводы

Результаты проведённого исследования позволяют сделать вывод о применимости головных волн для точного восстановления лишь небольшой части пространственного спектра изучаемой неоднородности. В случае небольших горизонтальных размеров неоднородности целесообразно суммирование по удаленным от нее источникам и приемникам.

Список литературы

1. Mora P. Inversion = Migration + Tomography // Geophysics. – 1989. – V. 54. – P. 1575–1586.
2. Bunks C., Saleck F., Zalesk S. and Chavent G. Multiscale seismic waveform inversion. // Geophysics. – 1995. – V. 60. – P. 1457–1473.
3. Троян В. Н., Киселев Ю. В. Анализ и обработка данных. – СПб.: СПбГУ, 2010. – С. 399–426.
4. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы т.1 – М.: Мир, 1963. – С. 121–246.
5. Бабич В. М., Кочугуев С.К. О методе В. И. Смирнова – С. Л. Соболева явного решения задач математической теории дифракции. // Препринты ПОМИ РАН I/2002. Санкт-Петербургское отделение Математического института им. В.А. Стеклова РАН. – 2002. – С. 9–21.

Рецензент – доктор физико-математических наук В. Н. Троян.

УДК 523.98

К. С. Красильников (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия)
**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛНЦА КАК ЗВЕЗДЫ В ЦИКЛЕ
СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

K. S. Krasilnikov (SPbSU, Saint-Petersburg, Russia)
MAGNETIC FIELD OF THE SUN AS A STAR DURING SOLAR CYCLE

Проведено исследование наблюдений магнитного поля Солнца как звезды (МПСЗ), полученных в обсерватории им. Дж. Уилкокса за период 1975–2010 гг.

Целью данной работы являлось изучение вариаций магнитного поля Солнца, проведение статистической обработки данных магнитного поля Солнца как звезды на разных временных масштабах.

В результате выделены основные закономерности поведения магнитного поля в солнечном цикле; установлено, что активность общего магнитного поля Солнца как звезды непосредственно связана с активностью солнечных пятен.

Ключевые слова: магнитное поле, солнечный цикл, солнечные пятна.

Magnetic field observations of the Sun as a star in the Wilcox Solar Observatory for the period 1975–2010 have been analyzed.

The purpose of this work is to study variations of the solar magnetic field at different time and time scale.

The main features of the magnetic field evolution during the solar cycle are found.

As a result the solar magnetic field as a star is directly associated with the sunspot activity.

Keywords: magnetic field, solar cycle, sunspots.

Введение

Эра магнитных исследований Солнца началась в 1908 г., когда Дж. Э. Хэйл в обсерватории Маунт-Уилсон обнаружил расщепление спектральных линий в тени солнечных пятен и впервые объяснил это расщепление (незадолго до этого открытое в лабораторных условиях) эффектом Зеемана [1]. Исследования Дж. Э. Хэйла и С. Б. Никольсона дали картину расходящихся силовых линий в солнечных пятнах и показали, что существуют поля вне солнечных пятен, в которых было обнаружено расщепление спектральных линий. Реальная чувствительность метода Хэйла была порядка 50 Гс, она позволяла измерять только поля пятен; позже Хэйлом была открыта переполюсовка полей пятен в минимуме солнечного цикла. В течение каждого 11-летнего цикла все ведущие пятна биполярных групп имеют одинаковый знак в северном полушарии и противоположный в южном. То же самое справедливо для хвостовых пятен, у которых полярность всегда противоположна полярности ведущих пятен. В следующем цикле (рис. 1) полярность ведущих и хвостовых пятен изменяется на противоположную [2]. В 1952 г. Гораций Бэбкок (сын) совместно с Гарольдом Бэбкоком (отец) изобрели и изготовили солнечный магнитограф, измеряющий с точностью до 1 Гс магнитное поле по всему диску Солнца путем его сканирования с высоким пространственным разрешением [3]. Впоследствии они открыли смену знаков на полюсах Солнца в максимуме солнечного цикла.

Магнитное поле Солнца как звезды, также называемое общим магнитным полем Солнца (ОМП), является важным параметром солнечного магнетизма. Измеряемое по эффекту Зеемана в магниточувствительных спектральных линиях, оно характеризует глобальный дисбаланс магнитных полей по видимому солнечному диску [4].

Первые регулярные измерения МПСЗ начались в 1968 г. в Крымской астрофизической обсерватории (КраАО) [5] (Украина, Крым, пос. Научный) и продолжались до 1976 г. С октября 1970 по декабрь 1982 г. измерения МПСЗ проводились в обсерватории Маунт-Уилсон (ОМУ) Ф. Шеррером и Р. Говардом (США, Калифорния, гора Уилсон) [6]. С 1975 года по настоящее время измерения ОМП Солнца проводятся в Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса (СОУ) [7] (США, Калифорния, Стэнфорд).

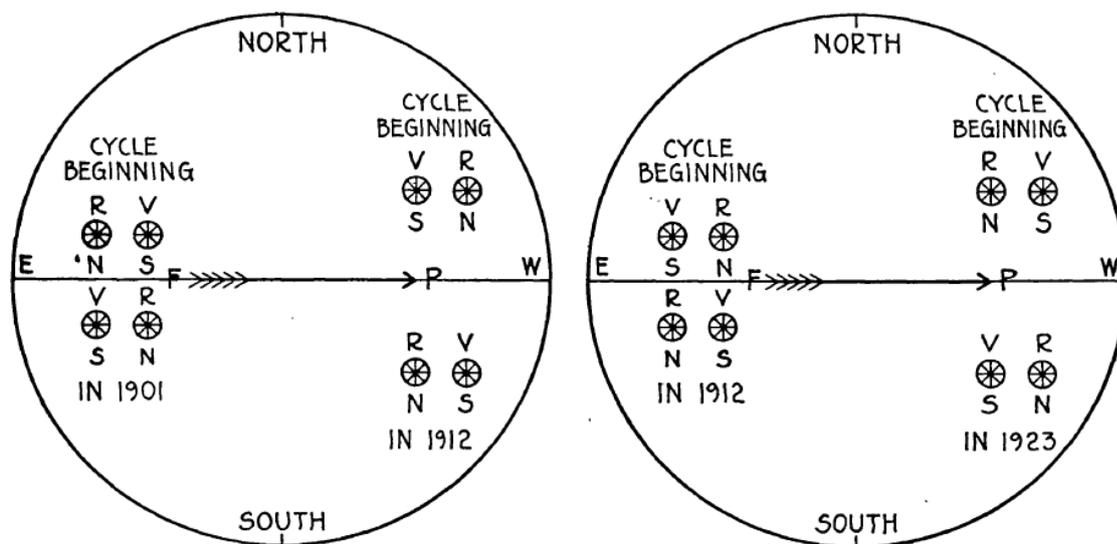


Рис 1. Полярность магнитных полей пятен (слева показана ситуация в 14-м солнечном цикле, справа в 15-м) [2]

Экспериментальные данные

В работе использовались данные по исследованиям магнитного поля (МП), полученные в Солнечной обсерватории им Дж. Уилкокса за период 1975–2011 гг., охватывающий 21-й, 22-й и 23-й 11-летние солнечные циклы (по цюрихской шкале 1-й цикл начали отсчитывать в марте 1755 г, соответственно 21-й цикл – это июнь 1976 – сентябрь 1986; 22-й – это сентябрь 1986 – май 1996; 23-й – май 1996 – январь 2009 г.) [7]. Важным преимуществом данных, полученных с СОУ, является то, что аппаратура, снимающая показатели МПСЗ, остаётся неизменной с 1975 г., поэтому данные не надо калибровать между собой перед построением графиков.

Метод, использованный на СОУ для измерения МПСЗ, описан в деталях А. Б. Северным (1971), Ф. Шеррером (1973), Р. Говардом (1974), Ф. Шеррером и др. (1977), В. А. Котовым (1977), а также В. М. Григорьевым и М. Л. Демидовым (1987). В обсерватории солнечный магнитограф Бэбкока делает запись поляризации Зеемана в крыльях Fe I (железа) линии поглощения 525,02 нм, имеющих фактор Ланде (g), равный трём. МПСЗ обычно измеряется для всего видимого солнечного полушария или, иногда, для большой центральной зоны солнечного диска. Ф. Шеррер (1973) показал, что сигнал МПСЗ определенно преобладает в центральной ($\approx R/2$, где R – это радиус солнечного диска) зоне солнечного диска. Измерения делались обычно несколько раз в день; позже эти результаты были усреднены. Напряженность (B) в данной работе представлена в мкТ (микротесла). Типичная ошибка в измерениях данных на СОУ равна ± 5 мкТ [6]. Число суточных значений МП равно 10808 за период с 1975–2011 гг.

Для исследования пятнообразовательной активности использовались числа Вольфа (W) – международное число солнечных пятен, вычисляющееся по формуле $W = k(f + 10g)$, где k – нормировочный коэффициент; f – количество наблюдаемых пятен; g – количество наблюдаемых групп пятен («Центр анализа данных по влиянию Солнца», Бельгия) [8].

Основные наблюдения

Для объяснения, как изменяется МПСЗ в течении нескольких солнечных циклов и может ли зависеть такое поведение МП от пятенной активности, а именно от чисел Вольфа (W), были построены несколько графиков.

На рис. 2 показана зависимость суточных вариаций ОМП от времени с 1975 по 2011 г. По левой шкале отложена напряженность суточных значений МП, по правой шкале – среднегодовая напряженность МП.

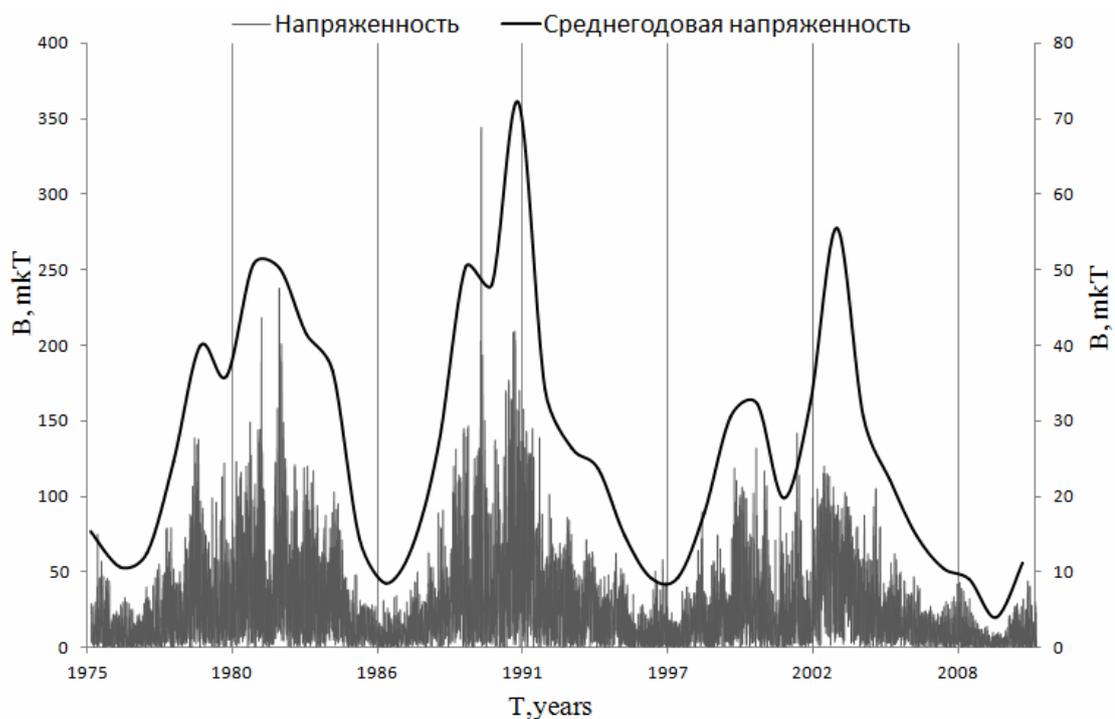


Рис. 2. Ряд суточных и среднегодовых данных ОМП Солнца с 1975–2011 гг.

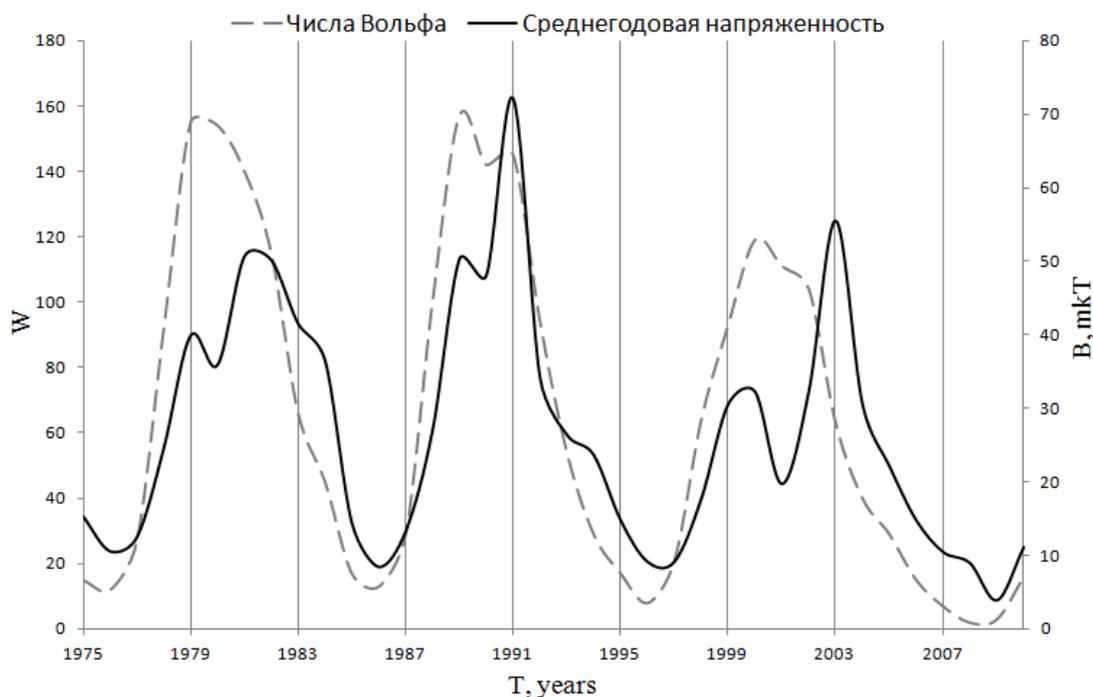


Рис. 3. Корреляция среднегодовых чисел Вольфа и среднегодовой напряженности МПСЗ за период 1975–2010 гг.

Из общей картины изменения МП видно, что ОМП Солнца меняется циклически со временем. Периодичность примерно 11 лет. Также, исходя из зависимости усредненных по годам данных МП от времени, можно увидеть ярко выраженный провал в максимуме солнечной активности, его называют провалом Гневышева.

На рис. 3 сопоставлены среднегодовые значения МП со среднегодовыми числами Вольфа. Числа Вольфа измеряются по левой шкале, а ОМП Солнца – по правой.

МПСЗ и числа Вольфа на 11-летнем масштабе коррелируют между собой, но также видно отставание чисел Вольфа на 1–2 года от МП. Отметим, что минимум 23-го солнечного цикла характеризовался очень слабой пятнообразовательной активностью. Последний раз такая низкая активность Солнца наблюдалась в 1913 г. При сравнении увеличения чисел Вольфа начала 24-го цикла и аналогичного увеличения в 20-м, 21-м и 22-м циклах, пятнообразовательная активность в 24-м цикле возрастает с меньшей интенсивностью, чем в предыдущих трёх солнечных циклах. Магнитная же активность возрастает также, как и в циклах до этого.

Заключение

В работе проведено исследование вариаций магнитного поля Солнца как звезды по данным Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса за период 1975–2011 гг. Показано, что общее магнитное поле как и пятнообразовательная активность Солнца обладают схожим поведением на масштабе 11-ти лет. Обнаружено запаздывание МПСЗ относительно ряда чисел Вольфа на 1–2 года. Возможно все это свидетельствует о взаимосвязи таких явлений, как ОМП Солнца или МПСЗ и пятнообразовательной активности.

Список литературы

1. Демидов М. Л., Григорьев В. М. Крупномасштабные магнитные поля на Солнце // Солнечно-земная физика. – 2004. – № 6. – С. 10–19.
2. Hale G. E., Nicholson S. B. The law of sun-spot polarity // Astrophysical J., – 1925. – V. 62. – P. 270–300.
3. Мак-Интош П., Драйер М. Наблюдение и прогноз солнечной активности. – М.: Мир, – 1976. – С. 19–20.
4. Демидов М. Л. Магнитное поле Солнца как звезды по результатам стоксометрических измерений в Саянской обсерватории в 1999–2005 гг. // Изв. Крымской астрофизической обсерватории. – 2007. – № 4. – С. 11–17.
5. <http://solar.crao.crimea.ua/>
6. Kotov V. A., Scherrer P. H., Howard R. F., Haneychuk V. I. Magnetic field of the Sun as a Star: The Mount Wilson Observatory catalog 1970-1982 // Astrophysical J., Supplement series. – 1998. – V. 116. – P. 103–117.
7. <http://wso.stanford.edu/>
8. <http://www.sidc.oma.be/sunspot-data/>

Рецензент – доктор физико-математических наук С. А. Вагин.

ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ НА ИОНОГРАММАХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ*E. V. Moskaleva, N. Yu. Zaalov (SPbSU, Saint-Petersburg, Russia)***SIGNATURES OF POLAR CAP LOCAL IRREGULARITIES IN IONOSONDE DATA**

Работа посвящена исследованию характерных особенностей ионограмм вертикального зондирования, связанных с наличием локальных неоднородностей полярной шапки (пятна, дуги). На основе разработанной модели высокоширотной ионосферы, включающей в себя такие неоднородности, как среднеширотный провал, авроральный овал, пятна и дуги в области полярной шапки, рассчитываются вертикальные и наклонные ионограммы для разных периодов времени в различных геофизических условиях. Путем сравнения измеренных и модельных ионограмм возможно определить параметры локальных неоднородностей.

Ключевые слова: полярная шапка, ионограммы вертикального зондирования, локальные неоднородности.

The paper is devoted to investigation of the ionosonde data induced presence of the localized regions of enhanced electron density (patches, arcs). Based on the ionosphere model with irregularities (mid-latitude trough, auroral oval, patches, and arcs) the vertical and oblique ionograms have been simulated for different time and various geophysical conditions. The typical shapes of traces of ionograms have been classified by types. The results of simulation are very reminiscent of the main characteristics of the ionogram observed in high latitudes. It is suggested that the variations of parameters of the model may be employed to estimate the real characteristics of the high latitude ionospheric inhomogeneities.

Keywords: polar cap, vertical ionogram, local irregularities.

В настоящее время мониторинг высокоширотной ионосферы производится различными радиофизическими методами. Среди них можно отметить спутниковые измерения полного электронного содержания (ТЕС – total electron content), данные когерентных коротковолновых (КВ) радаров, данные станций вертикального и наклонного зондирования. Однако интерпретация результатов экспериментальных исследований является крайне непростой задачей вследствие сложности структуры высокоширотной ионосферы и процессов, протекающих в ней.

Особенностью высокоширотной ионосферы является наличие областей увеличенной электронной концентрации в F-слое – пятен (patches) и арок (arcs). Мониторинг ионосферы показывает, что процесс образования и эволюции пятен и арок имеет не регулярный, а скорее стохастический характер. Потoki высокоионизированной ионосферной плазмы, зарождающиеся на дневной стороне Земли в виде языка ионизации, переносятся через полярную шапку в соответствии со структурой конвективных потоков, разделяясь на локализованные области повышенной электронной концентрации в F-слое ионосферы [1]. Их параметры (количество, скорости, траектории) зависят от геофизических условий. Поперечный размер областей повышенной электронной концентрации может достигать тысячи километров (со средним значением около 500 км) [2, 3]. Увеличение электронной плотности может достигать фактора 10 по сравнению с фоновыми значениями. В большинстве случаев, эти образования наблюдаются цугами с интервалом времени в несколько минут. Типичная частота их появления составляет 0,5/час, а скорость имеет порядок нескольких сотен метров в секунду. Вероятность появления в F-слое ионосферы такого рода структур наиболее высока зимой в периоды максимума солнечной активности, хотя иногда они наблюдаются и в периоды минимума солнечной активности, но при этом значительно менее выражены [2].

Градиенты электронной плотности, связанные с крупномасштабными структурами в ионосфере, образуют наклонные отражающие поверхности для КВ-радиоволн. Как следствие, радиосигналы, распространяющиеся в этих областях, часто попадают в приемник под углами, значительно отличающимися от углов, соответствующих распространению вдоль

дуги большого круга. В средних широтах Земли типичные отклонения азимутов прихода радиоволн от азимутов, соответствующих распространению их вдоль дуги большого круга, составляют величину порядка единиц градусов и, как правило, эти отклонения связаны с прохождением солнечного терминатора или с перемещающимися ионосферными возмущениями. В высоких широтах наблюдаются очень большие отклонения азимутов прихода радиоволн от дуги большого круга, где их значения могут достигать ста градусов. Такая сложная модовая структура сигнала обусловлена наличием градиентов электронной плотности в области главного ионосферного провала, расположенного в субавроральной области Земли [4–6], конвективных потоков областей повышенной электронной плотности (пятен) в районе полярной шапки [4] и среднемасштабных неоднородностей ионосферной плазмы в области аврорального овала.

Очевидно, что существенное усложнение модовой структуры сигнала, связанное с возникновением мод, распространяющихся по трассам, значительно отклоняющимся от дуги большого круга, представляет серьезные проблемы для работоспособности систем связи, радиолокации и радионавигации, работающих в КВ-диапазоне.

Вследствие того, что полное решение обратной задачи рассеяния для интерпретации результатов экспериментальных исследований не представляется возможным, актуальной оказывается задача моделирования среды и процессов распространения радиоволн для различных сценариев.

Создание модели радиоканала требует задания непрерывного трехмерного распределения электронной плотности в области вычисления. Соответственно, в нашей вычислительной модели мы попытались использовать общие представления о структуре высокоширотной ионосферы, имея в виду, что модель предназначена для использования в задаче распространения.

Построение модели невозмущенной ионосферы производится на основе экспериментальных данных станций вертикального зондирования. На модель невозмущенной ионосферы (рис. 1, цв. вкл., стр. 118) накладываются неоднородности средних и высоких широт (среднеширотный провал, авроральный овал, пятна, арки). В настоящее время не существует сколько-нибудь надежной модели пятен и арок повышенной электронной плотности полярной ионосферы. В данной работе используется оригинальная модель высокоширотной ионосферы (включающая в себя такие неоднородности как среднеширотный провал, авроральный овал, пятна и дуги), созданная в университете города Лестера (Великобритания) и сотрудниками СПбГУ. Была разработана программа на языке Fortran, использующая модель высокоширотной ионосферы, которая позволяет рассчитывать ионограммы вертикального зондирования высокоширотной ионосферы [7, 8].

В настоящей работе исследуются характерные особенности ионограмм вертикального зондирования ионосферы, обусловленные наличием областей повышенной электронной плотности.

На рисунках 2–5 (цв. вкл., стр. 118) представлены вертикальные ионограммы станции THJ77 (THULE/QANAQ) (77.5N; 69.2E), рассчитанные в области частот от 2 до 12 МГц, соответствующие тем моментам времени, в которые ионограммы имеют существенно различную структуру. Ионограммы можно классифицировать как «спокойные», то есть моделированные в отсутствие неоднородностей (см. рис. 2), имеющие «серп» (см. рис. 3), с отдельными «пятнами» (см. рис. 4) и более сложные (см. рис. 5).

Структура этих ионограмм оказалась весьма похожа на те, что наблюдаются в действительности. Рисунки 6–9 (цв. вкл., стр. 119) иллюстрируют ионограммы, измеренные на станции THJ77 (THULE/QANAQ) 14 января 2011 г. (<http://car.ulm.edu>). Трудно ожидать их совпадения по времени, так как моделированные ионограммы соответствуют определенному сценарию. Однако можно заметить, что все виды экспериментально полученных ионограмм находят свой аналог в моделированных. Также были проведены расчеты и получены вертикальные ионограммы для различных периодов времени в различных геофизических условиях.

Сопоставление измеренных и синтезированных ионограмм дает возможность произвести достаточно надежную их интерпретацию и определить некоторые характерные параметры неоднородностей ионосферы, связанные с существованием областей повышенной электронной концентрации.

Список литературы

1. Weber E. J., Kelly M. C., Vallentin J. O. *a. o.* Rocket measurements within a polar cap arcs // *J. Geophys. Res.* – 1989. – N 94. – P. 6692.
2. McEwen D. J., Harris D. P. Occurrence patterns of F-layer patches over the North Magnetic pole. // *Radio Science.* – 1996. – N 31. – P. 619.
3. McDougall J. W., Grant I. F., Hamza A. Velocity fluctuations associated with polar cap patches. // *Radio Science.* – 1996. – N 31. – P. 595.
4. Warrington E. M., Rogers N. C., Jones T. B. Large HF bearing errors for propagation paths contained within the polar cap. // *IEE Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation.* – 1997. – V. 144. – N 4. – P. 241.
5. Siddle D. R., Zaalov N. Y., Stocker A. J., Warrington E. M. The time-of-flight and direction of arrival of HF radio signals received over a path along the mid-latitude trough, theoretical considerations. // *Radio Science.* – 2004. – N 39. – RS4009, doi: 10.1029/2004RS003052.
6. Siddle D. R., Stocker A. J., Warrington E. M. The time-of-flight and direction of arrival of HF radio signals received over a path along the mid-latitude trough, observations. // *Radio Science.* – 2004. – N 39. – RS4008, doi: 10.1029/2004RS003049.
7. Zaalov N. Y., Warrington E. M., Stocker A. J. The simulation of off-great circle HF propagation effects due to the presence of patches and arcs of enhanced electron density within the polar cap ionosphere. // *Radio Science.* – 2003. – N 38. – P. 1052.
8. Zaalov N. Y., Warrington E. M., Stocker A. J. A ray-tracing model to account for off-great circle HF propagation over northerly paths. // *Radio Science.* – 2005. – N 40. – RS4006.

Рецензент – доктор физико-математических наук Д. И. Понявин.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УПРУГИХ ВОЛН С НЕЛИНЕЙНО-УПРУГИМ ШАРОМ

A. V. Ponomarenko (SPbSU, Saint-Petersburg, Russia)

INTERACTION OF THE ELASTIC WAVES WITH THE NONLINEAR-ELASTIC SPHERE

В работе рассматривается задача рассеяния P- и S-волн на нелинейно-упругом шаре. В качестве источника выбран точечный источник направленной силы. Нелинейное уравнение движения решается методом возмущений при помощи функции Грина линейного уравнения. Исследуется структура рассеянного поля. Каждая компонента рассеянного поля состоит из PP-, PS-, SP- и SS-составляющих. Спектр каждой составляющей содержит дополнительные максимумы. Этот факт может быть использован при практическом наблюдении рассеянного поля для определения нелинейных свойств рассеивающего объекта. Показано, что амплитуда рассеянного поля при взаимодействии поперечной волны с нелинейно-упругим объектом значительно выше, чем при взаимодействии с ним продольной волны. Максимальными амплитудами обладают SP- и SS-составляющие. Построены диаграммы рассеяния модуля этих составляющих для моделей с элементарными рассеивающими объектами и получена зависимость максимального значения модуля рассеянного поля от объёма рассеивающего объекта для моделей с размерами, близкими к реальным. На основании зависимости делается вывод о том, может ли рассеянное поле быть зарегистрировано или нет.

Ключевые слова: рассеяние P- и S-волн, нелинейно-упругий объект, диаграммы рассеяния.

The solution was considered for the scattering of the P- and S- waves from the single source on the nonlinear-elastic sphere. The source of the seismic waves is the point source of the directed force. The nonlinear motion equation is solved with the help of the Green function of the linear equation, basing on the perturbation method. The structure of the scattered field is studying. Each component of the scattered field consists from PP-, PS-, SP- and SS-waves. Spectrum of each wave has additional maximums in comparison with the spectrum of the initial signal. This fact can be used to determine the nonlinear-elastic scattering object. Also it is shown that the amplitude of the scattered field is bigger in the case of the S-wave interaction with the nonlinear object than in the case of the P-wave interaction. SP- and SS-waves have maximum amplitudes. The scattering diagrams of the maximum module of these waves were obtained for the models with elementary scattering objects. Also the dependence curve of the maximum values of the scattered amplitude from the volume of the scattering object was obtained for the set of the models with sizes close to the real ones. Using this curve it is concluded can the scattered field be realistically recorded or not.

Keywords: scattering of the P- and S- waves, nonlinear-elastic sphere, scattering diagrams.

Введение

Одной из главных прикладных задач сейсмических исследований является поиск и оконтуривание объёмов среды, которая может содержать те или иные полезные ископаемые. Физическая нелинейность связана с такими характеристиками горных пород, как неоднородность, пористость, трещиноватость. Резервуары углеводородов, являющиеся двух- и трёх-фазными средами, обладают нелинейными свойствами, которые проявляются в наблюдаемых полях [1]. По таким эффектам, как отсутствие принципа суперпозиции, присутствие дополнительных гармоник в волновом поле, зависимость структуры поля от его интенсивности можно судить о наличии нелинейности в тех средах, где распространялось это поле.

При взаимодействии плоских волн с границей между линейно-упругой и нелинейно-упругой средами образуются отражённые волны, которые можно назвать нелинейными. Проходящее в нелинейную среду волновое поле изменяется, в него добавляются нелинейные волны [2]. Аналогично при взаимодействии упругих волн с трёхмерным нелинейным объектом образуется рассеянное нелинейное поле. В статье [3] исследовано взаимодействие в нелинейной области двух сферических волн от разных источников и построены диаграммы рассеяния для волны разностной частоты от нелинейной области, имеющей форму куба. Утверждается, что амплитуда рассеянных волн такова, что их можно зарегистрировать, если рассеивающий нелинейно-упругий объект имеет довольно большие размеры.

Постановка задачи и решение

В настоящей работе рассматривается вопрос о взаимодействии упругих волн от одного источника типа направленной силы с нелинейно-упругим шаром.

На рис. 1 показана постановка рассматриваемой задачи. Решение задачи о взаимодействии основывается на решении уравнения движения методом малого параметра (методом возмущений) и построения при помощи функции Грина линейного уравнения.

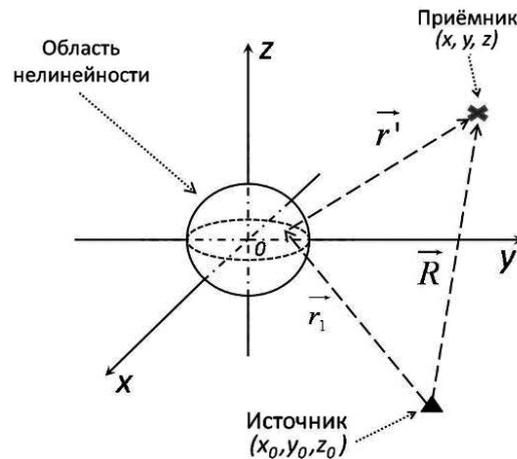


Рис. 1. Постановка задачи

Выражение для полного поля в любой точке с координатами (x, y, z) может быть представлено суммой прямого поля от источника и поля от рассеивающего объекта. Считая рассеянное поле малым по сравнению с прямым, воспользуемся методом малого параметра: $\vec{U} = \vec{U}^0 + \vec{U}^1$, где $|\vec{U}^0| \gg |\vec{U}^1|$. Будем решать задачу в дальней волновой зоне. Компоненты рассеянного поля находятся при помощи свёртки тензора Грина уравнения движения с соответствующей правой частью [4]:

$$U_i^1(\vec{R}, t) = -\iint G_{ij}(\vec{r}', t - \tau) \cdot NL_j(\vec{U}^0(\vec{r}', \tau)) d\vec{r}' d\tau. \quad (1)$$

Выражение NL_j является функцией линейных и нелинейных модулей упругости, и первых и вторых производных прямого поля \vec{U}^0 [4].

Численное моделирование

Для моделирования были выбраны следующие параметры: значение скоростей волн в опорной среде $V_p = 4500$ м/с; $V_s = 1500$ м/с; плотность опорной среды $\rho = 2300$ кг/м³. Упругие параметры рассеивающего шара такие же, как и у опорной среды, значения нелинейных параметров взяты из работы [5]: $l = -1,11 \cdot 10^4$ ГПа, $m = -3,66 \cdot 10^3$ ГПа, $n = 8,71 \cdot 10^4$ ГПа. В качестве временной функции источника использовалась первая производная функции Гаусса, амплитуда сигнала равна 10^9 Н.

Исследование структуры компонент прямого и рассеянного полей показало, что рассеянное поле состоит из четырёх составляющих: PP-, PS-, SP- и SS-вступлений. При достаточном отличии скоростей продольной и поперечной волн легко подобрать расстояния между источником, центром рассеивающей области и приёмником, чтобы разделить рассеянное поле на эти составляющие. На рис. 2 представлена x-компонента рассеянного поля. Параметры модели: источник типа направленной силы находится в точке с координатами (60 м, 0 м, 0 м); приёмник расположен в точке с координатами (-20 м, 20 м, 20 м); частота сигнала в источнике 200 Гц; радиус нелинейно-упругого шара равен 2 м. На рис. 2 явно наблюдаются SP-

и SS-вступления. PP- и PS-вступления имеют значительно меньшую амплитуду и могут быть видны лишь при детальном рассмотрении трассы. Амплитудный спектр каждой составляющей содержит дополнительный спектральный максимум по сравнению со спектром исходного сигнала, у которого центральная частота равна 200 Гц. На рис. 3 представлен амплитудный спектр SS-составляющей x -компоненты рассеянного поля, показанной на рис. 2.

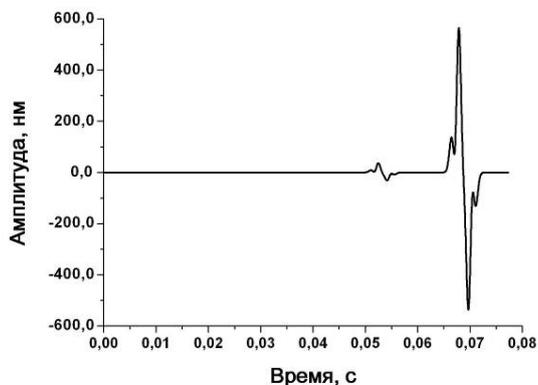


Рис. 2. x -компонента рассеянного поля

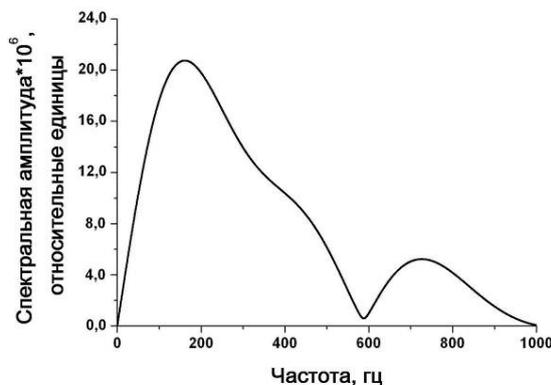


Рис. 3. Амплитудный спектр SS-составляющей x -компоненты рассеянного поля

Факт наличия дополнительных спектральных максимумов в спектральном составе рассеянного поля может быть использован при практическом определении нелинейных свойств рассеивающего объекта. Однако для этого необходимо, чтобы нелинейное рассеянное поле можно было зарегистрировать.

Для проведения качественной оценки процесса рассеяния расположим приёмники на расстоянии $R = 40$ м – симметрично относительно центра рассеивающей области. Пусть источник типа направленной силы расположен в точке $(0$ м, 0 м, -60 м), направление силы выберем вдоль оси OZ (рис. 4). В качестве примера построим совокупность трасс третьей компоненты рассеянного поля (рис. 5) с точек приёма a, b, c, d, e (трассы f, g, h оказались симметричны трассам d, c, e).

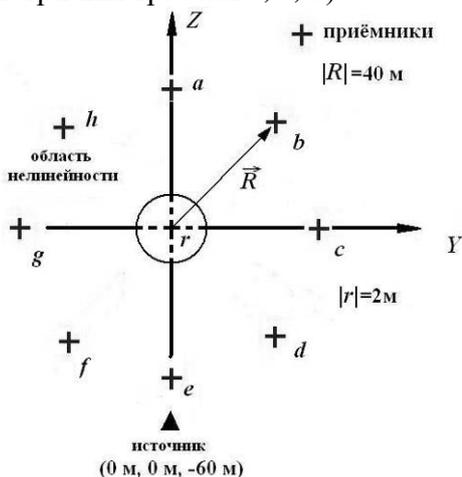


Рис. 4. Симметричная схема наблюдений

При выбранном направлении действия силы источника основными рассеянными волнами будут PP- и PS-волны ввиду того, что поперечные волны практически не взаимодействуют с рассеивающим объектом. При расположении малого рассеивающего объекта в центре координат сила, действующая вдоль оси OZ , вызывает появление рассеянных волн, порождённых продольной падающей волной. На рис. 5 наиболее ярко выражены на всех трассах PP- и PS-волны. Чтобы основными по амплитудам были SP- и SS-волны, следует выбрать другое направление силы в источнике. Если сила направлена вдоль оси OX , с рассеивающим объектом в основном взаимодействует поперечная волна. Основными рассеянными волнами будут теперь SP- и SS-волны (рис. 6). Заметим, что при одинаковой амплитуде силы в источнике максимальные амплитуды SP- и SS-рассеянных волн при направлении силы в источнике вдоль оси OX на несколько порядков больше максимальной амплитуды PS-волн при направлении силы в источнике вдоль оси OZ . Это происходит вследствие разницы значений амплитудных коэффициентов при продольных и поперечных членах в выражении для рассеянного поля [4]. Несомненно, именно рассеянное поле максимальной амплитуды (SS-волна) может быть использовано в практических целях.

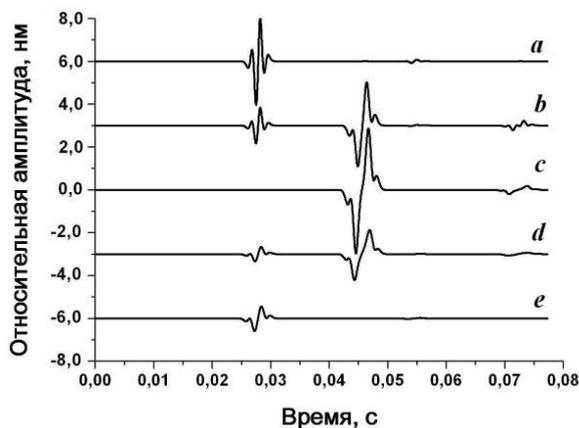


Рис. 5. Третья компонента рассеянного поля по приёмникам
Сила в источнике направлена вдоль OZ

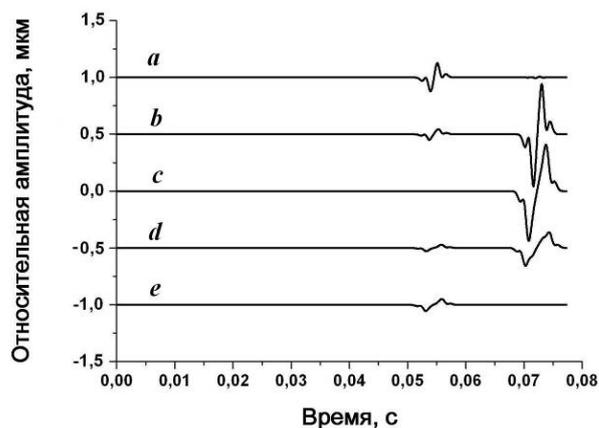


Рис. 6. Третья компонента рассеянного поля по приёмникам
Сила в источнике направлена вдоль OX

Построение диаграмм рассеяния

Чтобы показать, как происходит рассеяние волнового поля, были построены диаграммы рассеивания SP- и SS-волн (рис. 7, 8) при направлении действия силы в источнике вдоль оси OX . На каждом рисунке в плоскости (XZ) построены диаграммы модуля составляющей. Показаны направления распространения n_s и смещения a_s падающей поперечной волны.

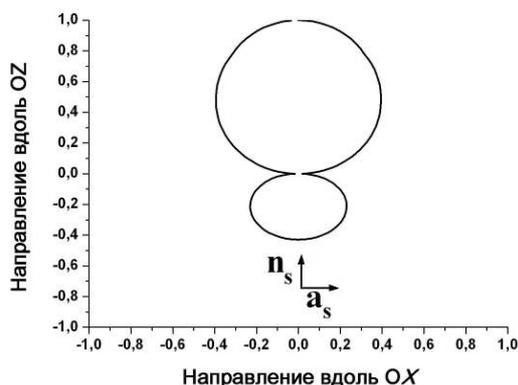


Рис. 7. Рассеяние SP-волны, модуль

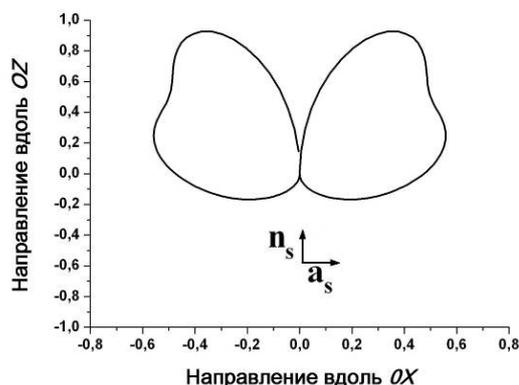


Рис. 8. Рассеяние SS-волны, модуль

Процесс рассеяния упругих волн на нелинейно-упругом объекте рассмотрен в дальней волновой зоне. Характерный размер рассеивающего объекта – диаметр шара, равный 4 м, что почти в два раза меньше длины поперечной волны (7,5 м). Диаграммы рассеяния модуля компонент поля (см. рис. 7, 8) очень близки по форме к диаграммам рассеяния на элементарном рассеивателе. В самом деле, срезы от диаграмм рассеяния на рис. 9, 10 по плоскости (XZ) имеют похожую форму, что и диаграммы на рис. 7, 8. Для достаточно малых рассеивающих объектов форма рассеяния вполне может описываться формой рассеяния на элементарном объекте.

Практический пример

В качестве практического примера было проведено моделирование рассеяния на моделях с реальными размерами на основе примера из статьи [3]. Схема моделирования показана на рис. 11. Рассеивающий нелинейно-упругий шар расположен в центре схемы, его центр совпадает с началом координат. Приёмники расположены симметрично, на расстоянии 1000 м от центра рассеивающего объекта; источник находится в точке с координатами (0 м, 0 м, -1000 м). Основная частота сигнала 50 Гц. Амплитуда точечной силы в источнике

$A_f=10^6$ Н, сила направлена вдоль OX . Упругие параметры модели такие же, как и в примерах, рассмотренных выше.

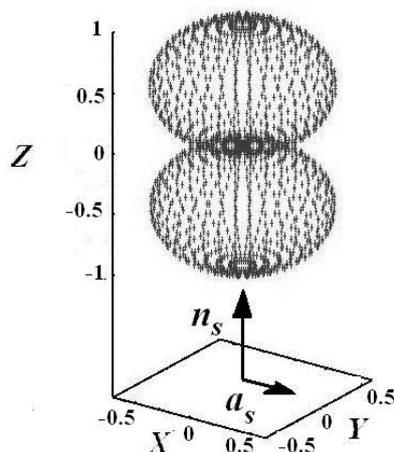


Рис. 9. Рассеяние SP-волны на элементарном нелинейно-упругом рассеивателе

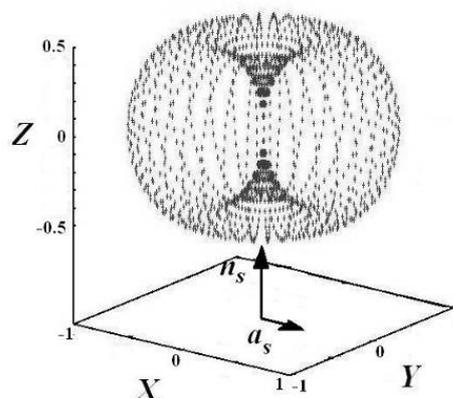


Рис. 10. Рассеяние SS-волны на элементарном нелинейно-упругом рассеивателе

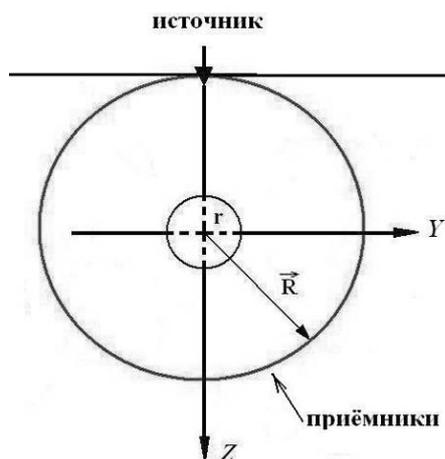


Рис. 11. Схема моделирования

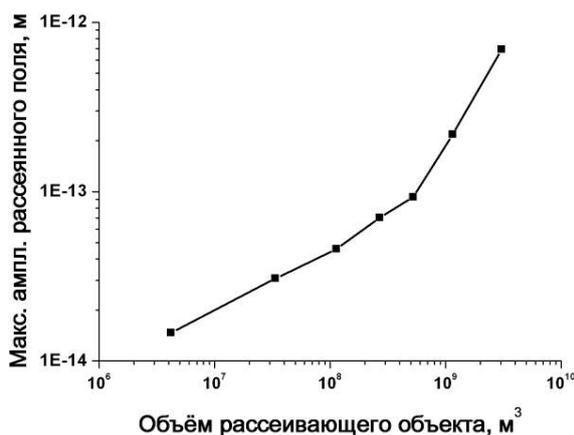


Рис. 12. Зависимость максимального значения модуля рассеянного поля от объёма рассеивающего объекта

Основная цель данного моделирования – определение максимально возможной амплитуды рассеянного поля при параметрах, близких к реальным. Известно, что можно зарегистрировать колебания с амплитудой порядка $10^{-9} - 10^{-10}$ м. В статье [3] показано, что амплитуда рассеянного на нелинейно-упругом объекте поля разностной частоты (использовалось два источника) при объёме объекта 10^9 м³ достигает 10^{-11} м. В настоящей работе построена зависимость максимального значения модуля рассеянного поля от объёма рассеивающего объекта (рис. 12). Если радиус нелинейно-упругого шара равен 650 м, то его объём порядка 10^9 м³. В рассмотренном примере максимальное значение амплитуды модуля рассеянного поля равно 10^{-12} м. При этом значения двух последних точек зависимости (см. рис. 12) являются несколько завышенными из-за недостаточного количества точек разбиения объёма при вычислении выражения (1). Таким образом, рассеянное нелинейно-упругим объектом поле от одного источника при данных параметрах невозможно зарегистрировать. Возможно, значение амплитуды рассеянного поля будет больше при увеличении объёма рассеивающего объекта.

Заключение

В работе было проведено моделирование рассеяния упругих волн на нелинейно-упругой сфере, расположенной в упругой среде. Оказалось, что спектральный состав рассеянного поля содержит дополнительные спектральные максимумы, которые могут быть использованы для выделения нелинейно-упругого рассеивающего объекта. Показано, что амплитуда рассеянного поля при взаимодействии поперечной волны с нелинейно-упругим объектом значительно выше, чем при взаимодействии продольной волны с нелинейно-упругим объектом. К сожалению, при моделировании задачи с реальными размерами оказалось, что максимальное значение амплитуды рассеянного поля слишком мало, чтобы его можно было зарегистрировать.

Выражаю признательность моему научному руководителю Борису Марковичу Каштану, а также Борису Кувшинову (Shell International E&P) за помощь и советы.

Работа была выполнена при поддержке грантов АФГИР RUG1-30005-ST-08 и ГК 02.740.11.0331.

Список литературы

1. Zhukov A. P., Loginov K. I., Shneerson M. B., Shulakova V. E., Kharisov R. G. and Eki-menko V. A. Nonlinear properties of vibrator-generated wavefields and their application to hydrocarbon detection // *The Leading Edge*. – 2007. – V. 26. – N 11. – P. 1395–1402.
2. Литвин А. Л., Цванкин И. Д. Взаимодействие плоских волн с границей нелинейно-упругой среды // *Проблемы нелинейной сейсмологии*. – М.: Наука, 1987. – С. 128–136.
3. Beresnev I. A. Interaction of two spherical elastic waves in a nonlinear five-constant medium. // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1993. – V. 94. – N. 6. – P. 3400–3404.
4. Пономаренко А. В., Каштан Б. М. Взаимодействие упругих волн с трёхмерным нелинейно-упругим объектом. // *Вопросы геофизики*. – 2011. СПбГУ – (в печати).
5. Korneev V. A., Nihei K. T., Myer L. R. Nonlinear interaction of plane elastic waves. – Berkeley: – 1998.

Рецензент – доктор физико-математических наук В. Н. Троян.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ НА ОСТРОВАХ СРЕДНЕМ И ПЕЖОСТРОВЕ БЕЛОГО МОРЯ

PRELIMINARY RESULTS OF MAGNETOTELLURIC SOUNDING ON ISLANDS SREDNIY AND PEZHOSTROV OF THE WHITE SEA

В июле 2011 г. были проведены магнитотеллурические зондирования на двух островах Белого моря: Среднем и Пезжострове. Запись велась станцией GI-MTS-1 (СПбФ ИЗМИРАН). Прямое двумерное (2D) моделирование [1] использовалось с целью выбора инварианта импеданса для одномерной (1D) инверсии. Для 1D интерпретации использовался алгоритм 1D-инверсии методом SVD с адаптивной регуляризацией и соответствующая ему программа [2]. Обработка временных рядов осуществлялась по программе, описанной в работе [3]. Длина непрерывной записи в каждом из двух пунктов зондирования составляла пять суток. Результаты описанного подхода интерпретации в условиях ограниченной информации могут быть использованы как стартовая модель для дальнейших исследований.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, береговой эффект, прямое 2D-моделирование, 1D-инверсия.

In July 2011 were carried out magnetotelluric sounding on two White Sea islands: Sredniy and Pezhostrov. Recordings were using the station GI-MTS-1. Forward 2D modeling [1] was used to select the impedance invariant for 1D inversion. The one-dimensional interpretation carried out using 1D inversion by SVD method with adaptive regularization and the corresponding program [2]. Processing time series was made by the program described in [3]. Continuous recording length in each of the two sounding points was five days. It is shown that the results of this approach in the interpretation of limited information can be used as a starting model for further studies.

Keywords: magnetotelluric sounding, coastal effect, forward 2D-modelling, 1D-inversion.

Введение

В июле 2011 г. были проведены магнитотеллурические зондирования на двух островах Белого моря: остров Средний – расположен в Чупинской губе Кандалакшского залива (Керетский архипелаг), и Пезжостров – расположен между проливами Прямая и Глубокая Салмы. Карта местности представлена на рис. 1 (цв. вкл., стр. 119). Запись велась станцией GI-MTS-1 (СПбФ ИЗМИРАН).

Геологическое описание региона

Северная часть побережья Белого моря представлена Центральнокольской зоной Балтийского щита, где осадочный чехол практически отсутствует. Восточная часть Балтийского щита делится на 3 блока – Мурманский, Беломорский и Карельский. В зонах сочленения этих блоков расположились древние рифтовые зоны, возраст которых оценивается в пределах от 2,5 до 7 млн лет. Место проведения работ находилось вблизи границы Беломорского и Карельского блоков, на территории Лоухского синклинория, который образован породами Хетоломбийской, Керетской и Чупинской свит. Беломорский блок характеризуется полициклическим развитием, неоднократными интенсивными деформациями, высокобарическим метаморфизмом, гранитоидным и базитовым магматизмом и сложен преимущественно из гранитных пород. На Карельском блоке основные породы представлены метаболитами, габброидами, базальтоидами. В данный период на Балтийском щите продолжает происходить процесс гранитизации океанической коры.

Цель работы

Цель – в анализе исследований результатов одиночных зондирований с привлечением прямого двумерного математического моделирования в подобных ситуациях (сильное влия-

ние берегового и островного эффекта на результаты зондирований и явная горизонтальная неоднородность среды) построить геоэлектрический разрез, используя одномерную инверсию.

Обработка временных рядов

Длина непрерывной записи в каждом из двух пунктов зондирования составляла пять суток. Исходный материал с частотой дискретизации 50 Гц записан в виде часовых файлов, содержащих компоненты V_x, V_y, V_z [Нтл], U_x, U_y, U_z [мВ] (последняя компонента не активирована и используется для контроля уровня шума). Обработка временных рядов осуществлялась по программе, описанной в работе [3].

До проведения спектрального анализа временные ряды прореживались с использованием процедуры децимации (уменьшения частоты дискретного во времени сигнала путем удаления его отсчетов). В данном случае использовался шаг $s = 10, 100, 1000$. По окончании работы программы децимации выдавалась новая частота дискретизации и число строк выходного файла, которые использовались для проведения спектрального анализа при заданных полуширине усредняемых частот и минимальной когерентности. Далее суммировались все полученные после спектрального анализа результаты для разных шагов децимации и проводился расчет компонент импеданса для доверительной вероятности, равной 0,95. В результате получались средние значения компонент модуля и фазы импеданса, средние значения компонент кажущегося сопротивления и погрешности измерения.

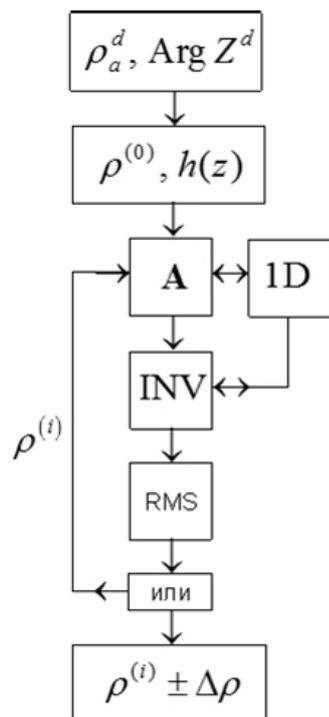


Рис. 2. Блок-схема алгоритма одномерной интерпретации

Одномерная интерпретация

Для 1D-интерпретации использовался алгоритм 1D-инверсии методом SVD с адаптивной регуляризацией и соответствующая ему программа [2]. Схема алгоритма представлена на рис. 2. Исходными данными для алгоритма являются модуль кажущегося сопротивления, фаза импеданса и периоды, на которых они определены. По этим данным строится начальная модель. В следующем блоке происходит формирование матрицы чувствительности, необходимой для решения обратной задачи. Блок 1D – решение одномерной прямой задачи. В блоке RMS вычисляется невязка. Совокупность блоков A, 1D, INV, RMS и ИЛИ образует итерационную схему алгоритма.

На рис. 3 и 4 (цв. вкл., стр. 120) представлены кривые, полученные по результатам интерпретации данных МТЗ на острове Среднем. Кроме того, на рис. 4 приведено сравнение результатов одномерной инверсии, полученных при помощи методов SVD и МЭЛ (метод эффективной линеаризации).

Двумерное моделирование

Прямое 2D-моделирование производилось по программе И. Л. Варданянца [1] на основе данных о геоэлектрическом разрезе, полученных для точки Кузема (рис. 5 и 6, цв. вкл., стр. 120), и использовалось с целью выбора инварианта импеданса для 1D-инверсии.

Априорный геоэлектрический разрез, используемый для прямого 2D-моделирования, представлен на рис. 7 (цв. вкл., стр. 121).

Нулевой километр соответствовал границе «материк-море», 1-й км – границе «море-остров», на которой располагалась измерительная станция.

Поскольку выводы для обоих островов аналогичны, представлены результаты интерпретации данных зондирования на Пезжострове.

Сравнение кривых, представленных на рис. 8 и 9 (цв. вкл., стр. 121) позволяет сделать вывод о том, что в измеряемом электромагнитном поле преобладает Н-поляризация.

Результаты

На рис. 10 (цв. вкл., стр. 122) представлены полученные кривые для $\rho_{эфф}$. Их использование для 1D-инверсии позволяет получить усредненные кривые, представленные на рис. 11 (цв. вкл., стр. 122).

Совпадение значений кажущихся сопротивлений, полученных на больших периодах для острова Среднего и Пежострова свидетельствует о хорошей согласованности с глобальными данными.

Заметное различие в результатах интерпретации 1D- и 2D-моделей объясняется трехмерным характером неоднородности рассматриваемого геоэлектрического разреза и тем, что в качестве нормальной модели была взята модель для точки Кузема.

В дальнейшем планируется провести зондирования и на других островах рассматриваемого региона; выполнить интерпретацию большего количества данных с использованием прямого 3D-моделирования; построить нормальную модель и геоэлектрическую 3D-модель региона.

Список литературы

1. Варданянц И. Л. Расчеты методом сеток магнитотеллурических полей над двумерно-неоднородными средами. Ч. 1, 2 // Вопросы геофизики. – 1978. – № 27. – С. 36–40; 1978 – № 28. – С. 155–163.

2. Вагин С. А., Сальцберг А. В. Алгоритм одномерной инверсии магнитотеллурических данных с адаптивной регуляризацией. // Материалы Пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли. – ЭМЗ–2011. В двух книгах. Книга 2. – СПб.: СПбГУ, 2011. – С. 15.

3. Вагин С. А. Алгоритм обработки магнитотеллурических данных в среде МАТЛАБ // Вопросы геофизики. – 2011. – № 42. – С. 80–93.

Рецензент – доктор физико-математических наук А. А. Ковтун.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ НУЛЕВОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА

N. V. Fadeeva, D. D. Byzov (Institute of Geophysics UB RAS, Yekaterinburg, Russia)

MODELS OF AREAS CREATING A ZERO GRAVITATIONAL POTENTIAL

Рассматриваются эквивалентные по полю решения линейной двумерной обратной задачи гравиразведки. Вопрос эквивалентности сводится к описанию распределения плотности внутри области с известными границами при условии равенства нулю ее внешнего гравитационного потенциала. Построены примеры областей переменной плотности с кусочно-аналитической границей, создающие нулевое внешнее гравитационное поле.

Ключевые слова: линейная двумерная обратная задача гравиразведки, эквивалентные решения, область нулевого внешнего потенциала.

The 2-D linear inverse gravimetric problem equivalent solutions are considered. The equivalence problem is reduced to a description of the density distribution within the area with known boundaries, subject to equality of the external gravitational potential with zero. We construct the examples of areas of variable density with piecewise analytic boundary, creating a zero external gravitational field.

Keywords: a gravimetric two-dimensional linear inverse problem, equivalent solutions, external gravitational zero potential.

Эквивалентные области

Рассмотрим область τ трехмерного пространства R^3 , ограниченную замкнутой поверхностью S и заполненную веществом с массовой плотностью $\sigma(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)})$. Внешний гравитационный потенциал $V(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)})$ этой области определяется формулой:

$$V(x_{out}^{(1)}, x_{out}^{(2)}, x_{out}^{(3)}) = G \iiint_{\tau} \frac{\sigma(x_{in}^{(1)}, x_{in}^{(2)}, x_{in}^{(3)})}{r} dx_{in}^{(1)} dx_{in}^{(2)} dx_{in}^{(3)}, \quad (1)$$

где $(x_{out}^{(1)}, x_{out}^{(2)}, x_{out}^{(3)})$ – произвольная точка пространства, не принадлежащая области τ ; $(x_{in}^{(1)}, x_{in}^{(2)}, x_{in}^{(3)})$ – точка внутри области τ ; G – гравитационная постоянная; $r = [(x_{out}^{(1)} - x_{in}^{(1)})^2 + (x_{out}^{(2)} - x_{in}^{(2)})^2 + (x_{out}^{(3)} - x_{in}^{(3)})^2]^{1/2}$ – расстояние между двумя точками пространства.

Две области τ_1 и τ_2 , создающие тождественно равные внешние потенциалы (1), называются эквивалентными. Изучение теории эквивалентности имеет, прежде всего, важное практическое значение: при приближенном решении обратной задачи следует строить соответствующее эквивалентное семейство, а затем, исходя из имеющейся геологической информации, выбирать из этого семейства конкретное решение [1]. Построение семейства эквивалентных по полю областей можно проводить на основе решения линейной или нелинейной обратной задачи гравиразведки. Соответственно, выделяют два подхода к построению эквивалентного семейства:

1. При задании распределения плотности в качестве параметра надо определить границы тел, создающих равные внешние потенциалы (нелинейная обратная задача).

2. При известной границе области надо найти распределение плотности, обеспечивающее равенство внешних потенциалов (линейная обратная задача).

Первый подход (в рамках нелинейной обратной задачи) подробно рассматривался различными авторами. В частности, П. С. Новиков доказал единственность решения такой задачи для класса звездных тел и постоянной плотности [2]. М. А. Бродским, А. И. Прилепко, И. М. Рапопортом и другими найдены различные классы тел и распределения плотностей, для которых доказана единственность решения данной задачи [3, 4, 5].

Во втором подходе задача восстановления плотности σ по внешнему потенциалу V при известной границе S , в общем случае, не имеет единственного решения – в пределах области τ можно определить относительные плотности σ_0 , которые создают нулевой внешний потенциал:

$$\iiint_{\tau} \frac{\sigma_0(x_{in}^{(1)}, x_{in}^{(2)}, x_{in}^{(3)})}{r} dx_{in}^{(1)} dx_{in}^{(2)} dx_{in}^{(3)} = 0.$$

Тела с заданной границей, но с разными плотностями σ и $\sigma' = \sigma + \sigma_0$ являются эквивалентными относительно внешнего потенциала V .

Таким образом, построение семейства эквивалентных по полю решений линейной обратной задачи гравиметрии можно свести к исследованию распределения плотности внутри области с известными границами при условии равенства нулю ее внешнего гравитационного потенциала [6].

Построение областей нулевого внешнего потенциала

Рассмотрим случай, когда плотность не зависит от одной из координат:

$$\sigma(x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(3)}) = \sigma(x^{(1)}, x^{(2)}) \quad \forall x^{(3)} \in R.$$

Пусть также область τ представляет собой цилиндрическое тело с образующими, параллельными оси $Ox^{(3)}$, и направляющей кривой L в плоскости $Ox^{(1)}x^{(2)}$.

Такие предположения позволяют рассматривать задачу распределения плотности в области D – сечении области τ плоскостью $Ox^{(1)}x^{(2)}$ (рис. 1).

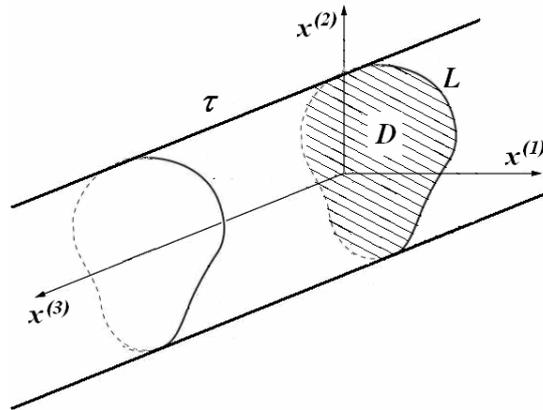


Рис. 1. Пример распределения плотности:

область τ – цилиндрическое тело; область D – сечение тела τ плоскостью $Ox^{(1)}x^{(2)}$

Покажем, что при данных ограничениях внешнее гравитационное поле $g = \nabla V$ не зависит от $x^{(3)}$ и третья компонента поля g равна нулю.

Производные гравитационного потенциала записываются в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V(x_{out}^{(1)}, x_{out}^{(2)}, x_{out}^{(3)})}{\partial x_{out}^{(1)}} &= -G \iiint_{\tau} \frac{\sigma(x_{in}^{(1)}, x_{in}^{(2)})(x_{out}^{(1)} - x_{in}^{(1)}) dx_{in}^{(1)} dx_{in}^{(2)} dx_{in}^{(3)}}{((x_{out}^{(1)} - x_{in}^{(1)})^2 + (x_{out}^{(2)} - x_{in}^{(2)})^2 + (x_{out}^{(3)} - x_{in}^{(3)})^2)^{3/2}} = \\ &= -2G \iint_D \frac{\sigma(x_{in}^{(1)}, x_{in}^{(2)})(x_{out}^{(1)} - x_{in}^{(1)}) dx_{in}^{(1)} dx_{in}^{(2)}}{(x_{out}^{(1)} - x_{in}^{(1)})^2 + (x_{out}^{(2)} - x_{in}^{(2)})^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V(x_{out}^{(1)}, x_{out}^{(2)}, x_{out}^{(3)})}{\partial x_{out}^{(2)}} &= -G \iiint_{\tau} \frac{\sigma(x_{in}^{(1)}, x_{in}^{(2)})(x_{out}^{(2)} - x_{in}^{(2)}) dx_{in}^{(1)} dx_{in}^{(2)} dx_{in}^{(3)}}{((x_{out}^{(1)} - x_{in}^{(1)})^2 + (x_{out}^{(2)} - x_{in}^{(2)})^2 + (x_{out}^{(3)} - x_{in}^{(3)})^2)^{3/2}} = \\ &= -2G \iint_D \frac{\sigma(x_{in}^{(1)}, x_{in}^{(2)})(x_{out}^{(2)} - x_{in}^{(2)}) dx_{in}^{(1)} dx_{in}^{(2)}}{(x_{out}^{(1)} - x_{in}^{(1)})^2 + (x_{out}^{(2)} - x_{in}^{(2)})^2}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial V(x_{out}^{(1)}, x_{out}^{(2)}, x_{out}^{(3)})}{\partial x_{out}^{(3)}} = -G \iiint_{\tau} \frac{\sigma(x_{in}^{(1)}, x_{in}^{(2)})(x_{out}^{(3)} - x_{in}^{(3)}) dx_{in}^{(1)} dx_{in}^{(2)} dx_{in}^{(3)}}{((x_{out}^{(1)} - x_{in}^{(1)})^2 + (x_{out}^{(2)} - x_{in}^{(2)})^2 + (x_{out}^{(3)} - x_{in}^{(3)})^2)^{3/2}} = 0,$$

поскольку

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(x_{out}^{(3)} - x_{in}^{(3)}) dx_{in}^{(3)}}{((x_{out}^{(1)} - x_{in}^{(1)})^2 + (x_{out}^{(2)} - x_{in}^{(2)})^2 + (x_{out}^{(3)} - x_{in}^{(3)})^2)^{3/2}} = 0, \text{ как}$$

интеграл от нечетной функции по симметричной области.

Перейдем к комплексным переменным [7]. Обозначим: $z = x_{out}^{(1)} + ix_{out}^{(2)} = x + iy$, $\zeta = x_{in}^{(1)} + ix_{in}^{(2)} = \xi + i\eta$. В этом случае функцию плотности двух вещественных переменных можно записать как новую функцию комплексных переменных, которую обозначим тем же символом:

$$\sigma(x_{in}^{(1)}, x_{in}^{(2)}) = \sigma\left(\frac{\zeta + \bar{\zeta}}{2}, \frac{\zeta - \bar{\zeta}}{2i}\right) = \sigma(\zeta, \bar{\zeta}).$$

Рассмотрим функцию комплексной напряженности логарифмического потенциала области D :

$$u(z) = \frac{-2}{\pi} \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{1}{\pi} (-V'_x + iV'_y) = \frac{-G}{\pi} \iint_D \frac{\sigma(\zeta, \bar{\zeta})}{\zeta - z} d\zeta d\bar{\zeta},$$

где V'_x, V'_y – горизонтальная и вертикальная составляющие гравитационного поля.

С помощью комплексной формулы Римана-Грина интеграл по области D сводится к интегралу по границе L этой области [8]:

$$u(z) = -\frac{G}{2\pi i} \int_L \frac{M(\zeta, \bar{\zeta})}{\zeta - z} d\zeta, \quad M(\zeta, \bar{\zeta}) = \int_L \sigma(\zeta, \bar{\zeta}) d\bar{\zeta}.$$

Таким образом, для отыскания плотностей, создающих нулевой внешний потенциал, необходимо найти решения уравнения:

$$u(z) = -\frac{G}{2\pi i} \int_L \frac{1}{\zeta - z} \int_L \sigma_0(\zeta, \bar{\zeta}) d\bar{\zeta} d\zeta \equiv 0.$$

В работе А.В. Цирульского, Д.В. Бахтерева [9] дается конструктивное описание такого класса плотностей.

Теорема

Пусть область D ограничена кусочно-аналитической кривой, состоящей из n аналитических дуг L_k ($k=1, 2, \dots, n$) с уравнениями $f_k(x, y)=0$ соответственно. Пусть плотность области D задается формулой:

$$\sigma_0(x, y) = \Delta(\varphi(x, y) \prod_{k=1}^n f_k^2(x, y)), \quad (2)$$

где $\varphi(x, y)$ – произвольная, дважды непрерывно дифференцируемая по обоим переменным в области D функция. Тогда внешний гравитационный потенциал области D тождественно равен нулю.

Модельные примеры

Далее приведем некоторые примеры построения *двумерных областей* с плотностью (2), которые создают нулевой внешний потенциал.

Область I (рис. 2, цв. вкл., стр. 122) представляет собой квадрат со сторонами, параллельными осям координат; центром в начале координат; длиной стороны, равной 2. Используется функция: $\varphi(x, y) = (x^2 - 1)(y^2 - 1)$. Из приведенного примера видно, что можно строить симметричные области с аномалией одного знака внутри области и компенсирующими аномалиями другого знака по краям этой области.

Область 2 (рис. 3, цв. вкл., стр. 122) также представляет собой квадрат со сторонами, параллельными осям координат; центром в начале координат; длиной стороны, равной 2. Используется другая функция $\varphi(x, y) : \varphi(x, y) = (x^2 - 1)(y^2 - 1)(x^2 - 4)^3(y - 2)^3$. Второй пример показывает, что с помощью $\varphi(x, y)$ возможно менять характер аномалий: смещать экстремумы, менять форму компенсирующих аномалий.

Область 3 (рис. 4, цв. вкл., стр. 122) – невыпуклый шестиугольник, состоящий из отрезков прямых:

$$y = 0, x \in [0; 30]; x = 30, y \in [-15; 0]; y = -15, x \in [15; 30];$$

$$x = 15, y \in [-30; -15]; y = -30, x \in [0; 15]; x = 0, y \in [-30; 0].$$

$$\varphi(x, y) = xy(x - 15)(y + 15)(x - 30)(y + 30).$$

По поводу третьего примера отметим, что в области D выделились три выпуклые подобласти – квадраты с таким распределением плотности в каждом из них, что они являются областями с нулевым внешним потенциалом. Это следует из формулы (2).

Область 4 (рис. 5, см. цв. вкл., стр. 122) – кольцо, ограниченное окружностями с радиусами $r = 1$ и $r = 2$ и центрами в начале координат, используется функция $\varphi(x, y) \equiv 1$. В четвертом примере представлена двусвязная область. Распределение плотности в ней – аномалия одного знака в середине и компенсирующие аномалии другого знака по краям. За счет выбора $\varphi(x, y)$ также возможно менять картину распределения плотности.

Выводы

1. Для области D , представляющей собой невыпуклый многоугольник, существуют разбиения на совокупность подобластей D_i (выпуклых многоугольников) со свойствами:

- распределение плотности внутри D_i описывается формулой (2) с определенной $\varphi_i(x, y)$;

- каждая D_i обладает нулевым внешним потенциалом.

2. Формула (2) распространяется на случай многосвязных областей.

3. Использование приведенной выше теоремы позволяет перераспределить плотность внутри области с произвольно заданными кусочно-аналитическими границами без изменения внешнего поля, что представляет интерес с точки зрения построения плотностных разрезов.

Список литературы

1. Цирульский А. В. Функции комплексного переменного в теории и методах потенциальных геофизических полей. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 132 с.

2. Новиков П. С. О единственности обратной задачи теории потенциала. – М.: ДАН СССР, 1938. – Т. 18, – № 3. – С. 165–168.

3. Бродский М. А. О единственности решения обратной задачи теории потенциала для цилиндрических тел конечного простираения // Физика Земли. – 1978. – № 10. – С. 117–127.

4. Прилепко А. И. О единственности определения формы и плотности тела в обратной задаче теории потенциала – М.: ДАН СССР. – 1970. – Т. 193, № 2. – С. 288–291.

5. Рапопорт И. М. О плоской обратной задаче теории потенциала – М.: ДАН СССР. – 1940. – Т. 28, № 4. – С. 305–307.

6. Оганесян С. М., Старостенко В. И. Тела нулевого внешнего гравитационного потенциала: о забытых работах и современном состоянии теории // Физика Земли. – 1985. – № 3. – С. 49–63.

7. Заморев А. А. Обратная двумерная задача теории потенциала – М.: ДАН СССР. – 1941. – Т. 31. – № 9. – С. 872–874.

8. Голиздра Г. Я. Особые точки аналитического продолжения гравитационного поля и их связь с формой возмущающих масс // Дополнительные главы курса гравиразведки и магниторазведки. – Новосибирск: Изд-во НГУ. – 1966. – С. 273–388.

9. Цирульский А. В., Бахтерев Д. В. К вопросу об эквивалентности для областей с кусочно-аналитической границей и переменной плотностью // Физика Земли. – 1991. – № 1. – С. 113–118.

Рецензент – доктор технических наук Д. Ф. Калинин.

УДК 550.34.013

Р. А. Шигапов, Д. В. Александров (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия)

ОЦЕНИВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ПО МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИМ ЗАПИСЯМ

R. A. Shigapov, D. V. Alexandrov (SPbSU, Saint-Petersburg, Russia)

ROCK PERMEABILITY ESTIMATION USING MICROSEISMIC RECORDS

В работе описывается новый метод оценивания проницаемости горных пород, основанный на обращении полного упругого микросейсмического поля. Проведён анализ чувствительности метода к некоррелированному шуму, добавленному к функции источника, а также к ошибкам в опорной скоростной модели.

Ключевые слова: проницаемость горных пород, микросейсмичность.

A new method of rock permeability estimation, based on full microseismic waveform inversion, is described. Sensitivity analysis to uncorrelated noise added to a source wavelet as well as to errors in a reference velocity model is done.

Keywords: rock permeability, microseismicity.

Введение

Микросейсмический мониторинг резервуара – современная технология сейсморазведки, применяемая обычно во время и после проведения работ по гидравлическому разрыву пласта. Относительно низкая себестоимость технологии обеспечивается отсутствием активных источников – упругие волны возбуждаются в процессе трещинообразования и регистрируются приёмниками, расположенными в скважинах [1] или на поверхности [2]. По микросейсмическим данным можно определить: координаты x_0 , y_0 , z_0 трещины гидроразрыва; момент времени t_0 начала трещинообразования; механизм очага, описываемый тензором момента M [3].

Актуальной задачей является оценивание проницаемости горной породы по данным микросейсмического мониторинга. На сегодняшний день существует два подхода к решению этой задачи [4]: r - t -метод, связывающий проницаемость с временем t работы инжектора флюида и расстоянием r между трещиной гидроразрыва и инжектором, и метод, основанный на обращении диффузионного уравнения. Достигнутое в последние годы качество определения механизма очага микросейсмического события [5] позволяет предложить другой подход к решению задачи оценивания проницаемости.

Метод

Установление зависимости полного упругого волнового поля от проницаемости производится в два этапа. Во-первых, в приближении Борна решается задача рассеяния волнового поля на точечной упругой неоднородности в упругой опорной среде. Рассеянное поле представляется свёрткой тензора момента (компоненты которого определяются возмущениями скоростей упругих волн и плотностей сред) и функции Грина в опорной среде [6]. Во-вторых, используются соотношения между скоростями упругих волн, плотностью и проницаемостью пороупругой среды теории Био [7].

Для решения обратной задачи задаётся функционал квадрата отклонения между экспериментальными и синтетическими полными упругими волновыми полями, просуммированный по приёмникам и времени. Минимизация функционала осуществляется прямым расчётом на априорно известной области определения искомой проницаемости и оптимизационной процедурой градиентного типа.

В работе используются вертикальный и горизонтальный профили приёмников в одно-родной изотропной упругой опорной среде (рис. 1). Показаны расстояния между источником и приёмниками (рис. 2). В качестве временной функции источника используется сигнал Риккера. Координаты источника и момент времени начала возмущений считаются известными. В работе предполагается, что истинное значение проницаемости составляет $5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$.

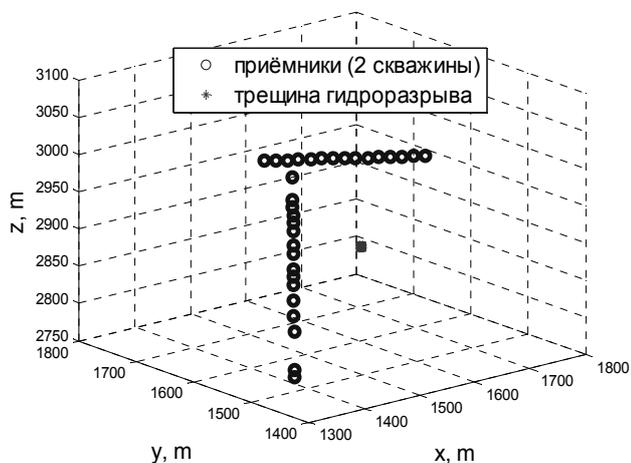


Рис. 1. Геометрия эксперимента

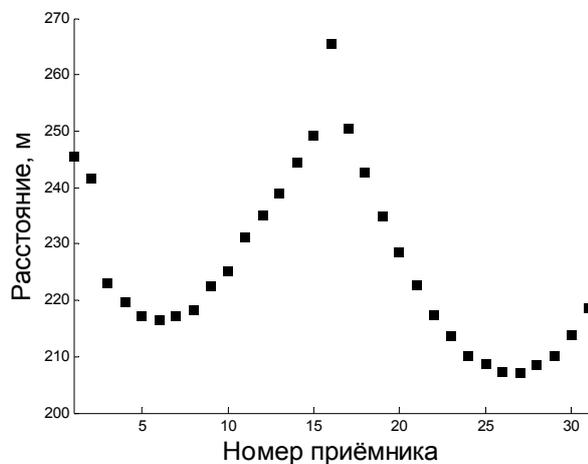


Рис. 2. Расстояния между источником и приёмниками

Результаты

В работе проведён анализ реальной возможности оценивания проницаемости горной породы прямым (рис. 3) и градиентным (рис. 4) методом обращения полного упругого волнового поля для правильной скоростной модели и без добавления шума.

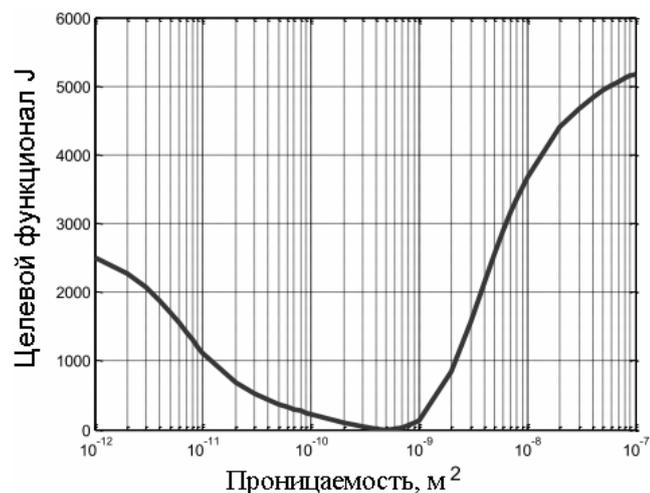


Рис. 3. Значения целевого функционала вычислены прямым расчётом для правильной скоростной модели и без добавления шума

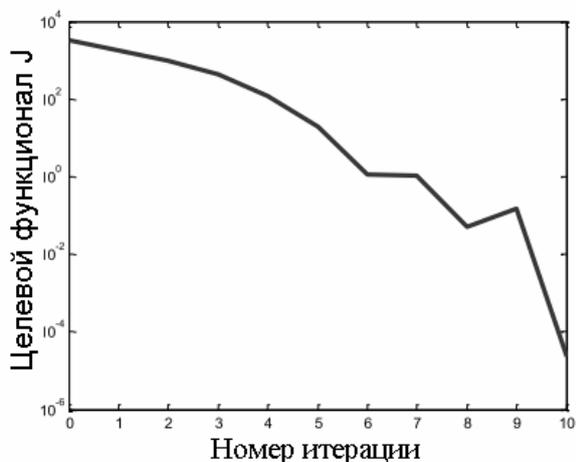


Рис. 4. Уменьшение значений целевого функционала в зависимости от номера итерации при градиентном обращении для правильной скоростной модели и без добавления шума

Кроме того, проведён анализ чувствительности методов к некоррелированному шуму, добавленному к временной функции источника (рис. 5, 6). Добавление шума приводит к незначительному сдвигу минимума целевого функционала (рис. 5). Тем не менее, представляется возможным оценивание проницаемости градиентным методом минимизации целевого функционала (рис. 6), если начальное значение проницаемости известно достаточно точно из априорных данных (рис. 5).

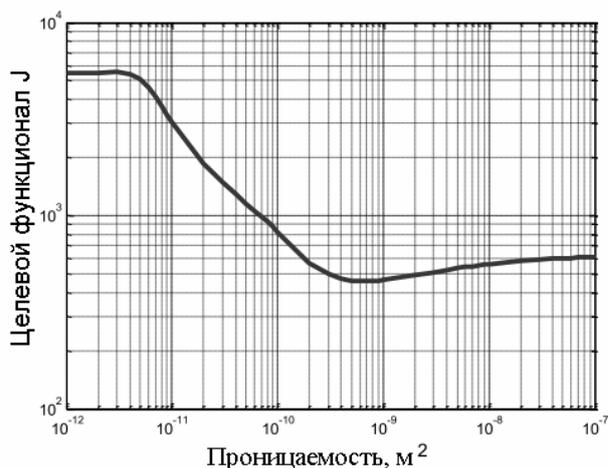


Рис. 5. Значения целевого функционала вычислены прямым расчётом для правильной скоростной модели и с 25% шумом, добавленным к функции источника

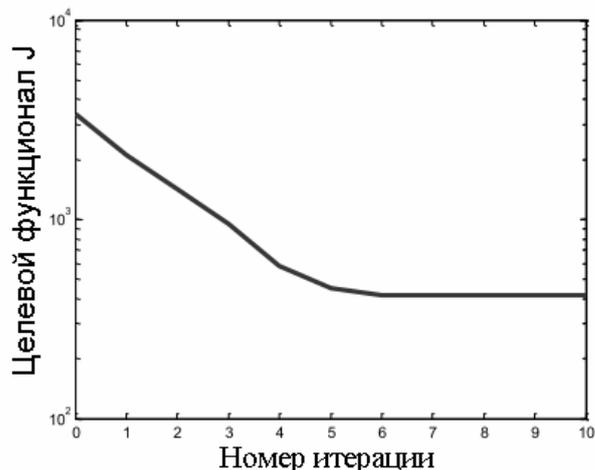


Рис. 6. Уменьшение значений целевого функционала в зависимости от номера итерации при градиентном обращении для правильной скоростной модели и с 25% шумом, добавленным к функции источника

Также проведён анализ чувствительности методов к ошибкам в опорной скоростной модели (рис. 7). Таким образом, оба метода минимизации целевого функционала приводят к хорошим результатам для больших значений проницаемости при использовании правильной опорной скоростной модели.

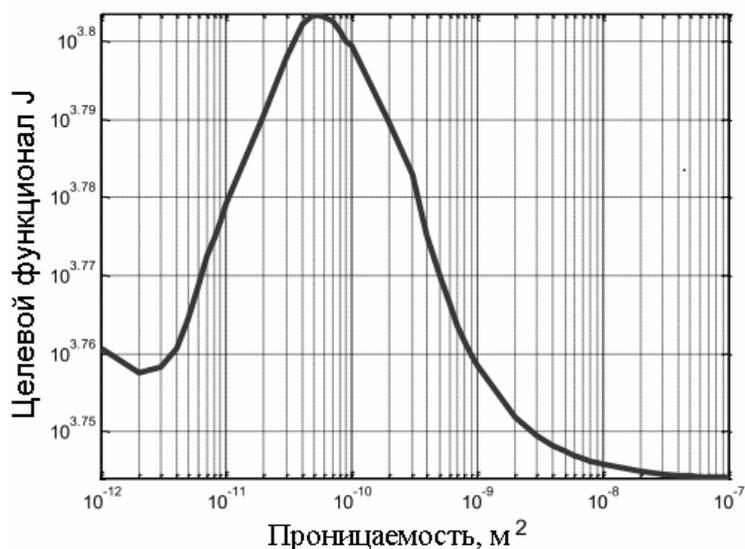


Рис. 7. Значения целевого функционала вычислены прямым расчётом с 5% ошибкой в опорной скоростной модели и без добавления шума

Заключение

На основе выполненного анализа показана реальная возможность оценивания проницаемости горной породы методом обращения полного упругого волнового поля, зарегистрированного при выполнении микросейсмического мониторинга резервуара.

Ввиду сильной чувствительности методов к использованию корректной скоростной модели в опорной среде в дальнейших исследованиях предполагается включить скорости продольных и поперечных волн в опорной среде в список искомых параметров.

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность научному руководителю Борису Марковичу Каштану за обсуждение работы. Особую благодарность выражаем Алек-

сандру Брониславовичу Дружинину за многочисленные конструктивные предложения и советы при выполнении работы.

Список литературы

1. *Maxwell S. C., Rutledge J., Jones R., Fehler M.* Petroleum reservoir characterization using downhole microseismic monitoring // *Geophysics*. – 2010. – N 5. – P. 75A129–75A137.
2. *Duncan P. M., Eisner L.* Reservoir characterization using surface microseismic monitoring // *Geophysics*. – 2010. – N 5. – P. 75A139–75A146.
3. *Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология. –М.: Мир, 1983. –520 с.
4. *Grechka V., Mazumdar P., Shapiro S. A.* Predicting permeability and gas production of hydraulically fractured tight sands from microseismic data // *Geophysics*. – 2010. – N 1. – P. B1–B10.
5. *Li J., Zhang H., Kuleli H. S., Toksoz M. N.* Focal mechanism determination using high-frequency waveform matching and its application to small magnitude induced earthquakes // *Geophysical Journal International*. –2011. –V. 184. –P. 1264–1274.
6. *Wu R., Aki K.* Scattering characteristics of elastic waves by an elastic heterogeneity // *Geophysics*. – 1985. – N 4. – P. 582–595.
7. *Ben-Menahem A., Gibson R. L. Jr.* Directional attenuation of SH waves in anisotropic poroelastic inhomogeneous media // *JASA*. – 1993. – N 6. – P. 3057–3065.

Рецензент – доктор физико-математических наук С. А. Вагин.

II. Региональная и поисково-разведочная геофизика (углеводороды и твердые полезные ископаемые) II. Regional and exploration geophysics (hydrocarbons and solid minerals)

УДК 550.831

Ю. С. Гольшиева (ФГУП «ВСЕГЕИ», Санкт-Петербург, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-ПЛОТНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ОНЕЖСКОЙ «ОПОРНОЙ ПЛОЩАДКИ»

Yu. S. Golysheva (VSEGEI, Saint-Petersburg, Russia)

APPLICATION OF 3D-GRAVITY MODELING FOR CREATION OF THE ONEGA “KEY AREA”

С целью изучения глубинного строения западной части Онежской структуры (Фенноскандинавский щит) предлагается создание Онежской «опорной площадки». Данные работы планируются для увязки скважинных (ВСП в Онежской параметрической скважине) и наземных (МОГТ на опорном профиле 1-ЕВ) наблюдений. Для этого проектируется два сейсмических профиля МОГТ.

С целью выбора местоположения проектируемых профилей и оптимальной методики работ предлагается предварительно уточнить особенности глубинного строения Онежской структуры по данным гравиметрии (3D-плотностная модель).

Ключевые слова: гравиметрия, 3D-плотностная модель, «опорная площадка».

Creation of the Onega “key area” is offered for the purpose of exploration of the western part of Onega deep structure (Fennoscandian shield). It is planned to provide correlation of borehole data (VSP survey in Onega stratigraphic well) and data of survey on the Earth’s surface (CDP on 1-EV geophysical transect). Two common depth point (CDP) profiles are projected.

For the purpose of profiles’ location choice and optimum technique of works it is offered to specify features of Onega deep structure. Detailing of structure is based on analysis of gravity data (3D-density model).

Keywords: gravimetry, 3D-density model, “key area”.

Введение

Создание объемных моделей глубинного строения является наиболее актуальной задачей современных глубинных исследований. Одно из решений этой задачи – создание «опорных площадок», являющихся связующим звеном между глубинными исследованиями на опорных профилях и в глубоких скважинах.

«Опорные площадки» являются дополнительным элементом Государственной сети опорных профилей, параметрических и сверхглубоких скважин. Геолого-геофизические работы, проводимые в пределах этих элементов, предусматривают решение задач по определению пространственного (объемного) положения выделенных на опорных профилях геолого-тектонических элементов. С целью изучения глубинного строения западной части Северо-Онежской структуры (Фенноскандинавский щит) на основе увязки существующих скважинных (ВСП в Онежской параметрической скважине) и наземных (МОГТ на профиле 1-ЕВ) наблюдений предлагается создание Онежской «опорной площадки». Опорный профиль 1-ЕВ проходит лишь по самому западному краю Северо-Онежской структуры. Онежская параметрическая скважина располагается в 30-ти км восточнее профиля, в центральной части (рис. 1, цв. вкл., стр.123). В данном случае планируется обеспечить корреляционную увязку с помощью метода МОВ-ОГТ (проектируется 2 профиля).

С целью выбора местоположения проектируемых профилей и оптимальной методики работ предлагается предварительно уточнить особенности глубинного строения Онежской структуры по данным гравиметрии (3D-плотностная модель).

Исходные материалы

Онежская геологическая структура расположена в юго-восточной части Фенноскандинавского щита на территории широкого развития раннепротерозойских образований, перекрытых четвертичными отложениями, связанными с формированием в условиях оледенения крупных северных заливов Онежского озера. Онежская структура представляет собой сформировавшийся в раннем протерозое на архейском гранитогнейсовом фундаменте крупнейший чашеобразный прогиб (впадину, мульду), сложенный в значительной мере осадочными и осадочно-вулканогенными образованиями раннего карелия [1].

Онежская структура имеет неправильно-овальную форму и вытянута в юго-восточном-северо-западном направлении. Структура имеет сложное строение: в ее состав входят ятулийско-людиковийская Северо-Онежская (~100×120 км), вепсийская Западно-Онежская (~50×100 км) синклинали и новейшая впадина Онежского озера (см. рис. 1). Наблюдается как бы «телескопическое вложение» друг в друга трех разновозрастных бассейнов с некоторым смещением их центров к югу. Совокупность данных позволяет рассматривать все эти структуры в качестве единой области длительного (но прерывистого) прогибания. Представительная информация об Онежской структуре как осадочном бассейне имеется для раннепротерозойского этапа. Вулканогенно-осадочные отложения PR_1 , относимые к протоплатформенному чехлу, с размывом и угловым несогласием залегают на архейском гранит-зеленокаменном фундаменте, который обрамляет мульду с севера, востока и запада, и согласно геофизическим данным и данным по скважине подстилает её на всем протяжении [2].

Для уточнения глубинного строения западной части Северо-Онежской структуры была использована 3D-плотностная модель, созданная [3] с использованием технологии «КОСКАД 3D» (рис. 2, цв. вкл., стр. 123). Согласно разработанной методике [4] первым этапом создания 3D-плотностной модели является расчет 3D-модели распределения масс аномальных источников поля силы тяжести. Он реализован в виде модифицированного алгоритма метода «вариаций Андреева». В результате расчета получается трехмерное («куб») относительное распределение гравитирующих масс, которое является базовой моделью для разработки второго этапа – создания модели локальной плотности. Реализация второго этапа невозможна без оценки граничных условий, снижающих неоднозначность решения обратной задачи по двум параметрам, – глубине залегания источников и их интенсивности.

Определение граничных условий для оценки глубины залегания источников сводится к оценке средней глубины границы M по сейсмическим данным. Выделяется граница раздела кора – мантия по модели (по серии разрезов, относительно равномерно распределенных по площади, а также по линии имеющихся сейсмических профилей) и по сейсмическим данным. Далее оценивается средняя глубина ее залегания и вводится коэффициент приведения (соотношение средних величин границы кора – мантия по сейсмическим и гравиметрическим данным). Граничные условия для параметра интенсивности источников определяются, исходя из предположения о соответствии диапазонов изменения скоростных и плотностных параметров земной коры. Результатом внесения граничных условий по структурному признаку в расчетную 3D-модель и перехода к «реальному» диапазону изменения плотностных параметров в земной коре и верхней мантии является 3D-модель распределения локальных плотностных неоднородностей. Переход от модели распределения локальной плотности к собственно плотностным параметрам реализуется, исходя из предположения о взаимосвязанном нарастании скорости – плотности с глубиной.

Создается «стандартная» градиентная плотностная модель консолидированной коры («куб»). Модель увязана с глобальной моделью Земли РРЕМ: средняя плотность консолидированной коры – $2,85 \pm 0,02 \text{ г/см}^3$, плотность верхней мантии – $3,35 \text{ г/см}^3$. В результате суммирования «куба» стандартного изменения плотности с глубиной с «кубом» распределения локальных плотностных неоднородностей получается 3D-структурно-плотностная модель земной коры и верхней мантии. Далее, полученная 3D-плотностная модель проверяется решением прямой задачи и оценивается степень ее соответствия исходному гравитационному полю. Корректировка проводится в профилем варианте методом подбора в программе GM-SYS.

Достоверность плотностной модели оценивается путем сравнения с глубинными сейсмическими моделями (ГСЗ и МОВ-ОГТ) по конкретным опорным профилям (в данном случае, по опорному профилю 1-ЕВ). Согласно выполненному анализу установлено, что общие структурные параметры сейсмических и плотностной моделей подобны, а скоростные параметры по данным ГСЗ коррелируются с плотностными. Таким образом, созданная плотностная модель удовлетворяет априорным петрофизическим данным (диапазон изменения плотности в консолидированной коре ~2,85; в верхней мантии – 3,25–3,45) и глобальной модели земной коры и может быть использована для предварительной оценки глубинного строения структуры.

Особенности глубинного строения Северо-Онежской структуры

Ниже рассматриваются разрезы 3D-плотностной модели по двум взаимно перпендикулярным профилям (1-1 и 2-2), пересекающим опорный профиль 1-ЕВ и проходящим через Онежскую параметрическую скважину (рис. 3, цв. вкл., стр. 124; расположение профилей на рис. 4, цв. вкл., стр. 125). Представленные профили соответствуют проектируемым сейсмическим профилям.

Онежская структура представляет собой сложно построенную синформу, охватывающую консолидированную кору на всю ее мощность (см. рис. 3, 4). В результате геолого-геофизической интерпретации 3D-плотностной модели были выделены блоки земной коры, различные по характеру распределения плотностных неоднородностей.

По морфологическим особенностям распределения плотностей выделяются внутренняя и внешняя части синформы. Внутренняя часть имеет более сложное строение и, в целом, она как бы вложена во внешнюю структуру. Западные, северо-западные и южные границы ее, кроме границ с южным продолжением Северо-Онежской синформы, достаточно крутые; северные, северо-восточные – пологие. По величине и характеру распределения плотностных неоднородностей между внешней и внутренней границей выделяется полоса достаточно крупных слабо дифференцированных аномалий пониженной плотности, представленных гранитизированными архейскими блоками пород верхней коры, которые, вероятно, предопределили заложение Онежской структуры [3]. По морфологии распределения и величине плотностных неоднородностей структуру в пределах внутренних границ Северо-Онежской синформы можно разделить на ряд блоков: западный, центральный и восточный. Возможной границей смены структур являются предполагаемые тектонические нарушения северо-западного направления, которым соответствуют тектонические зоны: Кондопожская (между западным и центральным блоками) и Уницкая (между центральным и восточным блоками), выделенные на глубинных сейсмических разрезах МОВЗ (ГП «Невскгеология») [5].

Восточный и центральный блоки различаются между собой по особенностям распределения плотностей в нижней коре: основание структуры в центральном блоке представлено сокращенной нижней корой по сравнению с восточным блоком. Западный и восточный блоки синформы имеют более высокие значения средней плотности по сравнению с центральным блоком [3].

Складчато-разрывные дислокации на данной территории простираются в направлении северо-запад – юго-восток.

Из вышесказанного следует, что Северо-Онежская структура имеет весьма сложное глубинное строение. Следовательно, методика работ при создании «опорной площадки» должна быть специфична.

Основные наблюдения и выводы

Опорный профиль 1-ЕВ проходит, в основном, по внешней части Северо-Онежской структуры, и лишь на небольшом отрезке пересекает западный блок внутренней части. Онежская параметрическая скважина располагается в центральном блоке.

Рассматриваются 2 профиля, по которым предполагается провести детальные работы МОВ-ОГТ. Профиль 1-1 проходит через три блока: западный, центральный и восточный.

В западном блоке он пересекается с профилем 1-ЕВ, а в центральном – пересекает скважину. На плотностном разрезе отчетливо выделяются верхние горизонты, представленные чередованием локальных аномалий распределения плотности разного знака, распространенных практически от дневной поверхности до глубин порядка 5 км. Вероятно, на этом уровне фиксируются существующие зоны складчато-разрывных дислокаций северо-западного направления. Границы зон повышенных и пониженных плотностей погружаются в восточном направлении. Они являются причиной миграции волн. В методике проектируемых работ следует учесть этот фактор: источник волн необходимо отнести в восточную часть. Профиль 2-2 проходит через центральный блок Онежской структуры и пересекается с профилем 1-ЕВ во внешней части Северо-Онежской синформы. В данном случае, возникает больше препятствий проведению работ, так как внешняя и внутренняя части структуры весьма различны, и, следовательно, данные наблюдений будет трудно увязать между собой.

По геоморфологическим характеристикам рассматриваемая территория относится к сельговому рельефу. Основной его чертой является частое чередование узких и длинных гряд с высотами до 100 м, сложенных преимущественно дочетвертичными породами, и узких понижений, заполненных озерами и заливами Онежского озера. Это создает дополнительные сложности при проведении сейсмических работ.

Таким образом, 3D-плотностное моделирование позволяет относительно корректно сформировать требования к системе наблюдений при проведении детальных работ методом МОВ-ОГТ, но при этом необходимо учитывать рельеф местности.

Заключение

В результате сейсмических работ по профилям 1-1 и 2-2 должна быть решена проблема определения физической природы и геологической идентификации сейсмических границ, локализуемых на глубинных сейсмических разрезах, а также их пространственная приуроченность, имеющая особую актуальность именно при проведении глубинных исследований, где отсутствует возможность создания необходимой сети скважин и горных выработок, позволяющих оценить достоверность, информативность и точность сейсмических построений.

Одновременно эти работы позволят проверить 3D-плотностную модель и либо подтвердить ее, либо обеспечить информацией для корректировки.

Список литературы

1. *Богданов Ю. Б.* Государственная геологическая карта РФ, лист Р-35-37. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ. – 2000. – 322 с.
2. *Леонов М. Г.* Тектоника консолидированной коры // Труды Геологического института. – М.: Наука. – 2008. – Вып. 575. – 475 с.
3. *Мильштейн Е. Д., Ронин А. Л. и др.* Разработка геолого-методических основ создания Государственной сети опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин // Отчет ФГУП «ВСЕГЕИ». – СПб.: – 2010.
4. *Мильштейн Е. Д., Петров Б. В.* Развитие методологических основ и технологии геологической интерпретации глубинных геофизических данных на опорных и региональных профилях с созданием специализированной геолого-картографической продукции и переоценкой минерагенического потенциала территорий // Известия ВСЕГЕИ. 2007. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ – 2008. – Т.7. (55). – С. 135–155.
5. *Исанина Э. В., Крупнова Н. А., Шаров Н. В.* Сейсмологические исследования МОВЗ на юге-Карелии // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. – 2004. – С. 60–76. (Отчет).

Рецензент – доктор геолого-минералогических наук А. Л. Пискарев.

УДК 550.832.4

Д. Р. Иркабаев, А. Я. Адиев (ООО НПЦ «Геостра», Уфа, Россия)

ПРОГНОЗ СТРУКТУРЫ И КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД В ОКОЛОСКВАЖИННОМ ПРОСТРАНСТВЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ВСП, НВСП

D. R. Irkabaev, A. J. Adiev (LLC SPC «Geostra», Ufa, Russia)

STRUCTURE PREDICTION AND RESERVOIR PROPERTIES OF ROCKS OF THE BOREHOLE SPACE BASED ON THE VSP DATA

Вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) играет ключевую роль в информации не только о глубинных физических свойствах разреза, но также и его геологии. Применение метода позволяет решать широкий круг задач: формирование и распространение волновых полей во внутренних точках среды, выделение волн разных типов, определение их природы, изучение структуры околоскважинного пространства, оценка эффективных толщин коллекторов, выявление зон повышенной пористости и трещиноватости карбонатных пород. Важной чертой метода ВСП является то, что он позволяет достичь достаточно высокой разрешенности и распространить данные геофизических исследований скважин (ГИС) на окрестности скважины.

Ключевые слова: вертикальное сейсмическое профилирование, коллектор, пористость, трещиноватость.

Today, the method of vertical seismic profiling (VSP) has played a key role in providing the oil companies of valuable information not only about the underlying physical properties of it, but also about the geology section. Application of the VSP allows to solve a wide range of problems: the formation and propagation of the wave fields at interior points of the medium, the selection of different types of waves, determining their nature, studying the structure of the borehole environment, evaluation of the effective thickness of reservoir, identification of zones of increased porosity and fractured carbonate rocks.

Keywords: vertical seismic profiling, collector, porosity, fracturing.

Введение

На протяжении многих лет основной задачей интерпретации данных ВСП, НВСП являлось определение пространственного расположения стратиграфических, литологических и тектонических границ, дающих в совокупности представление о геологическом строении для определенных толщ отложений. В настоящее время скважинная сейморазведка активно занимает у наземной такие приемы обработки и интерпретации, как получение разрезов акустических продольных и сдвиговых импедансов, разрезов мгновенных амплитуд и других фазочастотных преобразований. Это позволяет, помимо решения чисто структурных задач, уделить большее внимание анализу динамических характеристик волнового поля с выходом на прогноз коллекторских свойств продуктивных пластов. Так, например, понижение значений расчетных импедансов в интервале терригенных коллекторов свидетельствует об улучшении коллекторских свойств. Увеличение значений импедансов по профилю означает увеличение скорости прохождения сейсмических волн и, соответственно, увеличение плотности в изучаемом интервале. По рассчитанным разрезам импедансов контролируется корреляция отражающих горизонтов.

При изучении месторождений нефти в девонском комплексе Оренбургской области, характеризующихся большим количеством сейсмического материала ВСП, НВСП, отмечено, что улучшенные коллекторские свойства пластов (трещиноватость, пористость, проницаемость) сопровождаются в волновом поле в большинстве случаев такими характеристиками отражения, как снижение динамической выразительности и изменение формы записи. Данная особенность отрицательно сказывается на корреляции отражений и, соответственно, на интерпретации скважинных сейсмических данных.

Рассмотрим *несколько примеров*, полученных в ходе реализации разработанных методических приемов исследований методом ВСП, НВСП на месторождениях Оренбургской области.

Первый пример. На рис. 1 (цв. вкл., стр. 126) представлены: сейсмический разрез по профилю НВСП, разрез акустического продольного импеданса, а также разрезы мгновенных фаз и амплитуд. По совокупности данных прокоррелированы отражения от исследуемых объектов и выделен малоамплитудный тектонический разлом. На основе разреза мгновенных фаз скорректирована корреляция отражающих горизонтов; разрез мгновенных амплитуд позволил снизить влияние интерференции волн от разлома (толстая темно-серая линия) и более точно определить его местоположение; разрез акустического продольного импеданса дал возможность судить о коллекторских свойствах исследуемых пластов.

Второй пример. На рис. 2 (цв. вкл., стр. 127) также представлены: сейсмический разрез по профилю НВСП, разрез акустического продольного импеданса, а также разрезы мгновенных фаз и амплитуд. Целью данных исследований являлось изучение коллекторских свойств продуктивных пластов ДIII, ДIV ардатовского и воробьевского горизонтов. Фазочастотные преобразования исходного временного сейсмического разреза позволили выделить зону с улучшенными свойствами на расстоянии около 500 м от скважины как по коллекторским, так и по гипсометрическим параметрам. Рекомендованы две точки для эксплуатационного бурения (№1 и №2).

Третий пример. На рис. 3 (цв. вкл., стр. 128) представлены сводные результаты преобразования временных сейсмических разрезов НВСП в разрезы мгновенных амплитуд, на основе которых построена объемная модель биогермной постройки в отложениях фаменского яруса (пунктиром показан контур биогермного тела).

Характер записи в интервале органогенных построек изменчив по направлениям профилей, что связано, вероятно, со сложным геологическим строением карбонатной части разреза. Отложения данной толщи по данным керна представлены известняками, трещиноватыми известняками, плотными доломитами, а также не всегда выдержанными по площади прослоями глинистого известняка.

Заключение

Не все возможности ВСП в настоящее время реализованы в равной степени. Однако фазочастотные и другие преобразования исходного сейсмического разреза, такие как разрезы мгновенных фаз и амплитуд, продольных и сдвиговых импедансов позволили получить более полные и более достоверные сведения об околоскважинном пространстве, выделить как структурные, так и коллекторские особенности исследуемых объектов.

Рецензент – доктор технических наук С. А. Кириллов.

К. В. Коваленко, И. С. Дешененков (РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, Москва, Россия)
РАСЧЕТ СЖИМАЕМОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И ГАЗА ПРИ РАЗЛИЧНОМ НАСЫЩЕНИИ ДЛЯ УПРУГОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

K. V. Kovalenko, I. S. Deshenenkov (Gubkin RSU of Oil and Gas, Moscow, Russia)
DETERMINATION OF OIL AND GAS RESERVOIRS COMPRESSIBILITY WITH DIFFERENT SATURATION FOR FIELDS ELASTIC MODELING

Предложена адаптивная методика моделирования показаний акустического и гамма-гамма плотностного методов ГИС в условиях ограниченного комплекса. Для расчета синтетических сейсмограмм в условиях дефицита априорной информации используются адаптивные алгоритмы интерпретации данных ГИС. Модифицирована модель сжимаемости предельно насыщенной породы-коллектора (Ф. Гассман, 1951), отличающаяся от традиционной учетом объема и свойств остаточной воды. Сравнение синтетических сейсмограмм, рассчитанных при использовании традиционной и модифицированной моделей, показало преимущества модифицированного подхода.

Ключевые слова: петрофизика, сейсмическая инверсия, упругие свойства, эффективное поровое пространство, замещение флюидов.

The adaptive technique of acoustic and formation density logs modeling is proposed in conditions of limited well log data. The adaptive log analysis algorithms are used for synthetic seismograms simulation in condition of prior log information deficit. The Gassman fluid substitution model is modified for correct account of bounded water properties and volume. The comparison of synthetic seismograms with modified and conventional model indicates advantages of proposed approach.

Keywords: petrophysics, seismic inversion, elastic properties, effective pore space, fluid substitution.

Введение

Плотностной гамма-гамма (ГГМ) и акустический (АМ, на продольных и поперечных волнах) методы ГИС применяются на разных этапах сейсмической инверсии: при калибровке сейсмического импульса, стратиграфической увязке разведочных и промысловых данных, построении низкочастотной сейсмогеологической модели. Данные ГГМ и АМ в комплексе ГИС нередко отсутствуют: ГГМ до сих пор проводят, в среднем, в одной скважине из десяти, АМ не проводился в старом фонде скважин. Показания обоих методов обычно регистрируют не во всем стволе, а лишь в потенциально продуктивном интервале. В результате возникает необходимость петрофизического моделирования (Rock Physics) показаний АМ и ГГМ, алгоритмы и методики которого основаны на сугубо эмпирических подходах и имеют ограниченную область применимости. Ниже обосновывается методика и алгоритм моделирования отсутствующих данных ГГМ и АМ по диаграммам других методов стандартного комплекса ГИС.

При поисках и разработке месторождений нефти и газа актуален учет изменений свойств и насыщения коллекторов в межскважинном пространстве. Для решения этой задачи традиционно используются сейсмические методы. Прогноз насыщения коллекторов основан на изучении влияния характера насыщения на упругие свойства.

Флюидное моделирование сводится к нахождению связи между упругими модулями породы и ее компонент в случае, когда порода имеет произвольный, но фиксированный состав скелета (проще говоря, один и тот же скелет), но разные флюиды. Такая связь наиболее просто описывается моделью Гассмана (1951) [1]. В работе приведена модифицированная модель Гассмана, учитывающая фактическое изменение объема и свойств остаточной воды для повышения точности моделирования упругих свойств породы при различном флюидонасыщении.

Изучение упругих свойств коллекторов по результатам адаптивной интерпретации данных ГИС

Нами предложена и реализована методика моделирования диаграмм АМ и ГГМ-П, основанная на принципе петрофизической инвариантности с привлечением характеристических параметров петрофизической модели коллектора и показаний методов ГИС [2]. Помимо сопоставления петрофизических параметров методов ГИС с петрофизическим инвариантом Ψ , характеристические параметры можно определить также и по сопоставлению акустической жесткости с петрофизическим инвариантом. Отсюда вытекает принципиальная возможность расчета и акустической жесткости по показаниям других методов ГИС. Для определения характеристических значений акустического импеданса привлекаются данные из соседних скважин, где имеются диаграммы АМ и ГГМ-П, или результаты петрофизического районирования, включая данные лабораторных анализов керна.

Выражение для расчета акустической жесткости Z имеет вид:

$$Z(K_n; Z_n) = 10^6 \frac{\Psi[\sigma(M; \sigma_M) - \sigma(\mu; \sigma_n)] + \sigma(\mu; \sigma_n)}{\Psi[\Delta T(M; \Delta T_M) - \Delta T(\mu; \Delta T_n)] + \Delta T(\mu; \Delta T_n)}$$

Общие относительные погрешности результирующего акустического импеданса обратно пропорциональны величине эффективной пористости, то есть точность расчета тем больше, чем выше ценность коллектора (погрешность результатов в высокопористых пластах минимальна). Погрешность методики в большей степени обусловлена неопределенностью вычисления петрофизического инварианта, тогда как погрешности характеристических значений упругих свойств влияют существенно меньше.

Изучение пород-неколлекторов методами ГИС для определения упругих свойств разреза

В работе рассмотрены принципы моделирования терригенных пород, фильтрация флюидов в которых затруднена.

Для выделения в разрезе различных литологических типов комплекс ГИС должен включать методы, несущие информацию об основных свойствах разреза. Классификация пород по литологическому составу проводится на основе общих моделей петрофизических взаимосвязей. Описание осуществляется для разных градаций отложений, начиная от матрицы, то есть наилучшего коллектора, обладающего максимальной общей пористостью (матричной пористостью) и не содержащего цемента, и заканчивая наиболее уплотненными разностями, поровое пространство которых заполнено цементом. Таковую модель можно представить в виде семейства графиков зависимостей между различными характеристиками продуктивных отложений и общей пористостью. Эти зависимости отражают изменение фильтрационно-емкостных, литологических и петрофизических характеристик при изменении общей пористости – от пористости матрицы до критической пористости (пористости, равной полной водоудерживающей способности коллектора). Значение критической пористости различно для разных типов глинистого цемента: минимально для каолинистого цемента и максимально для гидрослюдистого. Такая петрофизическая модель применима в пределах указанных изменений свойств гранулярного коллектора. Для показаний методов ГИС в пластах-коллекторах модель имеет следующий вид:

$$R(K_n; R_n) = \frac{K_n - \mu}{M - \mu_0} (R(M; R_M) - R(\mu; R_n)) + R(\mu; R_n),$$

где K_n – текущая величина общей пористости; M – максимальная емкость матрицы; μ – полная водоудерживающая способность коллектора; μ_0 – водоудерживающая способность матрицы; $R(\mu; R_n)$ – петрофизический параметр «вырожденного» коллектора при отсутствии эффективной пористости ($K_n = \mu$, максимальная глинистость); $R(M; R_M)$ – петрофизический параметр коллектора при $K_n = M$.

Дальнейшее снижение открытой пористости приводит к переходу коллектора в разряд «неколлектора», когда зерна матрицы замещаются глинистым материалом либо происходит окремнение глинистых минералов.

Для разделения пород по литологическому составу и аналитического моделирования упругих свойств за пределами коллекторов использована стандартная объемная модель.

При помощи описанных моделей проведен анализ зависимостей показаний методов ГИС от общей пористости при переходе породы из коллектора в «неколлектор». Рассмотрены два предельных случая коллектора: песчаники с высокой и низкой полной водоудерживающей способностью (7% и 22%), а также отражение моделей на реальных данных – отложениях Западной Сибири, представленных средне- и мелкозернистыми песчаниками сложного минерального состава с каолинистым цементом, кварцитом и каолинистыми глинами (рис. 1, цв. вкл., стр. 129).

Очевидно несовпадение как по абсолютным значениям показаний, так и по диапазонам разброса точек, соответствующих реальному продуктивному пласту. Тем не менее, принципиально отражены закономерности изменений показаний методов ГИС в соответствии с моделями. При максимальной пористости (отсутствии глинизации) зависимости сходятся, а для различных значений μ расходятся тем заметнее, чем больше неоднородность коллектора. В явном виде выделяются области, соответствующие каолиниту и гидрослюде. Для настройки петрофизической модели на конкретный тип отложений необходима адаптивная настройка на свойства скелета и цемента породы, которая отражает фактическую неоднородность пород по литологическому составу и петрофизическим характеристикам.

Прослеживаются определенные тенденции литологических преобразований различных отложений. Для коллектора с максимальной водоудерживающей способностью наиболее вероятен переход в гидрослюду, тогда как для коллекторов с минимальной водоудерживающей способностью характерен переход в кварцит или каолинит. На кросс-плотах выделяются области, соответствующие различным типам глин (разбухающих гидрослюдистых и неразбухающих каолинитовых).

Практической интерес представляет анализ сопоставлений, подобных представленным на рис. 1, в опорных скважинах, где комплекс ГИС наиболее полон (имеется запись АМ, ГГМ-П и других методов стандартного комплекса). В таких скважинах проводится литологическое расчленение разреза, определяются показания методов ГИС, соответствующие определенному литотипу. Для каждого литотипа рассчитываются тренды и определяются соответствующие характеристические интервальные времена и объемные плотности по диаграммам ГИС. Затем по аналогии с опорными скважинами проводится литологическое расчленение разрезов остальных скважин изучаемого участка. Задаются соответствующие литологической разности характеристические показания АМ и ГГМ-П (пример для АМ показан на рис. 1, а), после чего проводится расчет диаграмм АМ и ГГМ-П за пределами коллектора при известной величине общей пористости, начиная от $K_p < \mu$.

Общая пористость определяется по результатам адаптивной интерпретации стандартного комплекса ГИС по алгоритму:

$$K_p = M - \left(K_{п.эф}^{\max} - K_{п.эф} \right) \frac{M - \mu}{M - \mu_0},$$

где $K_{п.эф}$ – текущее значение эффективной пористости; $K_{п.эф}^{\max}$ – максимальная эффективная пористость. То есть значение общей пористости может быть вычислено по комплексу методов СП, ГМ, НГМ при отсутствии АМ и ГГМ-П. Преимуществом этого подхода является настройка на конкретный тип отложений с учетом литологического состава и петрофизических характеристик породы, которые определяются адаптивно. Нет необходимости априорного задания свойств компонент породы и их объемных содержаний.

Такой подход к моделированию упругих свойств обеспечивает большую точность и надежность, чем эмпирические подходы, применяемые в настоящий момент, однако он нуждается в дальнейшей проработке в силу слабой изученности.

Пример расчета акустической жесткости юрских коллекторов (Западная Сибирь), представленных средне- и мелкозернистыми песчаниками сложного минерального состава отображен на рис. 2. Для проверки точности алгоритмов акустическая жесткость рассчитыва-

лась двумя способами. Первый способ – прямой (контрольный), по данным ГГМ-П и АМ (объемной плотности и интервальному времени). Второй способ – адаптивный, по данным методов СП, ГМ и ННМ-2. Высокая степень сходимости синтетических сейсмограмм с фактической трассой вблизи скважины свидетельствует о точности предложенной методики. Акустическая жесткость непосредственно связана с фильтрационно-емкостными свойствами коллекторов и используется в процессе инверсии для получения импульсов, восстановления низкочастотной компоненты, а также для проверки и анализа результатов сейсмической инверсии.

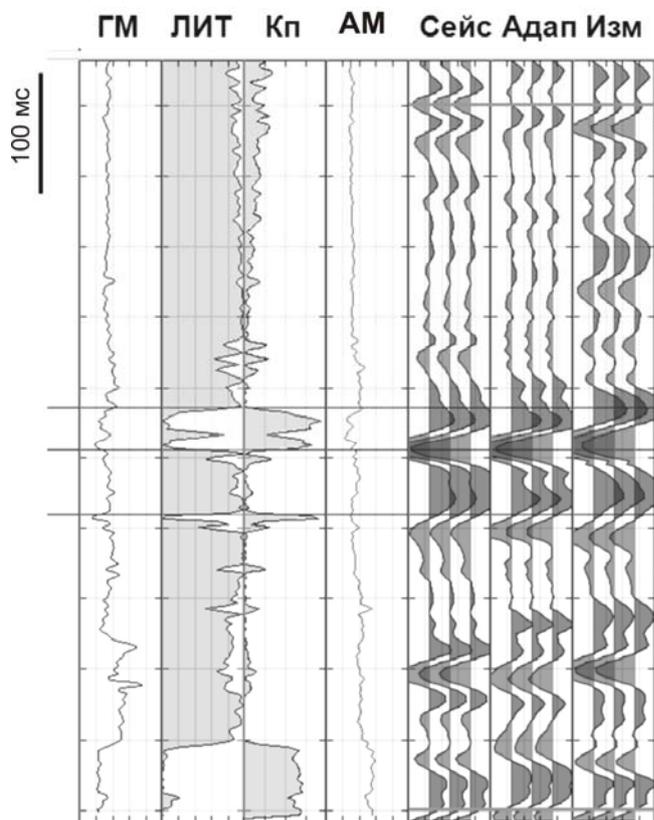


Рис. 2. Пример практической реализации адаптивной методики расчета акустической жесткости

Сопоставление синтетических сейсмограмм, рассчитанных с использованием адаптивной методики (Адап), измеренных данных АМ и ГГМ-П (Изм) и фактических сейсмограмм вблизи скважины (Сейс)

Петрофизическое моделирование с использованием АМ на продольных и поперечных волнах и ГГМ-П играет важную роль при оценке информативности результатов сейсмической инверсии: при прогнозе насыщения коллекторов изучается влияние характера насыщения на упругие свойства.

Моделирование замещения флюидов

Моделирование замещения флюидов лежит в основе целого ряда способов интерпретации данных сейсморазведки, нацеленных на оценку характера насыщения: зависимости между скоростями сейсмических волн, с одной стороны, и типом флюида – с другой; используются при оценке латеральных вариаций насыщенности по данным о сейсмических скоростях, акустическом импедансе и других параметрах.

Основными недостатками модели Гассмана [3], традиционно применяемой с целью флюидного моделирования, являются сложность учета изменения минерального состава скелета и доли остаточной воды относительно свободного флюида. На практике происходит выбор среднего наиболее типичного для данного разреза значения остаточной водонасыщенности и использование его при моделировании без учета вертикальной изменчивости. Помимо

прочего, свойства остаточной воды отличаются от свойств свободной. Иногда отличие в упругих параметрах (скоростях продольных волн или плотности) может достигать 15–20 % [4]. Перечисленное приводит к существенным ошибкам при изучении влияния флюида на упругие свойства пород-коллекторов и, как следствие, к неточностям при динамической интерпретации данных сейсморазведки. В модели пористой среды, используемой в уравнениях Гассмана, предполагается, что материал состоит из твердой и жидкой (газообразной) фаз. Твердая фаза формирует жесткий каркас (скелет), характеризующийся своими макроскопическими модулями упругости. Жидкая (газообразная) фаза полностью заполняет емкостное пространство.

Модифицированная модель разработана для предельно насыщенной породы, состоящей из твердой фазы (раздельная оценка скелета и цемента), остаточной воды, а также флюида, заполняющего эффективное поровое пространство. Модель учитывает фактическое изменение свойств и объема остаточной воды по разрезу для повышения информативности результатов инверсионных процедур. Модель сжимаемости предельно насыщенной породы имеет вид:

$$\beta = \frac{\beta_{\text{сух}} \left((K_{\text{п.эф}} (M - \mu) (M - \mu_0)^{-1} + \mu) (\beta_{\text{ТВ}} - \beta_{\text{о.в}}) + K_{\text{п.эф}} (\beta_{\text{о.в}} - \beta_{\text{фл}}) \right) - \beta_{\text{ТВ}} (\beta_{\text{сух}} - \beta_{\text{ТВ}})}{\left(K_{\text{п.эф}} (M - \mu) (M - \mu_0)^{-1} + \mu \right) (\beta_{\text{ТВ}} - \beta_{\text{о.в}}) + K_{\text{п.эф}} (\beta_{\text{о.в}} - \beta_{\text{фл}}) + \beta_{\text{ТВ}} - \beta_{\text{сух}}}$$

где $\beta_{\text{сух}}$ – сжимаемость абсолютно сухой породы; $\beta_{\text{ТВ}}$ – сжимаемость твердой фракции; $\beta_{\text{о.в}}$ – сжимаемость остаточной воды; $\beta_{\text{фл}}$ – сжимаемость флюида в эффективной пористости.

Проведенный анализ влияния неопределенностей входных параметров двух моделей на неопределенность расчета сжимаемости свидетельствует о сложной зависимости неопределенности оценки объемной сжимаемости от неопределенностей входных параметров моделей. При модифицированном подходе наибольший вклад в неопределенность оценки сжимаемости предельно насыщенной породы-коллектора вносит задание по объемным сжимаемостям твердой фракции, остаточной воды и свободного флюида (СКО). С улучшением коллекторских свойств влияние первых двух параметров уменьшается, тогда как последнего – увеличивается. При традиционном подходе максимальные неопределенности в оценку объемной сжимаемости вносят СКО общей пористости, объемные сжимаемости твердой фракции и свободного флюида. Тенденции их изменения при улучшении фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) те же, что при модифицированном подходе. В общем случае, неопределенность расчета объемной сжимаемости предельно насыщенной породы-коллектора по модифицированной методике в 1,5–1,7 раза меньше, чем по традиционной.

С целью практической реализации модифицированного уравнения Гассмана проведено замещение флюидов на примере средне- и мелкозернистых полимиктовых (кварц-полевошпатовых) песчаников (сложный минеральный состав матрицы и цемента) Западной Сибири по обоим алгоритмам. Результаты расчетов указывают на лучшее разделение пород по упругим характеристикам при различном флюидонасыщении эффективного порового пространства для модифицированной методики (рис. 3, цв. вкл., стр. 130).

Упругие свойства газонасыщенной породы практически идентичны в обоих случаях, в то время как плотность и скорости в нефте- и водонасыщенных коллекторах больше для модифицированного алгоритма, что позволило наблюдать отличия пород по упругим характеристикам на гистограммах и сопоставлениях упругих свойств с общей пористостью.

Модель, заложенная в модифицированное уравнение Гассмана, более приближена к реальному коллектору, чем традиционная, в которой остаточная водонасыщенность не учитывается или же принимается постоянной на уровне 10–20%.

Сравнение результатов синхронной инверсии синтетических сейсмограмм по скважинным данным с фактическими AVO-аномалиями позволило выявить нефтенасыщенные зоны по модифицированной модели (рис. 4, б, цв. вкл., стр. 130), тогда как моделирование по традиционной модели свидетельствует о водонасыщении коллекторов (рис. 4, а, цв. вкл., стр. 130), что не соответствует результатам интерпретации данных ГИС и опробования пластов.

Разработанная модель позволяет получить результат, соответствующий фактическому насыщению, в отличие от традиционной модели при наличии контрастности в свойствах остаточной и свободной воды. Точность разработанной модели увеличивается путем примене-

ния адаптивной технологии интерпретации данных ГИС для нахождения динамических ФЭС коллекторов.

Разработанная методика определения характера насыщения коллекторов по данным сейсморазведки используется для выделения перспективно-продуктивных интервалов, построения карт и трехмерных моделей насыщения с целью бурения на нефть и газ.

Результаты и выводы

Разработана адаптивная методика и алгоритмы расчета акустической жесткости по данным ГИС при дефиците априорной геолого-геофизической информации, в частности, при отсутствии в комплексе данных АМ и ГГМ. Если при традиционном подходе требуется знание хотя бы одного из упругих свойств (объемной плотности породы или скорости пробега упругих волн), то в адаптивной методике Z вычисляется даже при отсутствии данных АМ и ГГМ. Необходимо задание характеристических V_p и σ по данным ГИС соседних скважин (или петрофизического районирования).

В результате анализа модели объемной сжимаемости Гассмана показаны ее ограничения и недостатки. В качестве основных недостатков отмечается недоучет фактической остаточной водонасыщенности и отличия свойств свободной воды от остаточной. С целью преодоления перечисленных недостатков разработана модифицированная модель объемной сжимаемости, характеризующаяся точным учетом свойств и фактического объема остаточной воды. Предложен способ расчета объемной сжимаемости абсолютно сухой породы, основанный на использовании данных замеров акустическим и гамма-гамма плотностным методом.

Проведенное имитационное моделирование методом Монте-Карло свидетельствует, что неопределенность расчета по модифицированной методике меньше, чем по традиционной в 1,5–1,7 раза при фиксированных значениях входных параметров в обоих случаях.

Моделирование объемной сжимаемости по традиционной и модифицированной методике для различных водоудерживающих способностей цемента показало, что в случае водонасыщенного коллектора наблюдаются существенные отличия модельных кривых объемной сжимаемости. Причем отличие тем больше, чем больше водоудерживающая способность цемента. Для газонасыщенного коллектора отличия в моделях практически не проявляются вследствие сильной контрастности сжимаемости газа и жидкого флюида (порядки).

Практическая реализация модифицированной модели проведена в сравнении с традиционной моделью для средне- и мелкозернистых песчаников Западной Сибири. Результаты апробации алгоритма на скважинном материале показали его эффективность для целей разделения пород по типу насыщения согласно данным сейсморазведки.

Разработанная методика определения характера насыщения коллекторов по данным сейсморазведки может быть использована для выделения перспективно-продуктивных интервалов, построения карт и трехмерных моделей насыщения с целью бурения на нефть и газ.

Авторы выражают глубокую признательность за помощь своему научному руководителю профессору РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина Кожевникову Д. А.

Список литературы

1. *Закиров С. Н., Закиров Э. С., Индрунский И. М.* Новые представления в 3D геологическом и гидродинамическом моделировании // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 1. – С. 12–18.
2. *Кожевников Д. А., Коваленко К. В., Дешененков И. С.* Информационный потенциал адаптивной интерпретации данных комплекса ГИС // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 9. – С. 82–86.
3. *Gassmann F.* Über die elastizität poröser medien // Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft. – 1951. – N 96. – P. 1–23.
4. *Королев В. А.* Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы // Науки о земле. – 1996. – № 6. – С. 79–85.

Рецензент – кандидат технических наук Г. Я. Рабинович.

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ КАПИЛЛЯРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ КОЛЛЕКТОРОВ В КОНЦЕПЦИИ ЭФФЕКТИВНОГО ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА*K. V. Kovalenko, I. S. Deshenenkov, A. N. Petrov* (Gubkin RSU of Oil and Gas, Moscow, Russia)
CAPILLARY PRESSURE MODEL APPLICATION FOR GEOLOGICAL MODELLING IN EFFECTIVE PORE SPACE CONCEPT

Разработана модель зависимости капиллярного давления от текущей водонасыщенности гранулярного коллектора. Модель позволяет вычислять насыщение углеводородами в переходной зоне выше «зеркала воды» по величине эффективной пористости. Последняя определяется с помощью адаптивной технологии интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС).

Ключевые слова: петрофизика, переходная зона, адаптивная интерпретация данных ГИС.

New relationship between capillary pressure and current water saturation was developed for clastic reservoirs. This model allows predicting hydrocarbon saturation in transition zone above free water level according to effective porosity values. Effective porosity could be determined directly with adaptive well logging data interpretation.

Keywords: petrophysics, transition zone, adaptive well logging data analysis.

Введение

В настоящее время существует большое количество моделей капиллярного давления для изучения распределения углеводородов в переходной зоне (в зависимости от высоты над «зеркалом» чистой воды).

Величина капиллярного давления соответствует определенной высоте залегания коллектора над «зеркалом» чистой воды, определяющей роль капиллярных сил при установлении равновесия и движении углеводородов в переходной зоне в процессе формирования залежей и их разработке. Исходными для расчета насыщенности коллекторов являются данные капиллярнометрии, приведенные к пластовым условиям. Мощность переходной зоны оценивается модельными соотношениями между капиллярными давлениями и текущей водонасыщенностью.

Связь капиллярного давления с текущей водонасыщенностью

Изучению процессов многофазной фильтрации, осложненных капиллярностью пористых сред, посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов [1, 2, 3, 4, 5]. В настоящее время существует большое количество моделей, аппроксимирующих данные капиллярнометрических исследований и превращающих их в распределение водонасыщенности в переходной зоне (зависимость водонасыщенности от высоты над «зеркалом» чистой воды (ЗЧВ), фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС)). Наиболее распространенные из них: J -функция, модели Тульбовича, Хасслера-Бруннера, Тиксье и Брукса-Кори. Широкое применение в практике также находят эмпирические подходы моделирования переходной зоны [6, 7].

Подход Леверетта предполагает получение некоторой универсальной зависимости между водонасыщенностью и J -функцией, то есть многопараметрической зависимости капиллярного давления от ФЕС коллектора (K_v , K_n , K_{np}). Математически она описывается выражением:

$$J = \frac{P_c \sqrt{K_{np} / K_n}}{\sigma \cos \theta}, \quad (1)$$

где J – J -функция Леверетта; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент проницаемости; $K_{\text{п}}$ – коэффициент пористости. Для отдельных коллекторов наблюдается тесная корреляция между J -функцией и $K_{\text{в}}$ вида:

$$J = c_1 K_{\text{в}}^{-c_2}, \quad (2)$$

хотя она и не является универсальной. Выражение для капиллярного давления имеет вид:

$$P_c = \sigma \cos \theta c_1 K_{\text{в}}^{-c_2} \left(\frac{K_{\text{пр}}}{K_{\text{п}}} \right)^{-0.5}. \quad (3)$$

Функция Леверетта неудовлетворительно описывает изменение насыщенности неоднородных коллекторов. Кроме того, обобщенная связь J -функции с $K_{\text{в}}$ содержит эмпирические константы (c_1 и c_2). Поэтому J -функция непригодна для детального описания каждой отдельно взятой кривой капиллярного давления. Предложены более гибкие модели, такие как модель Брукса-Кори:

$$K_{\text{в}} = K_{\text{в.о}} + (1 - K_{\text{в.о}}) \left(\frac{P_d}{P_c} \right)^{1/\lambda}, \quad (4)$$

где $K_{\text{в}}$ – текущее значение коэффициента водонасыщенности; $K_{\text{в.о}}$ – коэффициент остаточной водонасыщенности; P_d – давление вытеснения; λ – параметр кривизны.

При настройке модели каждая капиллярная кривая требует задания фиксированных величин $K_{\text{в.о}}$, P_d и λ . Модель Брукса-Кори неточно описывает форму кривых капиллярного давления при низких и высоких значениях текущей водонасыщенности, что отражается на качестве учета изменений капиллярного давления в различных диапазонах изменения проницаемости.

Модель Тиксье [8] для описания кривых капиллярного давления имеет вид:

$$K_{\text{в}} = \left[\sqrt{1 + \left(\sqrt{K_{\text{пр}}/b} \right) P_c} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Данная модель плохо описывает капиллярные кривые в случае высоких давлений. Кроме того, для использования этой модели нужно знать проницаемость.

По аналогии с уравнением изотермы адсорбции нами предложена **феноменологическая** модель зависимости текущей нефтегазонасыщенности $K_{\text{н.эф}}$ от капиллярного давления P_c . Модель управляется одним параметром κ , который тесно связан с ФЕС породы:

$$P_c = \frac{P_{\text{max}} (1 - \kappa)}{K_{\text{н.эф}}^{-1} - \kappa}, \quad (6)$$

где P_{max} – капиллярное давление, при котором нефтенасыщенность становится меньше предельной. В модель (6) входит доля нефти в объеме эффективной пористости $K_{\text{н.эф}}$

$$K_{\text{н.эф}} = 1 - (K_{\text{в}} - K_{\text{в.о}}) / (1 - K_{\text{в.о}}). \quad (7)$$

Предложенная модель обладает принципиальными преимуществами. Ее проверка для представительной коллекции юрских коллекторов (более 200 образцов песчаников сложного минерального состава из различных месторождений Западной Сибири) показала, что модель обеспечивает более точное описание данных лабораторных исследований керна, чем модели Брукса-Кори и Тиксье, для образцов как с высокими, так и средними проницаемостями. При низких проницаемостях качество описания несколько хуже (рис. 1, цв. вкл., стр. 131).

Параметр κ обнаруживает более тесную корреляцию с остаточной водонасыщенностью, проницаемостью и эффективной пористостью, чем параметры λ и b в моделях Брукса-Кори и Тиксье соответственно. Связь параметра κ с эффективной пористостью удовлетворительно описывается соотношением вида:

$$\kappa = \left[1 + \alpha K_{\text{п.эф}}^{-\beta} \right]^{-1}, \quad (8)$$

где α и β – константы, устанавливаемые путем анализа капиллярных кривых для исследуемых коллекторов (рис. 2, цв. вкл., стр. 131).

Определение «асимптотического» значения коэффициента остаточной водонасыщенности

Производная функции $P(K_{н.эф})$ имеет вид:

$$\frac{dP_c}{dK_{н.эф}} = \frac{P_{\max}(1-\kappa)}{(1-K_{н.эф}\kappa)^2}. \quad (9)$$

Уравнение (9) позволяет задавать условия выхода капиллярных кривых на вертикальную асимптоту. При этом градиенты пластовых давлений и текущую нефтенасыщенность целесообразно определять по результатам последовательных гидродинамических исследований и данным ГИС. В качестве критерия для оценки величины «асимптотической» (неснижаемой) остаточной водонасыщенности допустим, что она достигается при изменении давления на 0,1 МПа, когда величина эффективной нефтенасыщенности меняется на 1%:

$$\frac{dP_c}{dK_{н.эф}} = \frac{0,1}{0,01}. \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) находим эффективную нефтенасыщенность, при которой достигается асимптотическое условие (10):

$$K_{н.эф.lim} = \frac{1 - \sqrt{0,1P_{\max}(1-\kappa)}}{\kappa}. \quad (11)$$

Водонасыщенность, которая в данном случае является неснижаемой остаточной водонасыщенностью, и соответствует асимптотической эффективной нефтенасыщенности, определяется по формуле:

$$K_{в.о.lim} = K_{в.о}(P_{\max}) + [1 - K_{в.о}(P_{\max})](1 - K_{н.эф.lim}). \quad (12)$$

Давление, соответствующее асимптотической эффективной нефтенасыщенности P_{lim} , определим по модели:

$$P_{lim} = \frac{P_{\max}(1-\kappa)}{\kappa} \left[\left(1 - \sqrt{0,1P_{\max}(1-\kappa)} \right)^{-1} - 1 \right], \quad (13)$$

$K_{в.о}(P_{\max})$ – это $K_{в.о}$, которое получают в результате опыта, т.е. водонасыщенность, соответствующая максимальному достижимому в процессе эксперимента давлению (последняя точка на капиллярной кривой). Асимптотическое значение $K_{в.о}$ может оказаться как меньше, так и больше того, что получают из опытов. Например, в чистых хорошо проницаемых образцах условие на асимптотике достигается уже при более низких давлениях [3].

На рис. 3 а, б (цв. вкл., стр. 132) показаны измеренные капиллярные кривые и расчетные модельные зависимости $K_v(P_c)$. Выбраны контрастные по ФЕС образцы юрских мелкозернистых песчаников Западной Сибири:

рис. 3, а 1 – $K_{пр}=135$ мД, $K_{п}=18,6\%$; 2 – $K_{пр}=88$ мД, $K_{п}=19,4\%$; 3 – $K_{пр}=25$ мД, $K_{п}=16,6\%$; 4 – $K_{пр}=2,1$ мД, $K_{п}=13,3\%$;

рис. 3, б 1 – $K_{пр}=972$ мД, $K_{п}=21,7\%$; 2 – $K_{пр}=137,7$ мД, $K_{п}=19\%$; 3 – $K_{пр}=48,3$ мД, $K_{п}=19,4\%$; 4 – $K_{пр}=1,8$ мД, $K_{п}=12,9\%$.

Модельные кривые рассчитаны по формуле (6), предельное капиллярное давление P_{lim} – по формуле (13), асимптотический коэффициент остаточной водонасыщенности, соответствующий P_{lim} , – по формуле (12).

На рис. 4 (цв. вкл., стр. 132) показано изменение величины эффективной пористости при переходе от лабораторного $K_{в.о}$ к расчетному асимптотическому. При высоких и средних ФЕС коллектора изменение $K_{п.эф}$ составляет менее 1 % абс. Наибольшее различие между «лабораторным» и расчетным асимптотическим $K_{в.о}$ отмечается в области низких $K_{п.эф}$, то есть максимально для коллекторов с худшими ФЕС.

Моделирование насыщения в переходной зоне

Зависимость капиллярного давления от текущей водонасыщенности позволяет рассчитать распределение насыщения в переходной толще выше ЗЧВ. Зависимость капиллярного

давления от текущей высоты H относительно ЗЧВ имеет вид:

$$P_c = (H_b - H)g(\sigma_b - \sigma_n), \quad (14)$$

где H_b – вертикальная глубина ЗЧВ; g – ускорение свободного падения; σ_b и σ_n – плотности воды и нефти в пластовых условиях. Это выражение широко применяется на практике, хотя оно справедливо для описания равновесия флюидов в прямой вертикальной трубке.

Выражение для максимального капиллярного давления, т.е. капиллярного давления, при котором нефтенасыщенность становится меньше предельной, аналогично выражению (14) с заменой H на H_n (вертикальная глубина зоны предельного нефтенасыщения):

$$P_{lim} = (H_b - H_n)g(\sigma_b - \sigma_n), \quad (15)$$

На рис. 5 (цв. вкл., стр. 132) показана связь высоты зоны предельного насыщения над ЗЧВ, рассчитанного по формулам (13) и (15), с эффективной пористостью. Этот график имеет важное практическое значение: если по площади залежи известны абсолютные отметки уровня свободной воды, то по величине эффективной пористости возможен прогноз продуктивности и состава притока.

Обозначим $h = (H_b - H_n) / (H_b - H)$, тогда, объединяя выражения (6), (14) и (15), получим формулу для расчета текущей эффективной нефтенасыщенности $K_{н.эф}$ на глубине H :

$$K_{н.эф} = [h(1 - \kappa) + \kappa]^{-1}. \quad (16)$$

В выражение (16) входят вертикальные глубины, что придает особую актуальность точности дирекционных измерений и учету их погрешностей. Для расчета насыщения по разработанной методике для комплекса методов ГИС необходимо определять эффективную пористость. По величине эффективной пористости вычисляют параметр кривизны κ , входящий в формулу (16). Результаты практической реализации алгоритма (16) для средне- и мелкозернистых юрских песчаников Западной Сибири сравниваются с результатами расчета насыщения по адаптивной интерпретации данных электрометрии [9] на рис. 6 (цв. вкл., стр. 133). Хорошая сходимость результатов расчета по двум методикам подтверждает достоверность определения нефтенасыщенности.

Результаты и выводы

Предложена *феноменологическая* модель зависимости текущей нефтегазонасыщенности от капиллярного давления. Ее принципиальным преимуществом по сравнению с наиболее известными моделями является более точное описание данных капиллярометрии в широком диапазоне изменений ФЕС. Управляющий параметр модели тесно коррелирует с остаточной водонасыщенностью и эффективной пористостью. На основании разработанной модели выведено уравнение (9), позволяющее задавать условия выхода капиллярных кривых на вертикальную асимптоту.

Приведенный способ расчета асимптотического значения $K_{в,0}$ может быть использован в качестве критерия точности (достоверности) определения $K_{в,0}$ при лабораторных исследованиях. Сопоставимость экспериментального значения $K_{в,0}$ с расчетным асимптотическим может служить признаком удовлетворительного приближения к истинной величине $K_{в,0}$.

Предложен алгоритм расчета распределения нефтенасыщенности в переходной зоне.

Сравнение результатов расчета насыщения по предложенному алгоритму и адаптивной интерпретации данных электрометрии показало хорошую сходимость результатов, что подтверждает достоверность определения нефтенасыщенности.

Авторы благодарят научного руководителя Д. А. Кожевникова за оказанную помощь в написании статьи.

Список литературы

1. Амикс Дж., Басс Д., Уайтинг Р. Физика нефтяного пласта / Перевод с англ. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 572 с.
2. Гудок Н. С., Богданович Н. Н., Мартынов В. Г. Определение физических свойств нефтеводосодержащих пород – М: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 592 с.

3. *Дахнов В. Н.* Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин – М.: Недра, 1984. – 30 с.
4. *Дьяконова Т. Ф., Билибин С. И., Исакова Т. Г. и др.* Проблемы обоснования водонефтяного контакта по материалам геофизических исследований скважин при построении детальных геологических моделей // Каротажник. – 2004 – № 116–117. – С. 83–97.
5. *Кожевников Д. А., Коваленко К. В.* Петрофизическое моделирование и адаптивная интерпретация метода сопротивлений // Каротажник. – 2007. – № 166. – С. 103–115.
6. *Тульбович Б. И.* Методы изучения пород-коллекторов нефти и газа – М.: Недра, 1979. – 199 с.
7. *Фокин А. Н., Сапожников А. Е.* Комплексный петрофизический анализ при моделировании нефтенасыщенности в коллекторах нефти и газа // Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений. – 2004. – № 12. – С. 50–52.
8. *Brooks R. H., Corey A. T.* Hydraulic properties of Porous Media // Colorado State University Hydrology. – 1964. – N 3. – 24 p.
9. *Jennings J. B.* Capillary Pressure Techniques: Application to Exploration and Development Geology // AAPG Bulletin. – 1987. – N 71. – P. 1196–1209.

Рецензент – доктор физико-математических наук А. С. Долгаль.

УДК 550.389.1

Е. М. Красинский (ФГУП «ВСЕГЕИ», Санкт-Петербург, Россия)

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АЭРОМАГНИТНЫХ СЪЕМОК ПРИ СОЗДАНИИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ (ГФО) МАСШТАБА 1:1 000 000 ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ КАРТЫ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ (ГГК-1000/3) НА ПРИМЕРЕ ЛИСТА Q-41

E. M. Krasinskij (VSEGEI, Saint-Petersburg, Russia)

EXPERIENCE OF USING HIGH RESOLUTION AEROMAGNETIC DATA IN CREATION ACTUALIZED GEOPHYSICAL BASIS OF SHEET Q-41 IN SCALE 1: 1 000 000 AS A PART OF GOVERNMENT GEOLOGICAL MAP THIRD EDITION (GGM-1000/3)

В работе приведено описание процесса создания актуализированной геофизической основы (ГФО) масштаба 1:1 000 000 листа Q-41 с использованием данных крупномасштабных аэромагнитных съёмок различного возраста, качества и точности. Сравнительный анализ исходных материалов между собой позволил сделать выводы об их качестве и пригодности для использования в настоящее время. Основным результатом работы является обоснование возможности обращения к геофизическому наследию прошлых лет и получения качественных данных из ретроспективных материалов путем применения современных методов обработки информации.

Ключевые слова: аномальное магнитное поле, геофизическое наследие, обработка аэромагнитных данных.

A report describes process of creation actualized geophysical basis of sheet Q-41 in scale 1:1 000 000 using high resolution aeromagnetic data. During creation actualized geophysical basis authors took different basic data: different years of acquisition, quality and resolution. Comparing basic data between each other allowed to make conclusions about quality of data and useability it in present time. The main result of this project was to proof possibility of using huge geophysical heritage of USSR in present time and getting quality data from retrospective materials using modern processing methods.

Keywords: anomaly magnetic field, geophysical heritage, processing of aeromagnetic data.

Введение

По данным секции НРС Роснедра при ВСЕГЕИ из 141-го комплекта подготовленных ГФО (1989–2010) только в 3-х из них использованы результаты средне - и крупномасштабных аэромагнитных съёмок нового поколения. Это обстоятельство объясняется тем, что удельный вес современных цифровых данных пока ещё мал для региональных обобщений, лишь очагами он включает в себя площади, для которых уже намечены перспективы крупномасштабной геологоразведки. Большой объём результатов крупномасштабных и среднемасштабных съёмок, хранящихся в ФГУ НПП «Росгеолфонд» и в геологических территориальных фондах, представляет собой аналоговые карты хорошего качества, но в большинстве своём засекреченные и требующие дорогостоящей оцифровки данных с применением современных ГИС технологий, что на данном этапе развития региональных геофизических исследований пока не всем организациям доступно.

В соответствии с требованиями от 2001 года, утверждёнными МПР, для создания ГФО-1000/3 допускается использование материалов масштаба 1:200 000 и крупнее. Для осуществления поставленной задачи были использованы аналоговые карты графиков масштаба 1: 200 000, созданные в 1960-х гг. и хранящиеся в базе данных Гравимаг. Этот выбор соответствовал требованиям 2001 г. и был приемлем по трудозатратам, так как большая часть графиков была уже отвекторизована. Работу поставили на поток и к 2009 г. было сделано таким образом порядка 130 листов. Только 2% созданных листов имели в своих исходных данных материалы крупномасштабных съёмок, которыми к тому времени было покрыто порядка 60% территории страны.

Исходные материалы

В 2010-е гг. были начаты работы по актуализации листов ГФО-1000/3 в рамках ГК АМ-02-34/22, предусматривающие актуализацию геофизических основ масштаба 1:1 000 000 в форме ГИС с объяснительными записками по 7-ми листам (рис. 1, цв. вкл., стр. 134): Q-41 (Воркута), Q-42 (Салехард), Q-44 (Тазовский), Q-45 (Томск), Q-51 (Алдан), M-44 (Рубцовск), N-54 (Николаевск-на-Амуре).

В первом квартале 2011 г. был поставлен на актуализацию лист Q-41 (Воркута). Для создания актуализированной версии ГФО был использован весь спектр имеющегося материала по аномальному магнитному и гравитационному полю. Актуализация карты аномального магнитного поля проводилась на основе трех типов имеющихся на данный момент материалов крупномасштабных съёмок, хранящихся в Российских геологических фондах (РГФ) и территориальных фондах (рис. 2, цв. вкл., стр. 134). В их составе:

- современные цифровые материалы съёмок масштаба 1:50 000 и крупнее;
- аналоговые материалы результатов аэромагнитных съёмок масштабов 1:100 000, 1:50 000, 1:25 000 в виде карт изолиний и карт графиков.

В процессе работы с этими материалами был выявлен ряд особенностей и недостатков имеющихся данных.

Современные цифровые материалы съёмок масштабов 1:50 000, 1:25 000 [1]. К их преимуществам следует отнести:

- высокую детальность;
- высокую точность привязки;
- высокую точность современной измерительной аппаратуры.

Недостатками съёмок являются:

- не всегда корректная увязка профильных материалов;
- труднодоступность исходных данных в РГФ или территориальных фондах в связи с коммерческой тайной материалов;
- незначительность объёмов работ относительно территории РФ и площадей листов ГФО-1000/3.

Аналоговые материалы результатов аэромагнитных съёмок масштабов 1:100 000, 1:50 000, 1:25 000 в виде карт изолиний и карт графиков [2, 3, 4] имеют следующие преимущества:

- большое количество материала;
- хорошая детальность;
- хорошая точность привязки.

Недостатки:

- засекреченность большей части материалов («Секретно», «Коммерческая тайна»);
- отсутствие информации о проекции и привязки материалов (в связи с секретностью);
- необходимость оцифровки аналоговых карт изолиний и графиков, сопряжённая с большими трудозатратами и частичной потерей точности;
- наличие плохо увязанных материалов, представленных исключительно картами изолиний.

Обработка и увязка исходных материалов, использованных для актуализации

Современные цифровые материалы аэромагнитной съёмки масштаба 1:50 000 были получены из Росгеолфонда в виде цифровых баз данных в формате XYZ (*Oasys montaj*). По исходным материалам были построены grids с ячейкой гридирования 50×50 м и проанализированы на корректность внутренней увязки массива.

Проверка выявила некорректную увязку материалов вдоль линий профилей, в результате чего было принято решение переобработать исходные материалы, используя метод *Drepping*. Основные этапы увязки съёмки по технологии *Дрейпинг*:

1. Создание исходной ЦМ (ЦМ исх.) путем гридирования предварительно увязанных профильных данных (ΔТ)а.

2. Фильтрация ЦМ исх. по методу Баттеруорта (*Butterworth Filter*) [GEOSOFT, 2006a]. Параметры фильтрации при этом определяются индивидуально для каждой съемки. Их подбор осуществляется экспериментальным путем, за счет изменения длины волны фильтра (L). Как правило, эта длина варьирует в пределах нескольких десятков километров. При оптимальном значении L исчезают «затяжки» аномалий вдоль маршрутов, но не производится чрезмерного сглаживания исходной модели АМП. Применительно к рассматриваемой съемке оптимальная длина фильтра оказалась равной 20 км. Используемая в дальнейшем отфильтрованная ЦМ (ЦМ L-20) является моделью первого приближения, отражает основные особенности магнитных аномалий района исследований с длиной волны более 20 км, но не содержит сведений о тонкой структуре АМП.

3. Извлечение из модели первого приближения (ЦМ L-20) значений АМП вдоль всех маршрутов съемки и их вычитание из исходных профильных данных $(\Delta T)_a$. Перед началом этой процедуры исходные профильные данные рекомендуется проинтерполировать с равным шагом вдоль всех маршрутов, что обеспечивает более корректную работу алгоритма фильтрации.

4. Фильтрация полученных разностных значений $((\Delta T)_a - (\Delta T)_a)$ (ЦМ L-20) по методу Баттеруорта с длиной волны фильтра вдвое большей, чем при предшествующей фильтрации ЦМ исх. В данном случае эта длина составила 40 км. Такое увеличение длины фильтра гарантирует сохранение аномалий от незначительных по размерам геологических объектов на последующем этапе применения дрейпинга.

5. Вычитание результатов фильтрации $((\Delta T)_a - (\Delta T)_a)$ (ЦМ L-40) из исходных данных $(\Delta T)_a$ и расчет новой цифровой модели (ЦМ фин_L-20) с размером ячейки 1×1 км по методу *минимума кривизны поверхности* [5].

Аналоговые материалы съёмки масштабов 1:100 000, 1:50 000, 1:25 000 в виде карты графиков и карт изолиний были отсканированы с разрешением 300 dpi и оцифрованы в программной среде *ArcMap* (9.2, 10.0). Первичная обработка растровых изображений, привязка и оцифровка выполнялась по методике ВСЕГЕИ, разработанной и успешно опробованной [6, 7].

Основные этапы создания цифровых матриц из аналоговых исходных карт, графиков и изолиний:

- сканирование аналоговых карт с разрешением 300 dpi;
- привязка растрового изображения в необходимой прямоугольной системе координат в программной среде *ArcMap 9*;
- векторизация изолиний и графиков в программной среде *ArcMap* посредством стандартных наборов инструментов с получением на выходе привязанных файлов-покрытий (шейп-файлов);
- конвертирование файлов-покрытий в точечные значения;
- создание баз данных в программной среде *Oasis Montaj* с импортированием из программной среды *ArcMap* точечных значений;
- создание матриц по точечным значениям оцифровок;
- редакция полученных матриц относительно исходных карт изолиний или карт графиков посредством введения дополнительных значений в программной среде *ArcMap* в местах некорректного гридирования *Oasis Montaj*;
- получение итоговой матрицы, соответствующей аналоговым исходным данным.

В процессе обработки оцифрованных карт изолиний и графиков было выявлено наличие некорректно увязанных материалов. При построении по оцифрованным значениям аномального магнитного поля гридов в полученных матрицах отчётливо проявлялись невязки вдоль линий маршрутов, которые не были устранены на стадии составления карт. Ошибки такого типа были выявлены в отчётных картах изолиний (рис. 1, а) масштаба 1:100 000 [8], а также в отчётных картах графиков (рис. 1, б) масштаба 1:50 000 и 1:25 000 [9]. Оцифрованные карты изолиний масштаба 1:100 000 были исключены из дальнейшей работы по актуализации ввиду невозможности корректной переобработки исходного оцифрованного мате-

риала; оцифрованные карты изолиний масштаба 1:25 000 и 1:50 000 были переобработаны и частично использованы при актуализации в границах листа Р41-VII. Работу со всем массивом карт графиков из отчёта [9] выполнить в рамках данного проекта было невозможно в связи с колоссальными объёмами оцифровки и последующей обработки.

Актуализация

По завершению оцифровки, обработки и разбраковки все аналоговые материалы были объединены в единый массив, который участвовал в актуализации. Участки съёмок были увязаны между собой в единый грид по принципу перекрытия, реализованного в программном модуле *GridKnitting* программной среды *Oasis Montaj*. В качестве базового грида была взята матрица самого большого и представительного участка съёмки [4] с шагом гридирования 50×50 м. Остальные две съёмки [2, 3] с шагом гридирования 50×50 м увязывались с базовой матрицей последовательно, с поправкой на тренд в местах перекрытий встраиваемого грида и с ячейкой итогового гридирования 50×50 м (рис. 3, цв. вкл., стр. 135).

На завершающем этапе разбракованные материалы встраивались в базовую матрицу АМП, созданную ВИРГ-Рудгеофизикой в 1999 г. в рамках создания комплекта карт геофизической основы Геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 лист Q-41, 42 (Салехард). Вследствие того, что все материалы были приведены к разным уровням нормального поля, было необходимо привести их все к единому базовому уровню. В качестве базового уровня нормального поля был взят уровень нормального магнитного поля 1965 г., модель ВСЕГЕИ. Приведение материалов к базовому уровню нормального магнитного поля осуществлялось на основе цифровой карты аномального магнитного поля масштаба 1:2 500 000, созданной авторами работы [7]. При актуализации исходные гриды и базовая матрица вычитались из матрицы АМП масштаба 1:2 500 000. Полученная среднеквадратичная разница как константа вводилась в исходные базы данных.

После приведения всех материалов к единому базовому уровню нормального магнитного поля был начат финальный этап по актуализации карты аномального магнитного поля листа Q-41. Актуализация производилась последовательно, посредством удаления участка актуализации из базовой матрицы и встраивания новой матрицы с использованием функции *Oasis Montaj Grid Knitting*. Увязка нового и старого материала осуществлялась только в области перекрытия методом *Akima*, посредством вычитания разностной составляющей трендом первого порядка (static) из встраиваемого грида. Таким образом, последовательно были встроены сначала грид, созданный по аналоговым картам изолиний масштаба 1:50 000, затем грид, созданный по современным цифровым данным аэромагнитной съёмки масштаба 1:50 000. (рис. 4, цв. вкл., стр. 135)

Основные результаты

Выполненная работа позволила получить актуализированную матрицу аномального магнитного поля по листу Q-41 с шагом гридирования 250×250 м (рис. 5, а, цв. вкл., стр. 136), которая отличается значительно большей детальностью по сравнению с матрицей, созданной ВИРГ-Рудгеофизикой в 1999 г. (рис. 5, б, цв. вкл., стр. 136). Наличие в комплекте к матрице всех исходных материалов, использованных для актуализации (карты изолиний, точечные данные, базы данных, увязанные гриды в виде первого, второго и третьего информационных уровней) соответствуют «Требованиям к опережающей геофизической основе Государственной Геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000, 2010 г.» и дают пользователю широчайшие возможности последующего использования актуализированного комплекта ГФО-1000 для уточнения геологического и тектонического строения региона, а также для интерпретационных построений и прогнозирования перспективных участков на последующее детальное изучение.

В результате проведённой работы по оцифровке, обработке и увязке имеющихся материалов была получена актуализированная на 60% карта АМП на лист Q-41, которая наглядно

отображает бóльшую детальность, лучшую сопоставимость с геологическими материалами, а также возможность использования этих материалов для дальнейшей работы по уточнению геологического строения региона исследования (см. рис. 5).

Результаты работы наглядно демонстрируют возможности использования геофизического наследия СССР и получения новых знаний с использованием современных технологий обработки и переобработки информации, а также необходимость дальнейшей актуализации уже созданных листов ГФО-1000/3 с целью повышения информативности геолого-геофизической базы Российской Федерации.

В заключение хотелось бы выразить благодарность за оказанную помощь научному руководителю Литвиновой Тамаре Петровне (ФГУП «ВСЕГЕИ»).

Список литературы

1. Малкин Б. В., Воргачёва В. Ю. Составление геофизической основы в зоне проектируемой железной дороги Ивдель – Лабытнанги в границах минерагенических районов // Отчет ФГУНПП «Аэрогеофизика». – 2009 (фонды ФГУНПП «Росгеолфонд»).

2. Чепик А. Ф., Козицкий В. А. Отчет о результатах аэромагнитной съемки масштаба 1:50 000 с КАМ-28, проведенной на Морею-Лайской площади (Ненецкий АО) в 1978 году // Отчёт. – 1978 (фонды ФГУНПП «Росгеолфонд»).

3. Перфилова А. П., Трошенкова Т. Н. Отчет Каротаихинской аэромагнитной партии о результатах работ, выполненных в ю-в и с-з частях Каротаихинской мегасинклинали в 1974 г. // Отчёт. – 1974 (фонды ФГУНПП «Росгеолфонд»).

4. Русанов В. А., Безукладнов В. А. Отчет о результатах аэромагнитной съемки с КАМ-28, выполненной в районе Колью-Роговской мегасинклинали и гряды Чернышева в 1975–76 гг. // Отчёт. – 1976 (фонды ФГУНПП «Росгеолфонд»).

5. Smith W. H. F., Wessel P. Gridding with continuous curvature splines in tension // Geophysics. – 1990. – V. 55.

6. Шимараев В. Н., Гуревич Н. И., Гуцин Н. В. Геофизические исследования в Карском, Баренцевом, Охотском морях, Арктическом бассейне, Атлантическом и Индийском океанах и проливе Дрейка // Аэромагнитная съемка на акватории Карского, Баренцева и Охотского морей. – 1969. – Том 1 (фонды «ВНИИОкеангеология»).

7. Литвинова Т. П., Красинский Е. М., Глебовский В. Ю., Васьковский Б. В. Разработать принципы и технологию сводного мелкомасштабного цифрового картографирования геофизических полей и создать актуализированные цифровые картографические модели аномального магнитного и гравитационного полей России масштаба 1:2 500 000 // Отчет ФГУП «ВСЕГЕИ». – 2010 (фонды ФГУНПП «Росгеолфонд», ФГУП «ВСЕГЕИ»).

8. Куликов Г. Н., Блюм Э. А. Отчёт о результатах аэромагнитной съёмки масштаба 1:50 000, проведённой на Лемвинской площади в северной части Предуральского передового прогиба (КОМИ АССР) в 1984 году // Отчёт. – 1984 (фонды ФГУНПП «Росгеолфонд»).

9. Подбелова Е. А., Харламов Ю. С. Отчет о работах Уральской и Салехардской аэро-геофизической партии за 1964 г. // Отчёт. – 1965 (фонды ФГУНПП «Росгеолфонд»).

Рецензент – доктор технических наук Д. Ф. Калинин.

УДК 550.382.4:550.8.05

М. С. Петрищев (СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД В ОКРЕСТНОСТИ ВУЛКАНА НЕВАДО-ДЕЛЬ-РУИС (КОЛУМБИЯ) ПО ГЕОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ

M. S. Petrishchev (SPbF IZMIRAN, Saint-Petersburg, Russia)

FORECAST OF GEOTHERMAL SOURCES IN VICINITY OF VOLCANO NEVADO-DEL-RUIZ (COLOMBIA) BY GEOMAGNETIC DATA

В работе выполнено прогнозирование источников геотермальных вод в окрестности действующего вулкана Невадо-дель-Руис по геомагнитным данным. Проанализированы региональные распределения магнитных аномалий на спутниковых и приземных высотах. Детальные исследования выполнены в районе, ограниченном с 77° по 74° з.д., от 4° до 6° с.ш. Выделение перспективных участков выполнено на основе анализа геомагнитных разрезов и распределений слабомагнитных ареалов на 2,5–3 км и 10 км. Результаты исследований могут быть использованы для постановки детальных геологоразведочных работ.

Ключевые слова: геотермальные источники, магнитные аномалии.

Forecasting of geothermal sources in vicinity of Nevado del Ruiz volcano are carried out according to geomagnetic data. Regional distributions of magnetic anomalies at satellite and near-surface altitudes are analyzed. Detailed researches are carried out for the area limited between 74° to 77°W in longitude, and 4° – 6°N in latitude. Detection of perspective sites is completed on the basis of the analysis of geomagnetic sections and distributions of feebly magnetic areas on 2,5–3 km and 10 km. The results can be used for statement of detailed exploration.

Keywords: geothermal sources, magnetic anomalies.

Введение

Геотермальная энергия отличается низкой стоимостью выработки тепло- и электроэнергии, практической неиссякаемостью. Изучению современных гидротермальных систем, разведке и эксплуатации геотермальных месторождений уделяют большое внимание во многих странах мира: Италии, Новой Зеландии, Исландии, Индонезии, Филиппинах, США, Никарагуа, Японии и др. В последние годы проблему извлечения тепловой энергии из трещиноватых горных пород, залегающих на больших глубинах, решают в Германии, Швейцарии, Франции и других странах. В целом, данное направление фундаментальной науки и техники – изучение и использование геотермальных ресурсов, включая аккумулированное тепло неглубокозалегающих магматических очагов вулканов, – приобретает все большую социальную и экономическую перспективу во всем мире.

Ранее изучались только близповерхностные гидротермальные системы и геотермальные месторождения с невысокими Р-Т параметрами. Месторождения имеют ограниченные ресурсы, а теплоноситель часто обладает агрессивными свойствами. Это вынуждает исследовать глубокие горизонты гидротермальных систем. Такие работы ведутся в Японии, где пробурено несколько структурных скважин глубиной до 4 км (проект «Deep-Seated Geothermal Resources Survey»), Новой Зеландии (работы научно-производственной компании «SINCLAR KNIGHT MERZ»), Италии (проект глубокого бурения на геотермальном поле Larderello-Travale).

Изучение геотермальных зон по геомагнитным данным ряда областей – Средиземноморья [1], Запада США [2], Прибайкалья [3] – позволило установить ряд закономерностей их строения. В верхней части коры выделяются узкие субвертикальные треки температурной проработки, которые поднимаются к поверхности и проявляются там в виде горячих и теплых источников. В средней и нижней коре, латерально расслоенной, выделяются слабомагнитные образования в виде системы протяженных горизонтальных линз. При сопоставлении положения таких слоев с данными других геофизических методов установлено, что они от-

личаются пониженными значениями параметров (плотность, электрическое сопротивление, скорость упругих волн) [4]. Полагается, что они представляют собой трещиноватые слои, насыщенные флюидами на водной основе и расположенные внутри ослабленной зоны земной коры, что подтверждается результатами геофизических исследований и сверхглубоким бурением скважин [5, 6]. По комплексу признаков содержащие их слои средней и нижней частей коры могут быть охарактеризованы как реологически ослабленные.

Треки верхней коры и слабомагнитные линзы в ее средней и нижней части представляют собой единую систему и связаны между собой каналами реологически ослабленного вещества как результат динамотермального метаморфизма пород. Этот процесс ведет к флюидонасыщению пород ослабленных слоев земной коры [7] и, в целом, такие системы могут быть идентифицированы как флюидные. Поэтому задача поиска геотермальных источников заключается в анализе положения и состава элементов флюидной системы, выделении узких субвертикальных треков гидротермальной проработки верхней коры и оценке их связи с ослабленными слоями низов коры.

Район и методика исследований

В настоящей работе с целью поиска источников подземных термальных вод в окрестности самого высокого действующего вулкана Андского вулканического пояса Невадо-дель-Руис (Колумбия) и оценки возможностей глубинной подпитки проведено исследование структуры геомагнитного поля на трех уровнях высот на площади с 80° по 65° з.д. от 4° ю.ш. до 12° с.ш. Более детальные исследования выполнены в пределах области с 77° по 74° з.д. от 4° до 6° с.ш. В пределах указанной территории известен ряд горячих источников, расположенных преимущественно на восточном склоне горного пояса.

Постоянное геомагнитное поле и его аномальная часть широко применяются для расчетов глубины поверхности магнитного фундамента, картирования интрузий и других магнитных неоднородностей, создающих аномалии. При этом слабомагнитные геологические образования, а также породы, утратившие намагниченность в результате высокотемпературных процессов в земной коре, плохо поддаются количественной интерпретации. Это затрудняет применение магнитного поля для исследования глубинного строения земной коры, особенно зон, где верхняя часть осадочного чехла представлена слабомагнитными толщами, а в средней и нижней коре происходят температурные изменения пород.

Для расчленения пород осадочного чехла, картирования магнитных и слабомагнитных образований фундамента использован метод спектрально-пространственного анализа [8]. Метод позволяет конвертировать спектрально-пространственное представление геомагнитного поля в глубинный геомагнитный разрез, что дает возможность выделить в земной коре как сильно-, так и слабомагнитные образования. Это позволяет проследить пути миграции флюидизированных потоков и выявить латеральную расслоенность и вертикальную раздробленность неоднородностей литосферы. Результаты расчета представляются в виде геомагнитного разреза вдоль профиля, что позволяет сопоставить местоположение, свойства магнитных неоднородностей и слабомагнитных образований с положением известных структур на сейсмических разрезах, где оцениваются скоростные и плотностные характеристики пород. Геомагнитные разрезы построены по магнитным аномалиям мировой карты WDMAM. Расчеты намагниченности J ($J = \chi H$, где χ – магнитная восприимчивость; H – значение главного магнитного поля Земли, постоянного для рассматриваемой площади) выполнены в относительных единицах по системе пересекающихся геомагнитных профилей для интервала глубин от 1 до 25 км.

Анализ магнитных аномалий приповерхностных аэромагнитных съемок по материалам мировой карты WDMAM и аномалий на высотах спутника CHAMP 100 и 400 км (рис. 1) показал, что область детальных исследований находится в зоне сложного разломного узла. При этом на высоте 400 км проявлена глубинная намагниченная структура субширотного простирания нижней части земной коры. На высоте 100 км видно, что она нарушается северо-западными слабомагнитными образованиями средней части коры. Анализ приповерхностных

магнитных аномалий по материалам WDMAM показал, что оба эти направления разрушены разломными зонами субмеридионального простирания, трассирующимися по цепочкам отрицательных магнитных аномалий. Именно эти субмеридиональные простирания верхней части коры хорошо выражены на геологической карте [9].

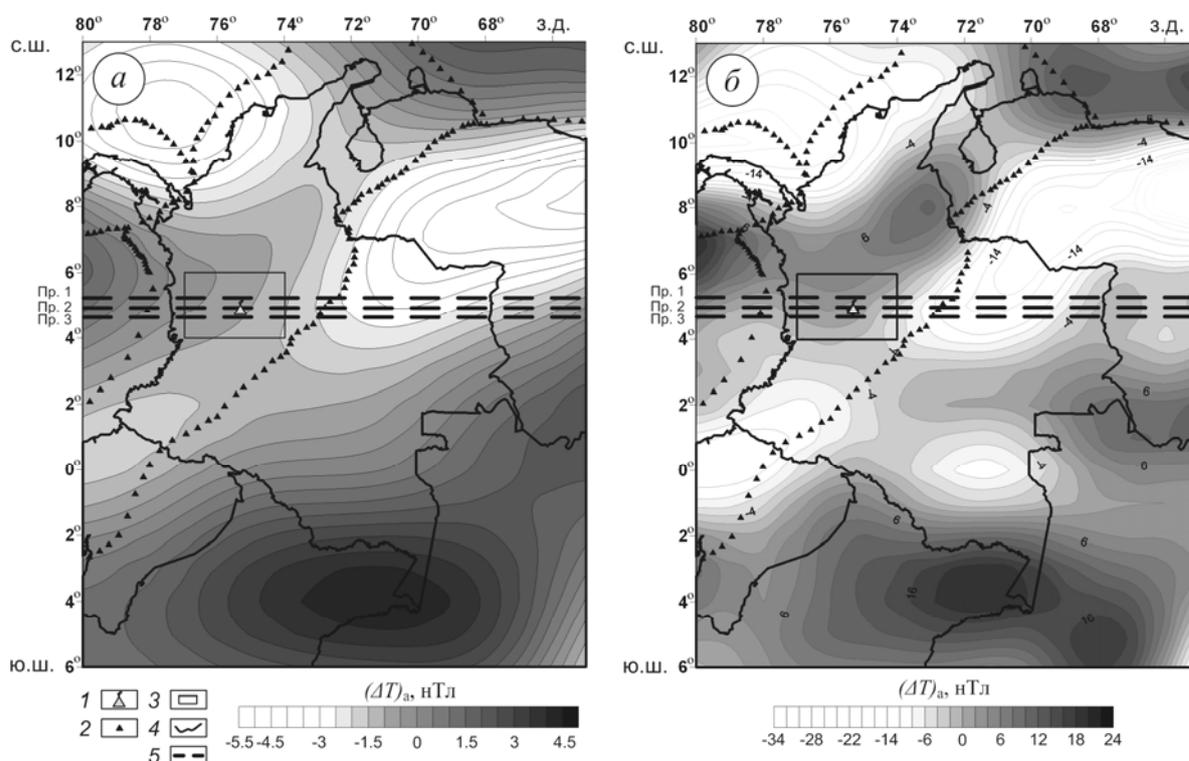


Рис. 1. Магнитные аномалии на высоте 400 км (а) и 100 км (б):
 1 – положение вулкана Невадо-дель-Руис; 2 – границы тектонических блоков;
 3 – район детальных исследований; 4 – границы береговой линии и государств;
 5 – положение геомагнитных профилей

Выделение перспективных участков

Изучение строения земной коры и выделение треков гидротермальной проработки в пределах района детальных исследований выполнено на основе анализа геомагнитных разрезов по системе профилей (рис. 1, 2). Они показали присутствие здесь всех элементов флюидных систем геотермальных месторождений – слабомагнитных линз (нижняя и средняя кора) и вертикальных треков температурной проработки (верхняя кора). Выполнение исследования по геомагнитным данным в окрестности действующего вулкана осложняет поиск термальных зон, поскольку треки высокотемпературной проработки действующего вулкана и геотермальных источников на геомагнитных разрезах проявляются сходным образом в виде треков пониженной магнитности [1]. К отличительным признакам следует отнести то, что флюидоупоры в случае вулкана могут быть разрушены внутри канала проработки, а в случае геотермальных источников – частично сохранены. Второй отличительный признак заключается в том, что угол подъема трека температурной проработки к поверхности у вулкана – практически вертикальный, а у термальных источников – субвертикальный. Таким образом, по этим критериям можно различить между собой каналы подпитки вулкана и термальные треки.

Для оконтуривания геотермальных зон с глубинной подпиткой на доступных для бурения глубинах в районе детальных исследований по магнитным аномалиям карты WDMAM построены площадные распределения слабомагнитных ареалов флюидных систем для глубин 2,5–3 км (рис. 2) и 10 км. Ареалы на 2,5–3 км отражают положение геотермальных резервуаров на доступных для бурения глубинах. Анализ распределения слабомагнитных ареалов на глубине 10 км позволяет оценить степень подпитки верхних резервуаров.

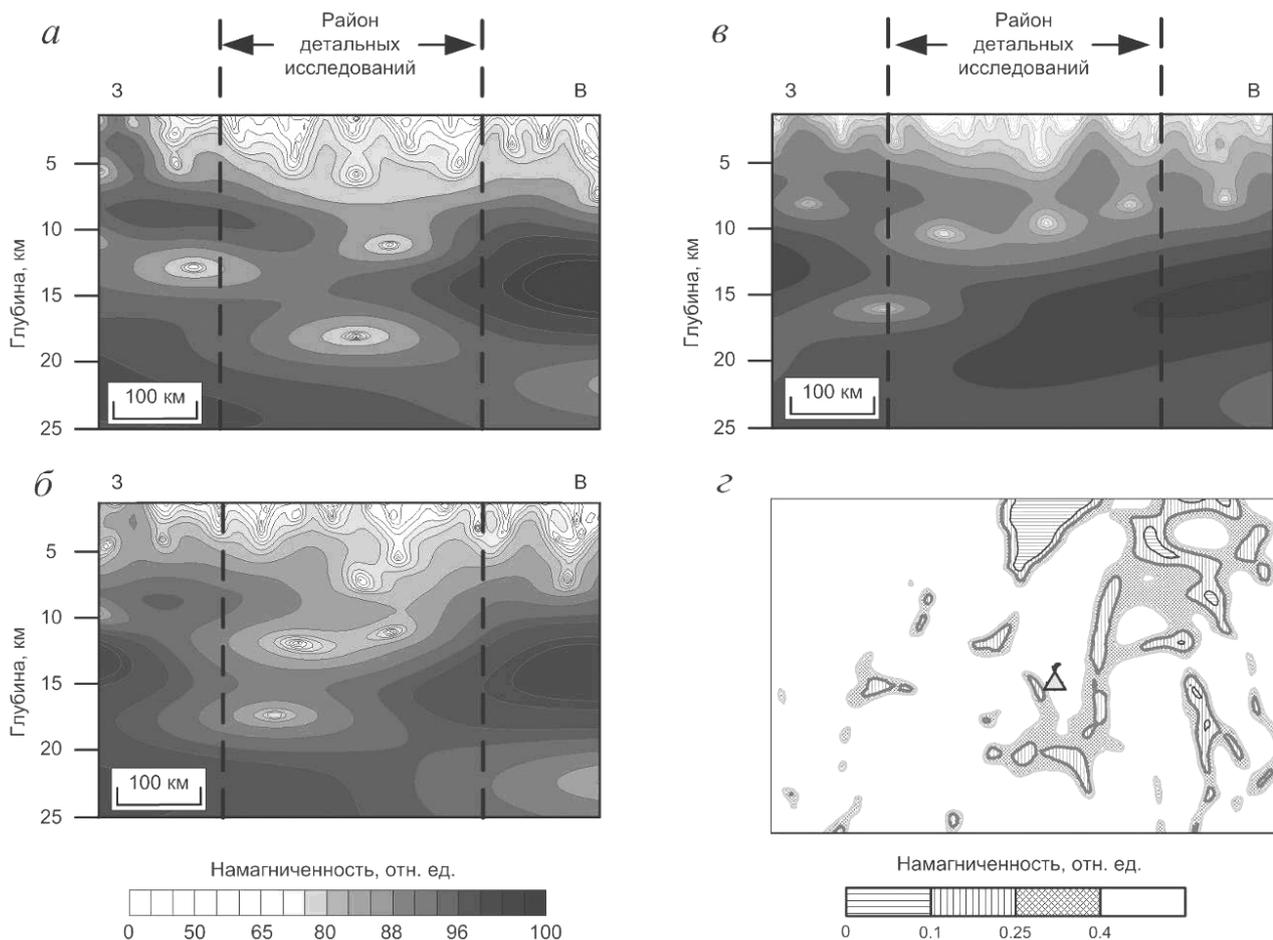


Рис. 2. Геомагнитные разрезы вдоль геомагнитных профилей: Пр. 1(*а*), Пр. 2 (*б*), Пр. 3 (*в*) и распределение слабомагнитных ареалов на глубине 2,5–3 км в пределах района детальных исследований (*з*)

В результате анализа и обобщения этих материалов в пределах района детальных исследований выделен ряд участков, перспективных на выявление источников термальных вод с глубинной подпиткой. Все эти участки находятся внутри слабомагнитного ареала на глубине 2,5–3 км. По характеру подпитки с глубин до 15 км участки были разделены на две группы перспективности (высокой и средней). К первой группе площадок отнесены те, которые находятся в слабомагнитном ареале на глубине около 10 км, а подъем разогретого вещества осуществляется субвертикально, практически без флюидоупоров. Ко второй группе площадок отнесены те, которые находятся на периферийной части слабомагнитного ареала на глубине около 10 км. Для этой группы основная зона гидротермальной проработки прослеживается с глубины 3–6 км, а подпитка возможна с глубин 10–14 км, но через флюидоупорный элемент, имеющий мощность 400–800 м на глубине около 8 км. Сопоставление расположения выделенных участков с положением известных горячих и тёплых источников показало их хорошую корреляцию.

Заключение

Таким образом, в работе выполнен поиск геотермальных источников в окрестностях действующего вулкана Невадо-дель-Руис по геомагнитным данным. Поиск выполнен на основе анализа геомагнитных разрезов и площадных распределений слабомагнитных зон на глубинах 2,5–3 и 10 км. Выделение перспективных участков осуществлено по наличию слабомагнитных субвертикальных треков на геомагнитных разрезах, поднимающихся с глубин 3–6 км к поверхности, и их связи со слабомагнитными линзами на глубинах 8–14 км. Составленная схема может быть использована для постановки детальных поисковых работ, например, методами электро- и/или сейсморазведки.

Автор выражает глубокую признательность А. А. Петровой и Ю. А. Копытенко за помощь в подготовке материала и обсуждение результатов работы.

Список литературы

1. *Петрова А. А., Петрищев М. С.* Флюидные системы Средиземноморья // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2011. – № 1. Выпуск 17. – С. 23–33.
2. *Петрищев М. С., Петрова А. А., Копытенко Ю. А.* Глубинное строение термальных зон по результатам комплексирования геофизических полей // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 38-й сессии Международного научного семинара им. Д. Г. Успенского. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. – С. 219–222.
3. *Копытенко Ю. А., Петрова А. А., Петрищев М. С.* Глубинное строение ослабленных зон Прибайкалья // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 38-й сессии Международного научного семинара им. Д. Г. Успенского. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. – С. 140–142.
4. *Петрищев М. С., Петрова А. А., Копытенко Ю. А.* Структура коровых проводников по геофизическим данным // Материалы Пятой всероссийской Школы-семинара им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. В двух книгах. Книга 2. – СПб.: СПбГУ, 2011. – С. 207–210.
5. *Каракин А. В., Курьянов О. А., Павленкова Н. И.* Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. – М.: ВНИИГеосистем, 2003. – 222 с.
6. *Николаевский В. Н.* Трещиноватость земной коры как ее генетический признак // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, – № 5. – С. 646–656.
7. *Павленкова Н. И.* Структура земной коры и верхней мантии и механизм движения глубинного вещества // Вестник ОГГГГ РАН. – 2001. – № 4 (19). – 18 с. (Электронный научный журнал).
8. *Петрова А. А.* О влиянии рельефа фундамента на спектральную структуру аномального магнитного поля континентальных и океанических регионов. Геомагнитное поле и внутреннее строение Земли. – М.: ИЗМИРАН, 1980. – С. 137–144.
9. *USGS open-file report 97-470D.* Maps showing geology, oil and gas fields, and geologic provinces of the South America region / Compiled Schenk C. J., Viger R. J., Anderson C. P. – USGS: 1997. – 22 p.

Рецензент – кандидат геолого-минералогических наук А. К. Сараев.

Л. В. Сметанина (ИНГГ СО РАН, Новосибирск, Россия)

И. В. Михайлов (НГУ, Новосибирск, Россия; ИНГГ СО РАН, Новосибирск, Россия)

ОКАЙМЛЯЮЩАЯ ЗОНА В КОЛЛЕКТОРАХ КАК ПРЯМОЙ ПРИЗНАК ИХ НЕФТЕНОСНОСТИ

L. V. Smetanina (IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russia)

I. V. Mikhaylov (NSU, Novosibirsk, Russia; IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russia)

LOW-RESISTIVITY ZONE IN RESERVOIRS AS THE DIRECT OIL INDICATOR

В данной работе рассматривается «окаймляющая зона», представляющая из себя область скопления соленой пластовой воды. Она образуется между зоной проникновения и незатронутой частью пласта-коллектора. Наличие окаймляющей зоны однозначно указывает на присутствие в коллекторе подвижных пластовых флюидов – нефти и воды. Геофизические исследования скважин методом высокочастотных индукционных каротажных изопараметрических зондирований (ВИКИЗ) позволяют уверенно выделять низкоомные области окаймляющих зон. Приведены основные факторы, необходимые для их формирования. Рассмотрены результаты численного моделирования и практические диаграммы ВИКИЗ, на которых проявляются окаймляющие зоны.

Ключевые слова: нефтеносность коллектора, окаймляющая зона, ВИКИЗ.

This paper presents «low-resistivity zone» phenomenon. Low-resistivity zone is an area where salty formation water accumulates. It is formed between a zone filled with drilling mud filtrate and an unmodified reservoir. Low-resistivity zone is the unambiguous indicator of mobile oil and water presence. The geophysical technique of High-Frequency Induction Logging Isoparametric Sounding (VIKIZ) provides confident detection of low-resistivity zones. The main factors, required for low-resistivity zones generation are considered. The numerical simulation results and practical well log data are analyzed.

Keywords: presence of oil, low-resistivity zone, VIKIZ.

Введение

«Окаймляющая зона» как явление техногенного происхождения известна в литературе, посвященной электрометрии скважин. Первое упоминание о ней появилось в 1950-х гг., когда группа исследователей из США обнаружила окаймляющую зону сначала *in vitro*, а затем и *in situ* [1]. В работах советских исследователей [2], [3] возможность образования окаймляющей зоны была подтверждена серией лабораторных экспериментов. Влияние окаймляющей зоны на измеряемые характеристики электромагнитного поля было впервые исследовано в Лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН [4]. Однако в практике промысловой геофизики явление окаймляющей зоны слабо используется и на сегодняшний день.

Процессы, происходящие в околоскважинном пространстве

Главным техногенным фактором, приводящим к образованию окаймляющей зоны, является бурение. Процесс бурения сопровождается проникновением фильтрата бурового раствора в пласт-коллектор. Проникая в поры, фильтрат вытесняет подвижные пластовые флюиды вглубь пласта. Если поры гидрофильного коллектора заполнены углеводородами и содержат свободную и рыхлосвязанную воду, то вытесняется сначала нефтегазовая компонента, а затем – пластовая вода. Вследствие этого, на разных удалениях от стенки скважины возникают различные неоднородности в распределении флюидов.

Одна из неоднородностей примыкает непосредственно к скважине и образуется за счет заполнения пор водным фильтратом бурового раствора, а также остатками пластовой воды и нефти (соленость фильтрата меньше, чем у пластовых вод). Другая неоднородность образуется за счет скопления соленой пластовой воды, вытесняемой вслед за нефтью, являясь буфером между нефтяной зоной и областью, заполненной фильтратом (рис. 1).

Наличие буфера является ярким признаком подвижной нефти в коллекторе. Область скопления соленой воды, называемая известным термином *окаймляющая зона*, характеризу-

ется низким удельным сопротивлением, толщиной и радиальным удалением от скважины. При наличии окаймляющей зоны отмечается следующий порядок распределения удельных сопротивлений по направлению от скважины вглубь пласта: *высокое, низкое* и опять *высокое*. За зоной проникновения фильтрата находится *невозмущенный* пласт с неизменным распределением флюидов [5]. На рис. 2 приведен график радиального распределения УЭС от скважины к неизмененному пласту.



Рис. 1. Распределение флюидов при формировании окаймляющей зоны (основа рисунка взята из работы [5])

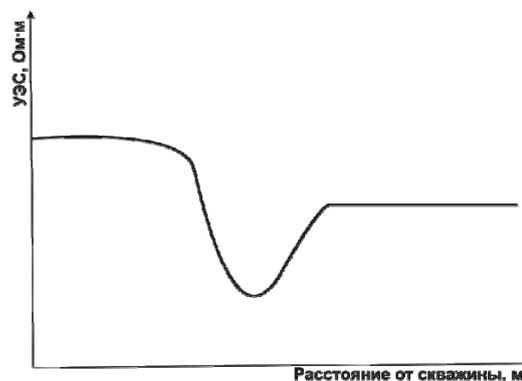


Рис. 2. Радиальное распределение УЭС при наличии окаймляющей зоны

Отметим основные, на наш взгляд, условия возникновения окаймляющей зоны:

- наличие в коллекторе подвижных форм нефти и пластовой воды;
- гидрофильность коллектора;
- более высокая минерализация пластовых вод по сравнению с минерализацией фильтрата бурового раствора;
- структурно-текстурные свойства коллектора;
- величина избыточного давления от скважины к пласту.

Моделями, адекватно описывающими наличие окаймляющей зоны, являются одномерные цилиндрически-слоистые и двумерные модели сред (рис. 3, 4).

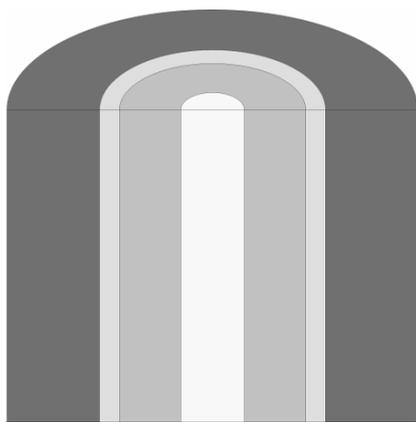


Рис. 3. Одномерная модель среды

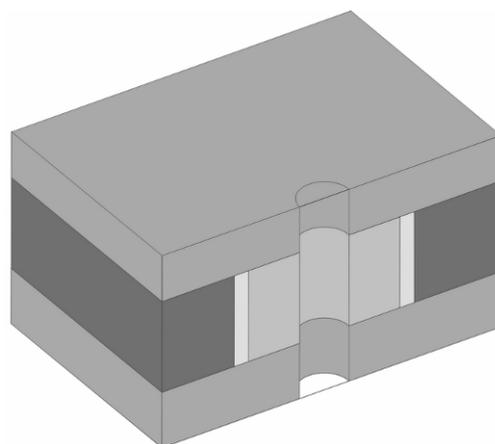


Рис. 4. Двумерная модель среды

Метод ВИКИЗ

На рис. 5 приведена схема зондового комплекса высокочастотных индукционных каротажных изопараметрических зондирований (ВИКИЗ). Он представляет собой набор из пяти трехкатушечных зондов разной длины, работающих на различных частотах. Длины и частоты ВИКИЗ связаны условиями изопараметричности.

Первый изопараметр – геометрический, подразумевающий постоянство отношения базы зонда к его длине: $\frac{\Delta L_i}{L_i} = const$. Второй – электродинамический изопараметр, требующий постоянства произведения длины зонда на корень рабочей частоты: $L_i \cdot \sqrt{f_i} = const$.

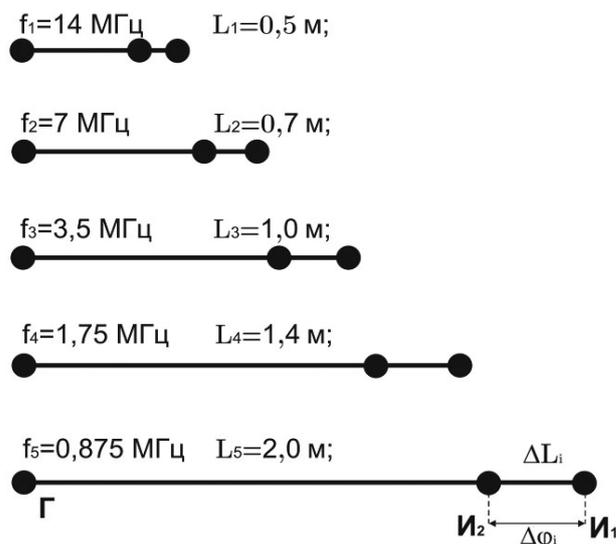


Рис. 5. Схема зондового комплекса ВИКИЗ

Из принципа изопараметричности следует равенство измеряемых методом ВИКИЗ разностей фаз в однородной изотропной среде. На рис. 6 изображена схема концентрации электромагнитных откликов ВИКИЗ в однородной среде, окружающей скважину. Схема показывает, что глубинность исследований последовательно увеличивается от короткого зонда к длинному.

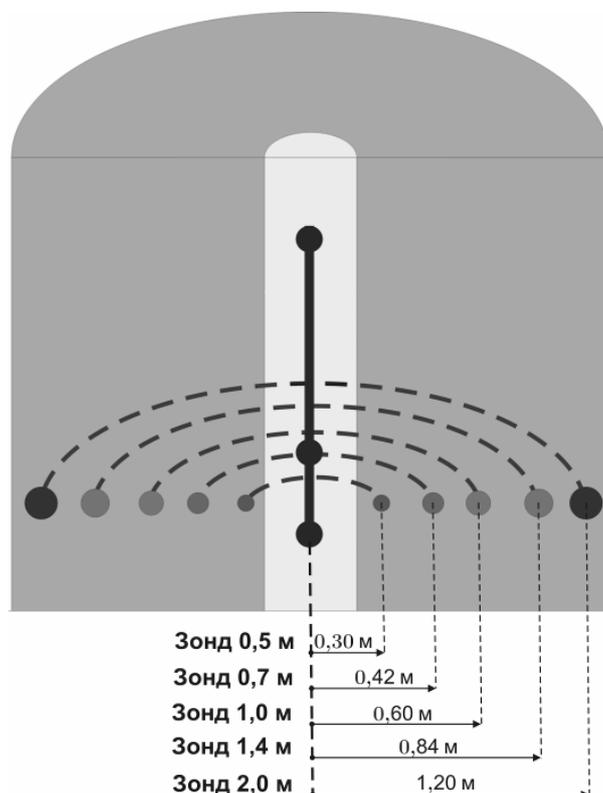


Рис. 6. Схема концентрации электромагнитных откликов ВИКИЗ в однородной среде

Обнаружение окаймляющих зон методом ВИКИЗ

Зонды метода ВИКИЗ обладают высокой чувствительностью к окаймляющей зоне, характеризующейся повышенной проводимостью по сравнению с зоной проникновения и неизменной частью пласта. Это отображается на каротажных диаграммах ВИКИЗ по их инверсионному поведению относительно друг друга. Инверсия диаграмм подразумевает наличие минимума кажущихся УЭС по промежуточным зондам, что свидетельствует о нахождении окаймляющей зоны в области их исследования.

Прослеживание инверсии каротажных диаграмм ВИКИЗ при наличии окаймляющей зоны в продуктивном пласте подтверждается проведением численного моделирования (расчетом синтетических диаграмм).

Численное моделирование ВИКИЗ

Для расчета прямых задач ВИКИЗ были использованы программные средства, разработанные в ИНГГ СО РАН [6, 7].

На рис. 7 приведен пример одномерного моделирования в цилиндрически-слоистой модели среды, соответствующей нефтеводонасыщенному коллектору. Ее геометрические и электрофизические параметры выбраны из типичных для Западной Сибири разрезов скважин. Параметры модели приведены в таблице.

Таблица

Параметры одномерной модели среды

	Скважина	Зона проникновения	Окаймляющая зона	Пласт
Радиус, м	0,108	4×0,108	5×0,108	∞
УЭС, Ом·м	1	15	2	8

Результатом моделирования является кривая зондирования. Эта кривая имеет минимум кажущихся УЭС в области исследования зондов 0,7 и 1 м, что прямо свидетельствует о нахождении низкоомной окаймляющей зоны в этой области. Пунктиром условно показано продолжение кривой зондирования, которая выходит на асимптоту пласта, равную 8 Ом·м.

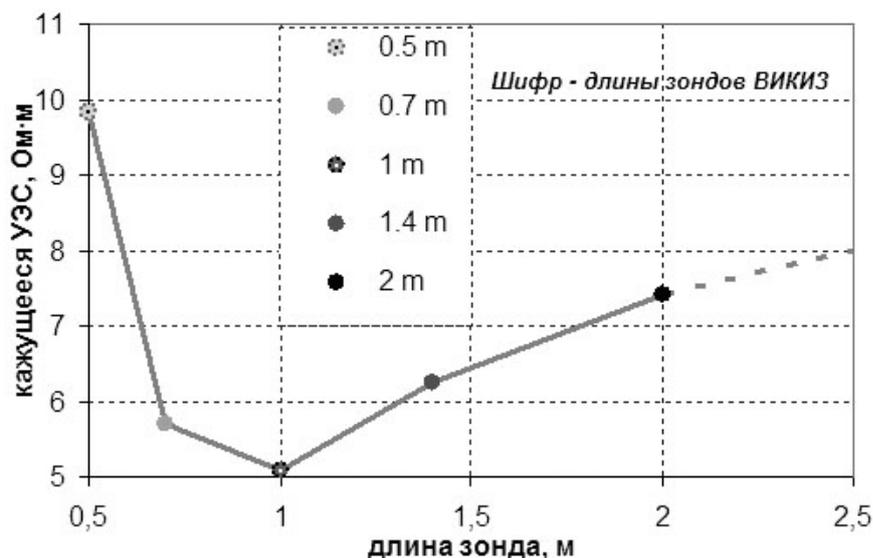


Рис. 7. Пример одномерного моделирования ВИКИЗ

В свою очередь, на рис. 8 приведен пример решения прямой двумерной задачи ВИКИЗ в модели нефтеводонасыщенного коллектора, заключенного между непроницаемыми породами. Были взяты те же параметры модели, что и в таблице, с добавлением вмещающих пород удельного сопротивления 3 Ом·м и, соответственно, ограничения пласта-коллектора по мощности в 3 м.

Результаты моделирования показывают следующее (см. рис. 8). Диаграмма короткого зонда (0,5 м) отображает максимум кажущегося УЭС, что вызвано в основном влиянием зоны проникновения. Каротажные диаграммы средних зондов (0,7 и 1 м) характеризуются инверсионным поведением, отражая минимальные значения кажущихся УЭС. Наконец, диаграммы длинных зондов (1,4 и 2 м) находятся в промежуточном положении. Все это отражает факт наличия окаймляющей зоны в области исследования средних зондов ВИКИЗ. Данные примеры, являющиеся одними из многочисленных, показывают возможности выделения окаймляющих зон с помощью метода ВИКИЗ.

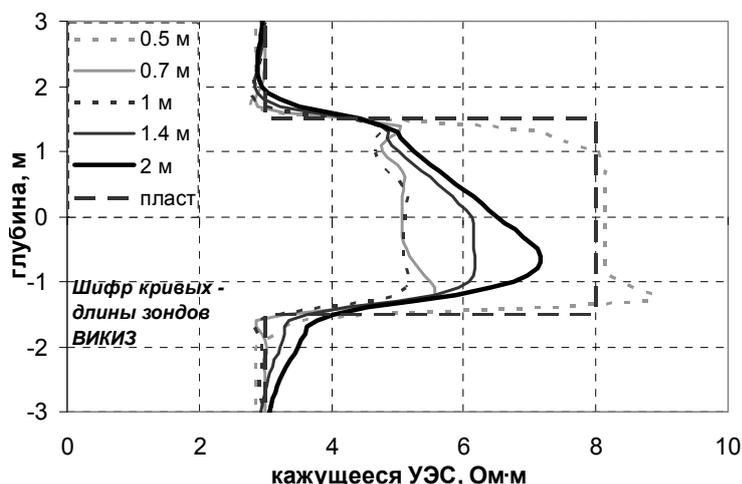


Рис. 8. Пример двумерного моделирования ВИКИЗ

Присутствие окаймляющей зоны в гидрофильных терригенных коллекторах подтверждается анализом практических диаграмм, рассмотренных ниже.

Анализ практических диаграмм каротажа

Используя программную систему Emf Pro (ИНГГ СО РАН), рассмотрим каротажные диаграммы, полученные по одной из скважин Федоровского месторождения (рис. 9). На треках приведены диаграммы методов ПС, ГК, а также диаграммы ВИКИЗ (средний трек – кривые измеряемых разностей фаз, правый – кривые кажущихся УЭС).

Продуктивный пласт представлен в интервале глубин 1974–2001,5 м. Кривые ГК и коротких зондов ВИКИЗ сильно изрезаны, что указывает на сильную литологическую неоднородность рассматриваемого разреза. Кривая ПС в его верхней части (1974–1981 м) убывает, отрицательная амплитуда ПС падает от –100 до –40 мВ. Это свидетельствует об увеличивающейся глинизации при движении от кровли к подошве данного интервала. На нижележащем интервале глубин (1982–2000 м) кривая ПС относительно однородна.

От подошвы к кровле интервала 1974–2000 м, за исключением глинистого прослоя (1980,7–1982,5 м), происходит равномерное увеличение показаний длинных зондов ВИКИЗ, что говорит об уменьшении относительного объема, занятого соленой пластовой водой, и увеличении доли, занятой углеводородами. То есть, данный интервал фактически является переходной зоной.

Перейдем к анализу взаимного поведения диаграмм ВИКИЗ. Рассмотрим интервал глубин 1974–1980,7 м. В самой верхней его части (1974–1976,5 м) наблюдается понижающее проникновение – показания растут от короткого зонда к длинному. Поэтому данный пласт является нефтегазоносным, со значительной долей газовой составляющей.

При движении вниз по разрезу (1976,5–1980,7 м) наблюдается инверсия кривой зонда 0,7 м относительно кривой самого короткого (0,5 м) зонда; минимум кажущихся УЭС наблюдается по зонду 0,7 м. Это является прямым признаком наличия окаймляющей зоны, что позволяет расценивать данный интервал, как нефтегазоносный, с наличием подвижной нефти и пластовой воды. На интервале глубин 1982,5–1985,5 м ситуация схожа – присутствует инверсионное поведение диаграммы зонда 0,7 м относительно диаграммы зонда 0,5 м.

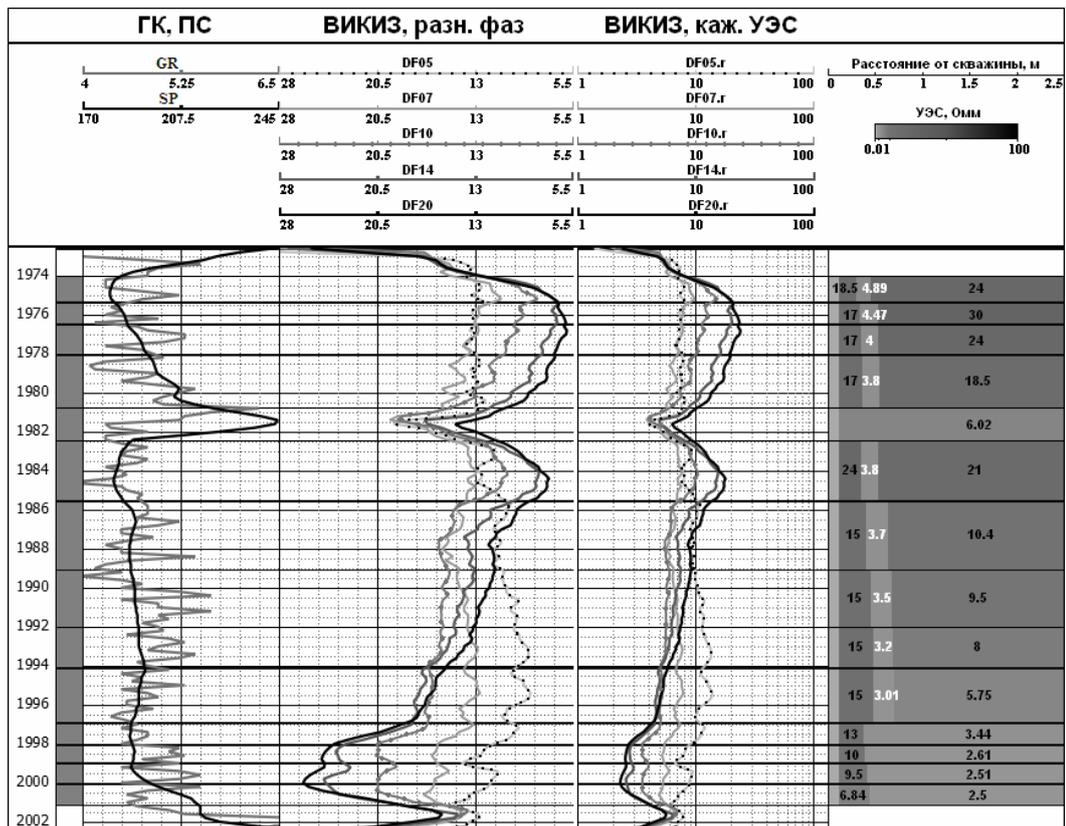


Рис. 9. Практические диаграммы ВИКИЗ, подтверждающие наличие окаймляющей зоны

На глубине 1985,5 м происходит инверсия показаний среднего (1 м) зонда относительно зонда 0,7 м. И, исходя из этого, на нижележащем интервале (1985,5–1994 м) минимум кажущихся УЭС наблюдается по показаниям среднего зонда. На пикете 1994 м диаграмма зонда 1,4 м инвертируется относительно диаграммы зонда 1 м. Теперь минимум кажущихся УЭС приходится на зонд 1,4 м. И, наконец, на пикете 1996,9 м полностью прекращается инверсия диаграмм.

Все это говорит, во-первых, о наличии окаймляющей зоны на интервале глубин, где прослеживается инверсионное поведение диаграмм зондов ВИКИЗ (1976,5–1996,9 м). Во-вторых, о последовательном смещении окаймляющей зоны в область исследования все более длинных зондов при движении сверху вниз по геологическому разрезу. И, если минимумы кажущихся УЭС сдвигаются в область исследования все более длинных зондов, это свидетельствует о движении зон скопления соленой пластовой воды все дальше вглубь пласта. Вышесказанное позволяет расценивать весь диапазон глубин, где прослеживается инверсия диаграмм ВИКИЗ, как нефтеводоносный, с наличием на всем его протяжении подвижных нефти и пластовой воды.

На интервале 1996,9–2001,5 м инверсия не происходит. Наблюдается последовательное уменьшение кажущихся сопротивлений от короткого к длинному зонду. Иными словами, имеет место повышающее проникновение в водоносном коллекторе.

В правой части рис. 9 приведен результат решения обратной задачи (геоэлектрический разрез), который хорошо согласуется с нашими рассуждениями. Для его получения сначала производилась одномерная инверсия данных, которая затем была уточнена с помощью двумерной инверсии. Интересным моментом является наличие окаймляющих зон даже на интервале 1974–1976,5 м, чего не видно по диаграммам ВИКИЗ. Причина этого заключается в нахождении окаймляющей зоны в области исследования двух самых коротких зондов – 0,5 и 0,7 м.

В свою очередь, на рис. 10 приведена кривая зондирования с одного из интервалов, отображающая наличие зоны пониженных сопротивлений в области исследования средних

зондов ВИКИЗ. Справа от нее показаны параметры среды, полученные при решении обратной задачи каротажа. Видно, что параметры окаймляющей зоны (толщина и удельное сопротивление) могут существенно отличаться от тех, что были приняты при моделировании за счет ее ярко выраженной эквивалентности по продольной проводимости.

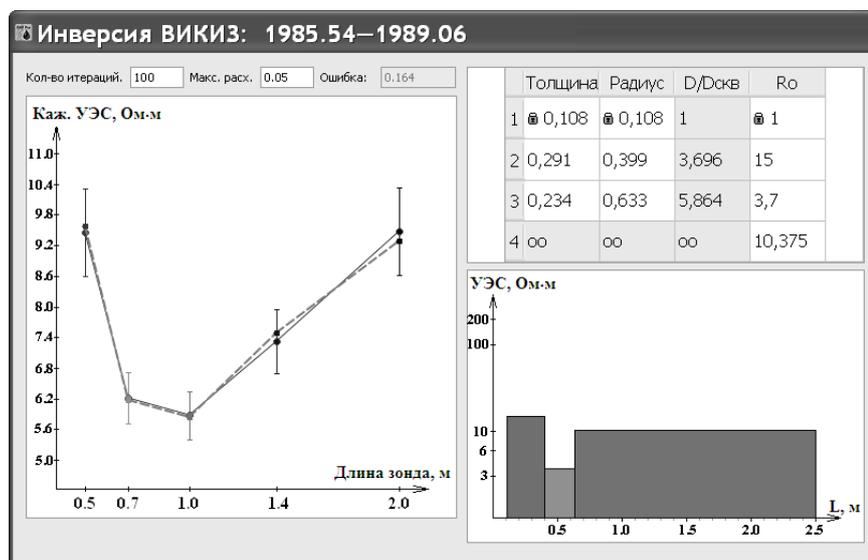


Рис. 10. Кривая зондирования и результат решения обратной задачи

Выводы

Окаймляющая зона является достаточным признаком наличия подвижных пластовых флюидов – нефти и пластовой воды. Уникальные разрешающие способности метода ВИКИЗ, подтвержденные численными расчетами на соответствующих моделях, позволяют решать задачу по выделению окаймляющих зон, не требуя привлечения других методов каротажа.

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность научному руководителю д-ру техн. наук, профессору Юрию Николаевичу Антонову за постановку задачи и обсуждение полученных результатов.

Список литературы

1. Campbell W. M., Martine J. L., Greer W. J. Displacement logging – a new exploratory tool // Journal of Petroleum Technology. – 1955. – V. 204. – N 12. – P. 233–238.
2. Орлов Л. И., Ручкин А. В., Свихнушин Н. М. Влияние промывочной жидкости на физические свойства коллекторов нефти и газа – М.: Недра, 1976. – 89 с.
3. Куртев Т., Тенчов Г., Василев Г., Гешев А. Моделирование электропроводности при-скважинной зоны коллектора // Прикладная геофизика. – 1979. – Вып. 96. – С. 163–169.
4. Антонов Ю. Н., Жмаев С. С. Высоочастотное индукционное каротажное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ): //Методические рекомендации. – Новосибирск: Институт геологии и геофизики СО АН СССР. – 1979. – 104 с.
5. Эпов М. И., Антонов Ю. Н. и др. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. //Методическое руководство. – Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, изд-во СО РАН. – 2000. – 122 с.
6. Эпов М. И., Глинских В. Н. Быстрое двумерное моделирование высокочастотного электромагнитного поля для задач каротажа // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. – № 9. – С. 942–952.
7. Эпов М. И., Глинских В. Н. Электромагнитный каротаж. Моделирование и инверсия, – Новосибирск: Изд-во «ГЕО», 2005. – 98 с.

Рецензент – кандидат геолого-минералогических наук Н. А. Ворошилов.

ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ КАРОТАЖА ПОРИСТОСТИ ДЛЯ АЛЬБ-АПТСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ТЕРСКО-СУНЖЕНСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ОБЛАСТИ

T. B. Ezirbaev (GGNTU, Grozny, Russia)

VALIDATION OF LOG POROSITY MODELS OF ALB-APTIAN DEPOSITS OF THE TEREK-SUNZHA OIL AND GAS AREA

В работе приводится краткое описание особенностей пород терригенных отложений нижнего мела Терско-Сунженской нефтегазоносной области (ТСНГО); дается описание трехкомпонентной модели песчано-алеврито-глинистой породы; рассмотрена система петрофизических моделей, которая используется при автоматизированном восстановлении свойств пород терригенного разреза по данным ГИС в системе Gintel – методика ТАВС [4], а также приводится обоснование математических моделей каротажа пористости применительно к нижнему мелу ТСНГО.

Ключевые слова: петрофизика, модель, терригенные отложения, пористость, нефть.

This paper provides a brief description of rocks parameters of the Lower Cretaceous clastic sediments of the Terek-Sunzha oil and gas field area and describes the three-component model of sand-silt-clay rocks by a system of petrophysical models used in the method ТАВС [4] as well as the validation of mathematical of log porosity models with respect to the Lower Cretaceous TSNGO.

Keywords: petrophysics, model, terrigenous deposits, porosity, oil.

Особенность терригенных отложений нижнего мела Терско-Сунженской нефтегазоносной области заключается в преимущественном содержании алевритовой фракции и трещиноватости уплотненных терригенных пород. Песчаные и песчано-алевритовые тела относятся к коллекторам и содержат подвижные и остаточные углеводороды, а также подвижную и связанную воду. Существенно изменяется нефтенасыщение толщи пород как по разрезу, так и по площади распространения залежей, связанное со структурным строением и петрофизическими характеристиками пород. Для определения физических свойств таких пород по данным ГИС необходимо использовать систему петрофизических моделей, в которой должны учитываться описанные выше особенности изменения свойств терригенных отложений и их нефтенасыщение.

При выполнении исследований для определения физических свойств вышеуказанных пород по данным ГИС в качестве базы была использована система петрофизических моделей, разработанная В. С. Афанасьевым и С. В. Афанасьевым, теоретическое описание которой приведено в патенте авторов [1]. К настоящему времени эта система моделей была успешно адаптирована ко многим геологическим разрезам палеозоя, мезозоя и кайнозоя: Западная Сибирь (мезозой), Тимано-Печорская провинция (палеозой), Западный Кавказ (кайнозой), Египет (мезозой и кайнозой) и др.

В основе системы петрофизических моделей лежит трехкомпонентная модель песчано-алеврито-глинистой породы, которая представлена на рис. 1 (цв. вкл., стр. 137). В соответствии с этой моделью терригенная порода состоит из структурного каркаса и порового пространства. Структурный каркас сложен песчаной, алевритовой и глинистой фракциями; карбонатным цементом; обломками первичных пород и прочими минералами. Поровое пространство в нефтегазоносном коллекторе насыщено связанной и подвижной водой, подвижными и остаточными углеводородами. Объем связанной воды формируется всеми составляющими структурного каркаса породы.

В трехкомпонентной модели реализован учет влияния алевритового материала на физические свойства породы наряду с глинистым компонентом. В этой модели также учитывается изменение физических свойств структурного каркаса породы как функции соотношения его

фракционного состава, изменения заряда слагающих фракции частиц, минерализации пластовой воды, нефтегазонасыщенности и отражения этих изменений в адсорбционных процессах и физических свойствах, которые определяются по данным ГИС [2, 3].

Для трехкомпонентной модели терригенной породы обоснована система петрофизических уравнений, описывающая физические свойства пород и показания методов ГИС как функцию петрофизических характеристик пород и их флюидального насыщения с учетом термобарических условий залегания пород в разрезе.

Для расчета геологических свойств пород в альб-аптских отложениях применяется набор физических свойств породы в каждой точке околоскважинного пространства вдоль ствола скважины, которые определяются по данным предварительной обработки комплекса кривых ГИС, зарегистрированных в скважинах. К ним относятся следующие параметры:

ρ_n – УЭС не затронутой проникновением части пласта;

$\rho_{Г.МЗ}, \rho_{П.МЗ}$ – показания микрозондов;

$\Delta U_{ПС}$ – аномалия естественного электрического потенциала на кривой ПС;

$J_{ГК}$ – показания на кривой естественной гамма-активности ГК;

$\omega_{НК}$; V/V (д.е.) – водородосодержание по данным НГК;

Δt , мкс/м – интервальное время пробега продольной волны по АК.

Описанный подход был разработан и применен авторами методики ТАВС, которая реализована в программном обеспечении системы Gintel 2008 [4] и рассматривается ими как адаптация набора принятых петрофизических связей к изучаемым породам на основе использования методов математического моделирования. В процессе адаптации решаются две задачи:

– доказываемость применимости системы петрофизических моделей для описания свойств изучаемых пород;

– устанавливаются значения эмпирических коэффициентов, входящих в формулы, обуславливающих их использование для определения свойств пород в разрезе.

В данной работе описывается обоснование некоторых из вышеуказанных параметров, а точнее, – показания водородосодержания по данным НГК – $\omega_{НК}$; V/V (д.е.) и интервальное время пробега продольной волны по АК – Δt , мкс/м. Для комплексной интерпретации данных перечисленных физических свойств пород разработана методика и применяются петрофизические модели, обоснование которых было выполнено автором и описано ниже.

В новых петрофизических моделях для конкретных физических свойств горных пород (интервального времени пробега продольной акустической волны по АК, водородосодержания среды по нейтронному каротажу (НГК, НКТ, ННК)), которые по форме практически совпадают с известными моделями для чистой (электрически нейтральной, или иначе, *неглинистой*) породы, введен учет изменения интегральных свойств структурного каркаса породы в форме оценки значения параметра ее скелета для каждой точки среды. Такая коррекция включает необходимость введения в петрофизические модели, как это делается в известных формулах для *глинистых песчаников*, дополнительных компонентов, связанных с величиной глинистости пласта и характером размещения глинистого структурного компонента в объеме породы, что в значительной степени повышает устойчивость алгоритма определения петрофизических свойств породы по комплексу кривых ГИС. В разработанной методике для оценки свойств пород используются кривая водородосодержания, определяемая по данным НГК, и кривая АК. Для интерпретации кривых этих методов применяются петрофизические модели водородосодержания и АК [1, 3]. Автором статьи выполнены исследования по обоснованию применимости этих моделей в условиях альб-аптских отложений Терско-Сунженской нефтегазоносной области.

Петрофизические модели водородосодержания $\omega_{НК}$, V/V (д.е.) и Δt , мкс/м описываются формулами:

$$\omega_{НК} = K_n \omega_ж + \omega_{ск} \cdot \theta + \omega_\chi, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\Delta t_n} = \frac{K_n}{\Delta t_{ж}} + \frac{(1-K_n)^2}{170 + \Delta t_{ск} \cdot \theta}, \quad (2)$$

где K_n – полная пористость породы (объем всех пор, сформированных структурным каркасом породы);

$\Delta t_{ж}$, $\omega_{ж}$ – интегральные физические характеристики порового пространства породы: интервальное время пробега акустической волны в жидкости, насыщающей поровое пространство, определенное для минерализации электролита, насыщающего поровое пространство; водородосодержание флюида внутри порового пространства породы, $\omega_{ж} = 1$;

$\omega_{ч}$ – водородосодержание, определяемое химически связанной водой в минералах, слагающих структурный каркас породы. При эталонировке прибора нейтронного каротажа по известняку эта величина также содержит литологическую поправку;

$\Delta t_{ск}$, $\omega_{ск}$ – предельная величина интервального времени пробега акустической волны в скелете породы и водородосодержание скелета породы в условиях ее естественного залегания, как функция глубины h , при предположении протекания в изучаемом объеме породы предельных адсорбционных процессов (соответствуют глине);

θ – коэффициент адсорбционных явлений, изменяющийся в диапазоне от 0 до 1, имеющий величину $\theta=0$ для электрически нейтральной породы, в которой протекают ничтожно малые адсорбционные процессы; и $\theta=1$ – для пород, сложенных глинами, в которых протекают предельные адсорбционные явления. В реальных породах коэффициент $\theta < 0,8$.

Коэффициент адсорбционных явлений θ является функцией пористости K_n и водонасыщенности K_v породы, а также интегрального электрического заряда поровых каналов, выраженного величиной ионной емкости породы Q_n (моль/л) и минерализации пластовой воды C_v (моль/л), насыщающей породу:

$$\theta = \frac{Q_c}{1+Q_c} \cdot \frac{K_{nc}}{1+K_{nc}} \quad (3)$$

где $Q_c = \frac{Q_n}{C_v K_v}$ и $K_{nc} = \frac{K_n}{K_{n0}}$.

Величина K_{n0} соответствует минимальной пористости, до которой может быть уплотнена порода на глубине ее залегания, определяемая зависимостью $K_{n0} = f(h)$ для изучаемого разреза. Для терригенных отложений альб-апта она была принята равной 3 %. На рис. 2, а, б (цв. вкл., стр. 137) приведены графики сопоставления данных пористости, измеренной по керну, и показаний водородосодержания (см. рис. 2, а), и интервального времени АК (см. рис. 2, б), определенные по соответствующим кривым ГИС, зарегистрированным в этих скважинах.

На графики рис. 2, а нанесены теоретические кривые $\omega_{нк} = f(K_n)$, а на графики рис. 2, б $\Delta t = f(K_n)$ – рассчитанные по моделям (2) и (3) соответственно для фиксированных величин емкости катионного обмена скелета породы $Q_{ск} = 0; 0,01; 0,1; 0,3$ и 1 моль/г.

Анализ положения точек на графиках показывает, что с ростом глинистости пород и, следовательно, емкости катионного обмена, точки смещаются вправо, что соответствует положению теоретических линий. Графики также показывают, что максимальное смещение точек соответствует глинам гидрослюдистого состава (0,3 моль/г). Это служит доказательством достоверности моделей каротажа пористости и их применимости при интерпретации данных ГИС в изучаемом разрезе.

Список литературы

1. Афанасьев В. С., Афанасьев С. В., Афанасьев А. В. Способ определения геологических свойств терригенной породы в околоскважинном пространстве по данным геофизических исследований разрезов скважин // Патент РФ № 2219337, 2003 г.

2. Афанасьев В. С., Шнурман Г. А., Терентьев В. Ю. Методика оценки пористости и компонентного состава песчано-алеврито-глинистых пород по промыслово-геофизическим данным // Нефтепромысловая геофизика (тр. БашНИПИнефть). – Уфа: – 1975. вып. 5. – С. 88–94.

3. *Афанасьев С. В.* Технология комплексной переинтерпретации данных геофизических исследований скважин при создании трехмерной геологической модели длительно разрабатываемой залежи // Нефтяное хозяйство. – 2005. – № 2. – С.12–17.

4. *Афанасьев В. С., Афанасьев С. В.* Методика автоматизированного восстановления свойств пород в терригенном разрезе по данным ГИС в системе Gintel (Методика ТАВС). – М.: ООО «Геоинформационные технологии и системы», 2008.

Рецензент – доктор геолого-минералогических наук В. П. Кальварская.

III. Морская и полярная геофизика III. Sea and polar geophysics

УДК 553.98:550.83

А. В. Буторин (ОАО «Нарьян-Марсейсморазведка», Санкт-Петербург, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНВЕРСИИ В СИРАЧОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЯХ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ТИМАНО-ПЕЧОРСКОЙ ПРОВИНЦИИ

A. V. Butorin (JSC «Nar'yan-Marseismorazvedka», Saint-Petersburg, Russia)

USING MODELING OF WAVE FIELDS FOR CONFIRMATION OF SEISMIC INVERSION RESULT ON EXAMPLE OF THE SIRATCHOYSKIY HORIZON IN THE NOTHERN PART OF TIMAN-PECHORA

Целью данного исследования являлось изучение коллекторских свойств сирачойских отложений северной части Тимано-Печорской провинции. Для этого был выбран метод синхронной инверсии, который позволяет получить кубы петрофизических параметров (таких как скорости продольных и поперечных волн и плотность) из сейсмических и каротажных данных.

Полученные кубы петрофизических параметров использовались для кроссплот-анализа. Наилучшее разделение облаков точек наблюдалось на кроссплоте «скорость продольной волны – коэффициент Пуассона», где была выделена зона предположительного улучшения коллекторских свойств. Для подтверждения выделенной зоны было произведено моделирование волновых полей с проведением дальнейшей синхронной инверсии.

На синтетических данных были выделены аналогичные области, что повысило достоверность интерпретации зоны улучшения коллекторских свойств по реальным данным.

Ключевые слова: динамический анализ, инверсия, моделирование волновых полей, Тимано-Печорская провинция.

Seismic inversion provide a calculation of cubes of petrophysical parameters using seismic and logging data, this allow to make quantitative interpretation of seismic data.

The aim of the research is definition of the sirachoyiski sediments collector's quality in the local structure, which situated in northern part of TPP. For this goal was chosen method of simultaneous pre-stack inversion, which based on using a low-frequency model and the Fatti's equation.

Consequently cubes of density and velocity were calculated and used for studying of collectors quality with crossplot analysis. On the crossplot (velocity of P-wave - Poisson ratio) four areas were highlighted, one of them is zone with high collector's quality. For verification of this result was provided elastic modeling with next dynamical processing. On the crossplot from synthetic data the same zones is observed. This fact confirms interpretation of real seismic data and shows that zone with high collectors quality is real and can be interesting for exproation.

Keywords: dynamic analysis, inversion, modeling of wave fields, Timan-Pechora basin.

Введение

Сейсмическая инверсия является одним из способов получения информации о петрофизических параметрах горных пород из сейсмических данных. Применение сейсмической инверсии позволяет уменьшить эффекты интерференции сейсмических волн и оценить акустические свойства среды с учетом скважинной информации. Использование результатов инверсии совместно с результатами кинематической интерпретации существенно повышает достоверность прогноза геологического строения. Условно можно разделить процедуры сейсмической инверсии на детерминистическую инверсию и геостатистическую. В свою очередь каждый из этих типов может использовать либо суммарный сейсмический разрез, либо сейсмограммы (синхронная инверсия).

Настоящая работа выполнена по материалам, полученным в северной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Целью исследования являлся прогноз зон улучшен-

ных коллекторских свойств пород сирачойского горизонта верхнедевонского отдела в пределах изучаемой площади, расположенной в Хорейверской впадине. Разрез представлен карбонатно-глинистыми отложениями, изучаемый сирачойский горизонт сложен преимущественно биогенными карбонатными породами, а выше и ниже по разрезу залегают глинистые горизонты (рис. 1, цв. вкл., стр. 138).

Используемый метод

Для решения поставленной задачи автором была выполнена синхронная инверсия. Этот вид инверсии использует угловые сейсмограммы для получения кубов (разрезов) упругих параметров из сейсмических амплитуд: акустический импеданс (I_p , I_s), скорость упругих волн (V_p , V_s), плотность (D). Математической основой данной операции является уравнение Аки-Ричардса в модификации Фатти для вычисления коэффициентов отражения, которое линеаризует уравнение Цепприца относительно угла падения волны. Инверсия проводится с учетом модели, которая задает соотношения между $\ln(I_p)$, $\ln(I_s)$ и $\ln(D)$ по каротажным данным и вносит низкочастотную компоненту в результат инверсии. После подстановки модельных данных и перегруппировки окончательное уравнение Фатти решается методом инверсии матрицы и найденные значения $\ln(I_p)$, $\ln(I_s)$ и $\ln(D)$ используются для получения окончательных петрофизических параметров. Таким образом, куб сейсмических амплитуд переводится в несколько кубов петрофизических параметров, которые в более явной форме несут информацию о породах и типе флюида в поровом пространстве*.

Полученные результаты

В результате упругой инверсии были получены кубы скоростей продольных и поперечных волн, а также куб плотности (рис. 2, цв. вкл., стр. 139). Полученные данные использовались для построения кросс-плотов – диаграмм, показывающих распределение значений параметров для конкретного интервала записи. Для изучения был выбран участок, соответствующий купольной части локального поднятия в интервале времен от отражающего горизонта III_d (доманиковский) до III_{src} (сирачойский) + 10 мс (см. рис. 2). В результате построения кросс-плотов было установлено, что наиболее контрастное разделение облаков точек происходит на кросс-плоте, отражающем зависимость скорости продольных волн от коэффициента Пуассона.

В ходе анализа выбранного кросс-плота было выделено четыре облака, с разными значениями скорости и коэффициента Пуассона, которые затем были показаны на разрезе. Анализ выделенных облаков позволил разделить изучаемую часть разреза на четыре области: глинистую покрывку с низкой скоростью и высокими значениями коэффициента Пуассона (зона 1); участок карбонатов с улучшенными коллекторскими свойствами (зона 2); карбонатные породы, слагающие основную часть сирачойского горизонта (которые на кросс-плоте можно разделить на две части – подошвенную (зона 3) и основную (зона 4), характеризующуюся большим коэффициентом Пуассона. Таким образом, при подобном выделении облаков-точек на кросс-плоте можно прогнозировать улучшение коллекторских свойств сирачойских отложений на изучаемой площади, чему соответствует зона 2 на кросс-плоте.

Ввиду неоднозначного разделения облаков, особенно на кросс-плотах по другим параметрам, нельзя утверждать, что выделенный перспективный участок действительно характеризуется улучшением коллекторских свойств. Поэтому для подтверждения полученных данных было выполнено моделирование сейсмограмм с последующим проведением упругой инверсии синтетических данных.

Для моделирования использовались структурные карты по целевым отражающим горизонтам (ОГ III_{src} и III_d), по которым была построена трехслойная модель геологической среды; петрофизические параметры для модельных пластов были оценены по кросс-плотам пет-

* Avseth P., Mukerji T., Mavko G., 2005. Quantitative seismic interpretation // Cambridge University Press.

рофизических параметров, полученным по сейсмическим данным. В купольной части задавалось изменение петрофизических параметров: увеличение скорости волн и плотности от кровли к подошвенной части (рис. 3, цв. вкл., стр. 139). После получения сейсмограмм путем полномасштабного моделирования выполнялась обработка и затем производилась упругая инверсия; таким образом, были получены те же кубы петрофизических параметров, что и на реальных сейсмических данных.

В результате анализа кроссплота «скорость продольной волны – коэффициент Пуассона» были выделены четыре облака точек, с теми же соотношениями параметров, что и на реальных данных. При использовании выделенных областей на разрезе произошло выделение купольной части (зона 2), по отношению к вмещающим глинам (зона 1) и карбонатам, при этом также произошло разделение карбонатного горизонта на основную (зона 4) и подошвенную части (зона 3) (рис. 4, цв. вкл., стр. 139).

Кроссплот по модельным данным характеризуется более широкими облаками точек. Такая разница, возможно, возникла вследствие того, что модельные горизонты в отличие от реальных горизонтов характеризуются изотропными параметрами. Для сравнения реальных и модельных данных были оценены средние значения параметров для каждой зоны и рассчитана разность между ними (таблица.). Таким образом, из приведенных данных видно, что несмотря на разную конфигурацию облаков точек, средние значения отличаются мало, и это позволяет говорить о схожести кроссплотов.

Таблица

Сравнение зон, выделенных по реальным и модельным данным

		PR	Vp	$avgPR$	$avgVp$	$ dPR $	$ dVp $
Зона 1	Re	0,226–0,255	4800–5700	0,24	5250	0,006	200
	M	0,220–0,273	5100–5800	0,246	5450		
Зона 2	Re	0,217–0,243	5620–6200	0,23	5900	0,01	0
	M	0,220–0,269	5600–6200	0,24	5900		
Зона 3	Re	0,171–0,218	5700–6680	0,19	6190	0,01	40
	M	0,178–0,230	5800–6500	0,20	6150		
Зона 4	Re	0,185–0,233	6000–7000	0,20	6500	0,06	100
	M	0,229–0,291	6200–6600	0,26	6400		

В таблице: Re – значения по сейсмическим данным; M – значения по модельным данным; PR – коэффициент Пуассона; Vp – скорость продольных волн; avg – среднее значение для зоны; $|dPR|$ и $|dVp|$ – абсолютные величины разности значений между сейсмическими и модельными данными.

На рис. 5 (цв. вкл., стр. 140) сопоставлены разрезы по реальным и синтетическим данным с выделенными по кроссплотам зонами. Из рисунка видно, что выделенные зоны занимают схожее положение и достаточно хорошо коррелируют между собой. Таким образом, модельные данные в достаточной мере совпадают с реальными, что подтверждает предположение об улучшении коллекторских свойств сирачойских пород в изучаемом купольном поднятии, и дает основание прогнозировать перспективы для поиска УВ в пределах этой структуры.

В заключение хотелось бы отметить, что в силу различных причин выделение перспективных зон по результатам инверсии не всегда является однозначным, и в сложных условиях (в частности малая изученность бурением) носит субъективный характер, поэтому использование моделирования для оценки результатов сейсмической инверсии представляется весьма эффективным.

Применение подобного подхода к интерпретации результатов инверсии на изучаемой площади позволило обосновать выделение на кроссплоте зоны, соответствующей породам с улучшенными коллекторскими свойствами.

Рецензент – кандидат физико-математических наук Ю. В. Рослов.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ AVO-АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО ОПОРНОМУ ПРОФИЛЮ 2-АР В КАРСКОМ МОРЕ

М. А. Буторина (FGUNPP “Sevmorgeo”, Saint-Petersburg, Russia)

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF THE AVO-ANALYSIS OF SEISMIC DATA ALONG THE PROFILE 2-AR IN THE KARA SEA

В последнее время получил развитие метод динамической обработки AVO-анализ (изучение изменения амплитуд с удалением), при помощи которого осуществляется расчет кубов и разрезов сейсмических атрибутов на основе использования данных до суммирования сейсмограмм. Изучение соотношений между полученными атрибутами обеспечивает возможность предсказания зон углеводородного насыщения. Изучены возможности и эффективность AVO-анализа вдоль профиля 2-АР в Карском море для интервала разреза нижнемелового возраста. Использован прием моделирования волновых полей для более достоверного выделения аномальных зон, связанных с зонами углеводородного насыщения, на кроссплотах (AVO-Пересечение – AVO-градиент).

Ключевые слова: AVO-анализ, моделирование волновых полей, Карское море.

AVO-analysis (amplitude variation with offset) is one of the most developing spheres of the dynamic processing of seismic data, and it provides a calculation of cubes and sections of seismic attributes with using pre-stack data. Studying of the relationships between this attributes gives the ability to predict zones of hydrocarbon saturation. The aim of this research is study of the availabilities and efficiency of AVO-analysis in the profile 2-AR in the Kara Sea for the lower cretaceous part of the section with using modelling of wave fields for more reliable separation of the anomaly zones on crossplot (AVO Intercept– AVO Gradient).

Keywords: AVO-analysis, modelling of wave fields, the Kara Sea.

Введение

На данном этапе развития технологий и процессов обработки получил признание метод динамической обработки сейсмических данных – AVO-анализ (Amplitude Variation With Offset) – изучение изменений амплитуд с удалением (расстоянием источник-приемник).

Важно заметить, что существовавшая ранее методика «яркого пятна» (интерпретации суммотрасс ОГТ) испытывала неудачи из-за неверной интерпретации амплитудных аномалий, связанных с резкой сменой литологии по разрезу, поэтому наряду с этой методикой стал развиваться более совершенный подход к прогнозированию УВ, основанный на изучении изменений амплитуд непосредственно по сейсмограммам – AVO-анализ. Применение данного метода позволяет разделить аномалии, в связи с чем использование результатов динамического анализа существенно повышает достоверность прогноза, как геологического строения разреза, так и наличия флюида в порках.

Эффективность данного метода в настоящей работе будет проиллюстрирована на базе сравнения результатов проведения анализа по модельному профилю и по профилю 2-АР в Карском море. Основное внимание при проведении анализа по реальным сейсмическим данным было обращено на интервал разреза альб-сеноманского (покурская свита, представленная неравномерно чередующимися глинами, алевролитами и песчаниками) и аптского (танопчинская свита нижнемелового отдела, сложенная преимущественно чередованием песчаников, алевролитов, аргиллитов и глин) возраста, ограниченного отражающими горизонтами G, M' и M.

Математической основой анализа являются уравнения Цеппритца, по которым вычисляются коэффициенты отражения, как функции угла падения. Но на практике применяются аппроксимации уравнений Цеппритца – приближения Аки и Ричардса (линеаризация уравнений по скоростным и плотностным параметрам при условии малости изменения этих параметров на отражающих границах) и трехчленная аппроксимация Шуэ (каждый член уравнения отражает роль определенного диапазона углов падения):

$$R_{pp}(i) \approx \underbrace{\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta V_p}{V_p} \right)}_A + \underbrace{\left[\frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta V_s}{V_s} \right) \right]}_B \sin^2 i + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} \frac{\sin^4 i}{1 - \sin^2 i}}_C, \text{ где}$$

первый член A (AVO Intercept) – приблизительно равен коэффициенту отражения продольной волны для нормального падения, полученному из уравнений Цеппритца; второй член B (AVO Gradient) – характеризует коэффициент отражения при промежуточных углах падения ($0^\circ < i < 30^\circ$), наиболее часто используемых в сейсмических наблюдениях; третий член C преобладает при углах, близких к критическим. Учитывая, что данные соотношения скоростей V_p/V_s связаны с коэффициентом B при $\sin^2 i$, а также то, что при принятых в сейморазведке для метода МОГТ реальных удалениях углы падения обычно не превышают 30° , данное уравнение можно представить в виде:

$$R_{pp}(i) = A + B \sin^2 i + \dots$$

Уравнение справедливо для малых углов падения и является линейным относительно $\sin^2 i^*$.

Важно отметить, что залежи УВ проявляют себя в сейсмическом волновом поле, главным образом, в изменении динамических параметров: интенсивности и формы отражений от границ залежи, но также и других атрибутов, являющихся производными от интенсивности и формы. Изменение скоростей V_p и V_s и плотности горных пород при замене воды в порах на нефть и газ приводит к изменениям коэффициента отражения, и это является причиной появления «ярких пятен» и AVO-аномалий (рис. 1, цв. вкл., стр. 140).

Для изучения изложенной выше проблемы автором была построена модель геологической среды – газонасыщенный песчаник в куполе антиклинального поднятия (рис. 2, цв. вкл., стр. 140). Построение модели и выбор упругих параметров слоев основывались на геологическом строении региона. При построении использовались отражающие горизонты (M, M', G) по фрагменту разреза 2-AP в районе месторождения Русановское, разрезы скоростей продольных волн и результаты исследования пластовых скоростей по данному участку. Скорость поперечных волн, плотность пород рассчитывались автоматически в программе моделирования из скоростей продольных волн по известным соотношениям: уравнение Кастаньи и уравнение Гарднера. Для построенной модели были рассчитаны синтетические сейсмограммы по системе наблюдений 2D – фланговой, близкой по параметрам наблюдения к применяемой системе в морских работах (расстояние между точками CDP=6,25 м, кратность наблюдений=106, максимальное расстояние ПВ-ПП=8000 м). Моделирование выполнялось в программном пакете полноволнового моделирования Tesserat 2D, основанного на базе прямого численного решения волнового уравнения методом конечных разностей. Для расчета модельных сейсмограмм использовался принцип акустического моделирования с одновременным подавлением поверхностной и кратных волн.

После предварительной обработки модельных данных с сохранением амплитуд они подвергались AVO-анализу в программном пакете Probe (Paradigm Geophysical). На базе вышеописанных математических основ и условно заданных четырех скважин (создавался пакет каротажных кривых: плотности, скорости P-волн, скорости S-волн, по которым рассчитывались зависимости V_p-V_s , $V_p-\rho$) были рассчитаны сейсмические атрибуты (A и B , а также *Fluid Factor*, P , *S-wave velocity reflectivity*).

Так как основным и самым распространенным способом AVO-анализа является построение и изучение зависимостей между A - и B -атрибутами – AVO-кроссплотинг, то и в данной работе был выбран этот тип кроссплота для выделения аномальных зон (рис. 3, цв. вкл., стр. 141).

В ходе анализа кроссплота по модельным данным были выделены три основные зоны, характеризующиеся различными значениями атрибутов A и B . Первая зона соответствует фоновым значениям (литологический тренд) и образует прямолинейную зависимость, про-

* Avseth P., Mukerji T., Mavko G., 2005 Quantitative seismic interpretation // Cambridge University Press.

ходящую через начало координат. Ее наклон указывает на соотношение скоростей V_p/V_s , следовательно, любое отклонение от фоновой линии указывает на наличие УВ или необычную литологию. При изучении отражений от кровли газовых песков был сделан вывод, что они проявляются в виде отдельных зависимостей, не проходящих через начало координат (ниже и слева от фоновой линии – вторая зона), что соответствует современным «законам» AVO-анализа. В результате анализа модельных данных была отработана методика его проведения, а также выявлены основные закономерности выделения зон, которые были в дальнейшем успешно применены при выполнении анализа по реальным данным, на которых не всегда удается выполнить однозначное выделение аномальных зон.

При AVO-анализе сейсмических данных по опорному профилю 2-AP в Карском море были использованы предварительно обработанные сейсмограммы (с сохранением амплитуд, после временной миграции до суммирования, см. рис. 1) в лаборатории обработки материалов МОВ аналитического геолого-геофизического отдела ФГУНПП «Севморгео». А для задания фоновых зависимостей при расчете атрибутов использовался стандартный набор каротажных кривых по скважине Русановская-2 (SONIC – акустический каротаж; CNL – пористость по нейтронному каротажу (%); CDL – плотностной каротаж).

При сравнении реальных и модельных данных достаточно четко наблюдается подобие кроссплотов, и даже, несмотря на не совсем отчетливое отделение зон друг от друга, их выделение возможно и оно практически идентично для модельных и реальных данных.

Анализ выделенных аномальных зон позволяет сделать вывод о том, что значительное количество точек, нанесенных на график $B(A)$ (кроссplot), хорошо укладывается в схему интерпретации, характерную для газовых песков 3-го класса (низкоимпедансные «пески», отрицательные значения атрибутов A и B для интересующего участка (по кровле)). Это согласуется с заданными параметрами для модельных данных и объясняет наличие «аномалии яркого пятна» для реальных данных в альб-сеноманской части разреза. Большая часть точек находится в пределах приблизительно эллиптических областей, характерных для фонового тренда (зона 1) и отражений от кровли и подошвы газового песка (зона 2, 3).

При анализе разреза с выделенными аномальными зонами кроссплота по реальным данным интересующая нас область в альб-сеноманской части разреза, соответствующая аномалии типа яркого пятна, выделенная в самом начале при визуальном анализе временного разреза, однозначно подтверждается (рис. 4, цв. вкл., стр. 141). А в аптской части разреза интересующая нас область, выделенная по аномальному поведению амплитуд с удалением по сейсмограммам, также является своеобразной аномальной областью. Так на фоне интенсивных фаз всей пачки между горизонтами M и M' она представляет собой тусклое пятно на временном разрезе; аналогичная ситуация возникает и на разрезе с выделенными на кросс-плоте зонами.

Заключение

Следует отметить, что в силу различных причин выделение перспективных зон по результатам AVO-анализа не всегда является однозначным, и в сложных условиях носит субъективный характер, поэтому использование моделирования для оценки результатов интерпретации кроссплотов является весьма эффективным. Применение AVO-анализа и его эффективность зависит от многих факторов, в том числе от уровня обработки первичных материалов, наличия скважинной информации для задания фоновых зависимостей, от опыта оператора и многого другого. Тем не менее, использование AVO-анализа в комплексе с моделированием волновых полей повышает во много раз достоверность результатов интерпретации данных.

Применение подобного подхода на изучаемом объекте позволило обосновать выделение на кросс-плоте аномальных зон, предположительно связанных с наличием газонасыщенных пород.

Рецензент – доктор геолого-минералогических наук М. Л. Верба.

УДК 550.834

В. В. Половков (ФГУНПП «Севморгео», Санкт-Петербург, Россия)

СТРУКТУРА ЧЕЛЮСКИНСКАЯ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ НА НЕФТЬ И ГАЗ ОБЪЕКТ В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ

V. V. Polovkov (State Company “Sevmorgeo”, Saint-Petersburg, Russia)

CHELYUSKINSKAYA STRUCTURE – PROMISING ON OIL AND GAS OBJECT IN THE EAST SIBERIAN SEA

В рамках изучения возможности совместного использования отраженных и преломленных сейсмических волн при построении скоростной модели среды вдоль опорного профиля 5-АР (Восточно-Сибирское море) автором была выделена сильная низкоскоростная аномалия, расположенная в верхней части Северо-Чукотского прогиба (прогиба Вилькицкого). Данная аномалия совпадает со структурой антиклинального типа и, предположительно, связана с наличием углеводородов. С целью подтверждения данного предположения был выполнен расчет АВО-атрибутов и построены сейсмические разрезы угловых сумм.

Совокупность полученных данных однозначно доказывает наличие углеводородов, приуроченных к структуре антиклинального типа. Структуре дано название – Челюскинская.

Ключевые слова: Восточно-Сибирское море, прогиб Вилькицкого, Северо-Чукотский прогиб, углеводороды, залежь, сейсморазведка, структура Челюскинская.

As part of research the possibility of joint use of reflected and refracted seismic waves in the construction of the velocity model along the 5-AR profile (East Siberian Sea), the author has highlighted the strong low-velocity anomaly in the upper part of the North Chukchi basin (basin Vilkitsky). This anomaly coincides with the anticline structure, and, possible this anomaly due to the hydrocarbons. In order to confirm this assumption AVO - seismic attributes were calculated and angle seismic stacks were constructed.

The obtained data clearly shows the presence of hydrocarbons, confined to anticline structure. Structure was named the Chelyuskinskaya structure

Keywords: East Siberian Sea, Vilkitsky basin, North Chukchi basin, hydrocarbons, seismic prospecting, reservoir, Chelyuskinskaya structure.

Введение

Восточно-Сибирское море является наименее изученной частью Российской Федерации. Вместе с тем в соседних морях Бофорта и Чукотском выявлено большое число нефтегазовых месторождений, что позволяет говорить о высокой перспективности отечественной акватории на нефть и газ. При этом, на сегодняшний день в научной литературе практически нет сведений о выявлении конкретных скоплений углеводородов в акватории Восточно-Сибирского моря.

С целью восполнить пробелы в изученности данного региона ФГУНПП «Севморгео» в 2009 году были выполнены комплексные геофизические работы вдоль опорного профиля 5-АР по выявлению залежей углеводородов на основе анализа полученных по нему сейсмических материалов, чему и посвящена данная статья.

Выделение низкоскоростного объекта

Автором в рамках исследования возможности построения глубинно-скоростной модели среды с целью миграции сейсмических данных был построен сейсмический разрез по способу общей глубинной площадки [1] вдоль профиля 5-АР с использованием только преломленных волн, выходящих в первые вступления. Для этой цели на сейсмограммах МОВ-ОСТ была удалена вся сейсмическая запись, кроме первых вступлений. Затем осуществлялась редукция сейсмограмм со скоростями в диапазоне от 1500 м/с до 6500 м/с с шагом 100 м/с. Редуцированные сейсмограммы суммировались по способу общей глубинной точки [2]. Итоговый разрез формировался из наиболее четких преломленных горизонтов.

На основе сравнительного анализа двух сейсмических разрезов по профилю 5-АР, построенных по данным отраженных и преломленных волн, удалось выделить небольшую об-

ласть в Северо-Чукотском прогибе (прогибе Вилькицкого), проявляющуюся на разрезе преломленных волн в виде синклинали, которая не наблюдается на разрезе отраженных волн. Разные геометрические свойства одной и той же геологической границы объясняются наличием низкоскоростной аномалии, вытянутой по латерали, на которую по-разному реагируют отраженные и преломленные волны. Причина этого заключается в том, что при обработке отраженных волн в верхней части разреза в качестве полезной информации использовались данные, зарегистрированные на небольших удалениях (до 1,5 км). Угол падения волн в данном случае не превышает 50°. Такие волны проходят скоростную аномалию субвертикально. Поскольку верхняя часть Северо-Чукотского прогиба вдоль профиля 5-AP является градиентной средой, то в первые вступления выходят рефрагированные волны. Часть этих волн практически скользит вдоль аномалии, следовательно, они проходят больший путь вдоль низкоскоростных пород и являются более, чем отраженные волны, чувствительными к скоростным неоднородностям.

Для подтверждения наличия низкоскоростной области в верхней части Северо-Чукотского прогиба была выполнена корреляция наиболее выраженных сейсмических горизонтов по разрезу МОВ-ОСТ и вдоль каждого горизонта рассчитаны горизонтальные спектры скоростей суммирования, которые однозначно показали сильное их уменьшение в исследуемой области (на 10–15%) относительно соседних пород (рис. 1, в, цв. вкл., стр. 142). Следует отметить, что предварительный скоростной анализ, выполненный по вертикальным скоростным спектрам, не позволил выделить скоростную аномалию (рис. 1, а, цв. вкл., стр. 142), так как на основе анализа вертикальных спектров достаточно трудно определить, с чем связано понижение скорости – с наличием кратных волн, либо с реальным понижением скорости. Локальное понижение скоростей прохождения сейсмических волн может быть связано с резким увеличением трещиноватости пород в данной области, либо с заполнением части порово-трещинного пространства углеводородами. Поскольку на других участках развития дизъюнктивных нарушений подобных скоростных аномалий не наблюдается, то второй из названных факторов выступает в качестве главной причины появления в волновой картине аномалии в виде синклинали.

Низкоскоростная аномалия находится в молодых терригенных породах кайнозоя, которые характеризуются низкими значениями скоростей прохождения сейсмических волн (от 1600 м/с до 2500 м/с). Такое соотношение возраста, типа и скоростных свойств горных пород наиболее благоприятно для проведения AVO-анализа [3], позволяющего однозначно проверить аномальную область на содержание углеводородов.

AVO-анализ

Так как для проведения AVO-анализа необходимым условием является наличие сейсмограмм после обработки с сохранением амплитуд, то материалы МОВ-ОСТ вдоль профиля 5-AP были обработаны по максимально упрощенному графу [4], минимально искажающему амплитуды сейсмической записи. В результате обработки с сохранением амплитуд на сейсмическом разрезе МОВ-ОГТ выделена отчетливая аномалия типа «яркого пятна», совпадающая с зоной пониженной скорости сейсмических волн.

Классические яркие пятна на сейсмических разрезах, приуроченные к терригенным породам, могут быть обусловлены наличием так называемых низкоимпедансных песков класса 3 [3], которые представляют собой слабо уплотненный неконсолидированный газовый песок с более низкой акустической жесткостью, чем перекрывающая среда. Для проверки классических «ярких пятен» (класс 3 песков) используются разрезы «AVO-произведения» [3], представляющие собой произведение соответствующих значений AVO-пересечения и AVO-градиента [3]. Так как амплитуда отражения от границы покрывка/песок в данном случае отрицательна и увеличивается с ростом угла отражения, то на разрезах AVO-пересечения и AVO-градиента граница покрывка/газовый песок будет проявляться в виде отрицательных значений, а их произведение будет большой положительной величиной [3]. Разрез «AVO-произведения» в области исследуемой аномалии, построенный в программном

пакете “Probe” (Paradigm), подтвердил наличие углеводородов. Следует отметить, что при расчете зависимости скорости прохождения поперечных волн от скорости прохождения продольных волн использовалась аргиллито-глинистая линия [3], а при оценке плотности горных пород применялось соотношение Гарднера [3]. Расчет других AVO-характеристик (произведения константы Ламэ на плотность пород (рис. 1, *з*, цв. вкл., стр. 142), характеризующего возможность сжатия вещества и однозначно отделяющего водонасыщенные породы от газонасыщенных [3] и угловых сумм (рис. 1, *б*, цв. вкл., стр. 142), также позволил подтвердить наличие газовой залежи в исследуемой области.

Геологическое обоснование выделенной залежи

С геологической точки зрения данную залежь следует отнести к залежи сводового типа. Она приурочена к пологой куполовидной структурной форме с наклоном крыльев не более 1–2°. Амплитуда поднятия данной структуры в сечении его профилем составляет от 100 м (в нижней части складки) до 25 м (в верхней части складки). Размах крыльев складки достигает 12 км (в нижней части структуры). Породы, насыщенные углеводородом, приурочены к толще, представленной субаквальными терригенными отложениями, которые отличаются от всего нижележащего разреза выдержанностью шельфовых сейсмофаций по латерали и расчлененностью в вертикальном направлении. Породой-коллектором в данном случае является песчаник, а покрышкой – глинистые отложения. Залежь образовалась преимущественно за счет вертикальной миграции флюидов по разломам. Поскольку профиль вряд ли пересек складку ровно по своду, то можно с уверенностью предположить, что истинный размер структурной формы больше приведенных значений. Конечно, по одному профилю нельзя однозначно утверждать, что это обособленная куполовидная структура, однако можно сказать, что выделенная область представляет явный интерес, так как верхняя отражающая граница, обусловленная контактом покрывка/газовый песок, находится на глубине всего 640 м и протяженность этой границы составляет 6 км. Мощность всей толщи, перспективной на углеводороды, составляет примерно 1100 км. Данной структуре дано название – структура Челюскинская [4].

Заключение

Таким образом, в акватории Восточно-Сибирского моря выделен перспективный на нефть и газ объект, расположенный в верхней части Северо-Чукотского прогиба. Залежь сводового типа связана с пологой куполовидной структурной формой при наклоне крыльев не более 1–2°. Максимальная амплитуда поднятия данной структуры в сечении его профилем составляет 100 м (в нижней части складки). Максимальный размах крыльев складки достигает 12 км. Коллекторами являются слаболитифицированные песчаники, покрывкой – глинистые породы. Миграция флюидов происходит по субвертикальным разломам из пород нижележащих толщ. Верхний продуктивный горизонт располагается на глубине 640 м. Выделенный объект назван – структура Челюскинская.

Автор работы выражает искреннюю благодарность за помощь в интерпретации данных доктору геолого-минералогических наук Марку Леонидовичу Вербе и кандидату физико-математических наук Тамаре Сергеевне Сакулиной.

Список литературы

1. *Телегин А. Н.* Сейсморазведка методом преломленных волн. СПб.: СПбГУ, 2004. – 187 с.
2. *Боганик Г. Н., Гурвич И. И.* Сейсморазведка. – Тверь: АИС, 2006. – 743 с.
3. *Воскресенский Ю. Н.* Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов. – М.: РГУ нефти и газа, 2006. – 68 с.
4. *Половков В. В.* Выявление залежи углеводородов в Восточно-Сибирском море с помощью совместного использования отраженных и преломленных сейсмических волн// Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2011. – Т.6. – №4. – <http://www.ngtp.ru/rub/5/392011.pdf>.

Рецензент – доктор геолого-минералогических наук С. В. Аплонов.

IV. Инженерная и скважинная геофизика, геофизика в гидрогеологии и геоэкологии
IV. Engineering and hole geophysics, geophysics in hydrogeology and geocology

УДК 550.832.7, 532.546

М. Н. Глущенко, А. Ю. Соболев (ИНГГ СО РАН, Новосибирск, Россия)

СОВМЕСТНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КАРОТАЖНЫХ ДАННЫХ ВИКИЗ И БКЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

M. N. Glushchenko, A. Yu. Sobolev (IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russia)

JOINT INTERPRETATION OF VIKIZ AND RLL LOGGING DATA USING FILTRATION MODELING

Опробована новая схема совместной интерпретации данных ВИКИЗ и БКЗ с использованием средств прямого фильтрационного моделирования. Для ряда коллекторов, которые по данным предварительного геофизического заключения являются водонасыщенными, получены геоэлектрические модели, характерные для слабонефтенасыщенных пластов.

Ключевые слова: фильтрационное моделирование, определение нефтенасыщенности, ВИКИЗ.

The new approach of logging diagrams interpretation has been tested. It combines joint inversion of high frequency induction isoparametric logging sounding (VIKIZ) and lateral logging sounding (LLS) data and filtration modeling of penetration process. For series of collectors considered as water-saturated according to preliminary conclusion of petroleum geophysical research, new geoelectric models typical for a weakly oil-saturated reservoir were received.

Keywords: filtration modeling, oil saturation determination, VIKIZ.

При стандартной обработке и интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС) практически не учитываются процессы, происходящие во время бурения скважины (циркуляция бурового раствора, гидростатическое воздействие на пласт, рост глинистой корки, соле- и массоперенос), которые оказывают значительное влияние на электрофизические характеристики зоны проникновения.

При традиционной отдельной инверсии данных высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ) и бокового каротажного зондирования (БКЗ) возникают наборы эквивалентных моделей, удовлетворяющих одним и тем же экспериментальным данным, потому что каждый из методов имеет свои преимущества и ограничения [1]. Эта неоднозначность частично преодолевается, если строить общий функционал для комплекса зондов (ВИКИЗ, БКЗ) [2]. Совместная инверсия данных ВИКИЗ и БКЗ позволяет уменьшить область эквивалентных моделей, уточнить параметры среды, и, особенно, зоны проникновения. На основе совместной одномерной инверсии ВИКИЗ и БКЗ в каждом прослое на выбранном интервале построены профили удельного электрического сопротивления, которые уточнялись с помощью расчетов по алгоритмам двумерного моделирования показаний ВИКИЗ и БКЗ. Было выполнено уточнение геоэлектрической модели продуктивных пластов с учетом влияния вмещающих пород [3].

Однако при построении решения обратной задачи – определении удельного электрического сопротивления ($UЭС$) прискважинной зоны на основе комплексирования инверсии данных электромагнитного и электрического каротажа можно еще уменьшить область эквивалентных моделей, применив фильтрационное моделирование.

Традиционная обработка данных ГИС заключается в обработке и инверсии данных ВИКИЗ и БКЗ. Для этого задаются параметры модели, по которым рассчитывается прямая задача для этих методов. Точность подобранной модели проверяется сравнением синтетических диаграмм БКЗ и ВИКИЗ, рассчитанных по модели среды, с диаграммами, зарегистрированными на скважине (рис. 1, а, цв. вкл., стр. 143).

Предложена новая схема решения обратной задачи, где подбираются петрофизические параметры. В качестве стартовой модели они задаются вместе с дополнительными параметрами бурения и свойств пластовых флюидов. Параметры условий, при которых происходит проникновение (превышение давления в скважине над пластовым, время воздействия скважины на пласт, параметры глинистой корки), задаются одинаковыми для всех прослоев продуктивного интервала. По результатам фильтрационного моделирования получают распределения солености и водонасыщенности. Далее по формуле Арчи рассчитывается плавное распределение УЭС. После чего для этой модели сопротивлений вычисляются сигналы приборов ВИКИЗ и БКЗ и сравниваются кривые зондирования. Минимизация целевой функции происходит за счет подбора петрофизических параметров (рис. 1, б, цв. вкл., стр. 143). Результатом является распределение фильтрационно-емкостных свойств (значений коэффициентов пористости – K_p ; абсолютной проницаемости – $K_{пр}$; нефтенасыщенности – K_n) прослоев коллектора. Полученные результаты сравнивались со стандартным заключением по комплексу ГИС.

Чтобы оценить правильность подобранной геоэлектрической модели, сравнивались два результата – геоэлектрическая модель и плавное распределение УЭС (рис. 2, цв. вкл., стр. 143). В результате применения этого алгоритма из множества эквивалентных геоэлектрических моделей выбираются только те, которые не противоречат фильтрационным условиям формирования зоны проникновения, и удается сузить область неопределенности решения.

Такой путь исследования позволяет более детально изучить зону проникновения. Стандартные подходы к интерпретации данных электрического и электромагнитного каротажа обычно ограничиваются выделением зоны проникновения, электрическое сопротивление которой – константа. Согласно моделированию гидродинамических процессов фильтрации профиль УЭС в зоне проникновения имеет сложный характер, особенно в случае содержания в пласте двух разных флюидов – воды и нефти [4]. Это позволяет построить физически более обоснованные модели электропроводности прискважинной зоны и точнее определить их параметры, что в свою очередь отражается на точности оценок параметров пласта.

Основные результаты

По данным предварительного заключения промыслово-геофизических исследований представленный прослой (рис. 3, цв. вкл., стр. 144) является водонасыщенным. Пример сопоставления геоэлектрической модели одного прослоя на выбранном интервале, полученной в ходе совместной инверсии данных ВИКИЗ и БКЗ, с профилем удельного электрического сопротивления, полученного на основе численного расчета процессов фильтрации буровой жидкости, представлен на рис. 2.

В полученной геоэлектрической модели наблюдается повышение УЭС с удалением от скважины вглубь пласта, что при подборе фильтрационной модели указывает на слабое нефтенасыщение.

Коллектор АС 5–6 на этом месторождении обладает хорошими коллекторскими свойствами с пористостью 17–25 и проницаемостью до 350 мД. Однако заключение о нефтенасыщенности по данным электрометрии сделать трудно. В ряде случаев пласт оказывается продуктивным при сопротивлении всего 5 Ом·м. С помощью предложенного алгоритма оценена абсолютная проницаемость прослоев, при этом оценки пористости совпадают со стандартным заключением с точностью 10%. Для большинства прослоев на выбранном интервале, которые по данным геофизического заключения являются водонасыщенными, получены геоэлектрические модели, характерные для слабонефтенасыщенных пластов. Такие модели

соответствуют пластам, содержащим подвижную нефть $K_n = 20\text{--}30\%$, что подтверждено гидродинамическими расчетами процессов фильтрации (рис. 4, цв. вкл., стр. 144).

Список литературы

1. *Игнатов В. С., Малеева Л. В.* . Совместная интерпретация данных БКЗ и ВИКИЗ // Каротажник. – 2008. – Вып. 168. – С. 42–50.

2. *Эпов М. И., Каюров К. Н., Ельцов И. Н. и др.* Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СЛК и программно-методические средства интерпретации EMF-Pro // Бурение и нефть. – 2010 г. – № 2. – С. 12–16.

3. *Эпов М. И., Глинских В. Н.* Быстрое двумерное моделирование высокочастотного электромагнитного поля для задач каротажа // Геология и геофизика. – 2003. – № 9: Т. 44. – С. 942–952.

4. *Ельцов И. Н., Кашеваров А. А., Эпов М. И.* Обобщение формулы Арчи и типы радиального распределения УЭС в прискважинной зоне // Геофизический вестник. – 2004. – № 7. – С. 9–14.

Рецензент – доктор геолого-минералогических наук О. Ф. Путиков.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГРУНТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНЫ РЭЛЕЯ*A. I. Konkov, S. A. Manakov (IAP RAS, Nizhny Novgorod, Russia)***THE SOIL PARAMETERS EVALUATION BASED ON RAYLEIGH WAVE ANALYSIS**

В работе показана возможность совместного использования портативного вертикального вибратора и цифровой сейсмостанции для определения физико-механических свойств грунтов в естественных условиях (модуля упругости Юнга, коэффициента Пуассона, параметров затухания). По экспериментальным данным были построены картины общего отклика, полученные с вертикальных и горизонтальных датчиков сейсморазведочной станции «Лакколит X-M2». Векторный прием обеспечил дополнительный критерий для верификации типов волн. В целях определения динамических характеристик было произведено сопоставление экспериментальных и теоретических откликов среды в виде волны Рэлея; решалась задача по определению параметров среды при минимизации отклонения между измеренным и вычисленным откликом. Это позволило оценить переменную силу, приложенную к грунту, и сравнить полученную величину с прямыми измерениями, а также оценить скорость и затухание волны Рэлея. Было осуществлено сравнение размерных величин, параметры определены по всей трассе. При этом отмечено не только качественное, но и количественное согласие эксперимента с теорией. Таким образом, была произведена верификация модели и получено прямое подтверждение природы медленного волнового процесса.

Ключевые слова: волна Рэлея, инженерная сейсморазведка, инверсия параметров.

It was shown the possibility of joint use of portable vertical vibrator and digital seismic station for the determination of physical-mechanical soil properties under natural conditions (such as Young's modulus, Poisson's ratio, attenuation parameters). The whole response pattern was retrieved using the data received from vertical and horizontal geophones of seismic station «Lakkolit X-M2». Vector method provided the additional possibility of the different wave types verification. For the dynamic characteristics determination the comparison of experimental and theoretical responses of the medium (in the form of Rayleigh wave) was performed. In that way the problem of medium's parameters determination has been solved by minimizing the deviation between measured and calculated responses. That allowed us to evaluate the Rayleigh wave velocity and its attenuation along with unstable force applied to the soil and to compare the received value with direct observations. The comparison of dimensional quantities was conducted. Parameters were determined for the whole track. Authors would like to mention a good agreement between theory and experiments. Thereby, the model verification was performed and the direct evidence of the nature of the slow wave process was obtained.

Keywords: Rayleigh wave, engineering seismic survey, parameters inversion.

На сегодняшний день профилирование приповерхностных слоев почвы представляет большой интерес для задач инженерной сейсморазведки, т.к. основное воздействие различных геологических процессов на человеческую деятельность происходит на небольших глубинах. Примером может служить насыщение грунта жидкостью, неустойчивость склонов и т.п. Большое количество измеряемых параметров среды позволяет с большей достоверностью определять литологию слоев. Допустим, мы имеем возможность проводить точную реконструкцию параметров, включая плотность, затухание. Предположим также, что мы знаем, как влияет насыщение жидкостью на параметры исследуемой среды. Это, наряду с увеличивающейся разрешающей способностью, позволяет более точно прогнозировать поведение грунта как во времени, так и при наличии сильных возмущающих факторов. Таким образом, возможность разрешения слабых литологических различий (слабый контраст границ) позволяет, например, экономить время и средства на подготовку строительных площадок [1].

Данная работа показывает возможности совместного использования портативного вертикального вибратора и сейсморазведочной станции для решения задачи профилирования приповерхностных слоев почвы.

Экспериментальные данные были получены в июне 2009 г. на полигоне Института прикладной физики (ИПФ) РАН «Безводное» Кстовского района Нижегородской области. Для возбуждения сейсмических волн использовался наземный широкополосный излучатель электродинамического типа, который был сконструирован и собран в ИПФ (рис. 1, цв. вкл., стр. 145). На излучатель подавался сигнал, представлявший собой короткий импульс (длительностью 1,5 периода) несущей частоты 125 Гц с окном Хеннинга. Прием сигналов осуществлялся при помощи цифровой многоканальной сейсморазведочной станции «Лакколит X-M2». Приёмные геофоны (попарно: вертикальный и горизонтальный) располагались в линию с шагом 1 м (рис. 2, цв. вкл., стр. 145). Общая длина трассы составляла 23 м. Для увеличения соотношения сигнал/шум производилось когерентное накопление записей нескольких откликов среды и цифровая фильтрация в полосе зондирующих сигналов от 70 до 350 Гц. Для одного положения приёмных геофонов была проведена серия измерений с разным положением излучателя (см. рис. 2).

Полный отклик (рис. 3), который представляет собой объединение сейсмограмм для всех положений излучателя, включает приходы отраженных, преломленных волн и волны Рэлея. Векторный прием обеспечивает определение типов волн по анализу направления вектора смещения относительно волнового вектора. Расшифровка всей волновой картины была начата с анализа волны Рэлея, которой отвечала самая низкая скорость распространения и для которой имело место запаздывание между проекциями скорости смещения поверхности на $\pi/2$. Для уточнения кинематических характеристик (времен прихода) волн импульсные отклики вычислялись с учетом определенных ранее параметров вибратора.

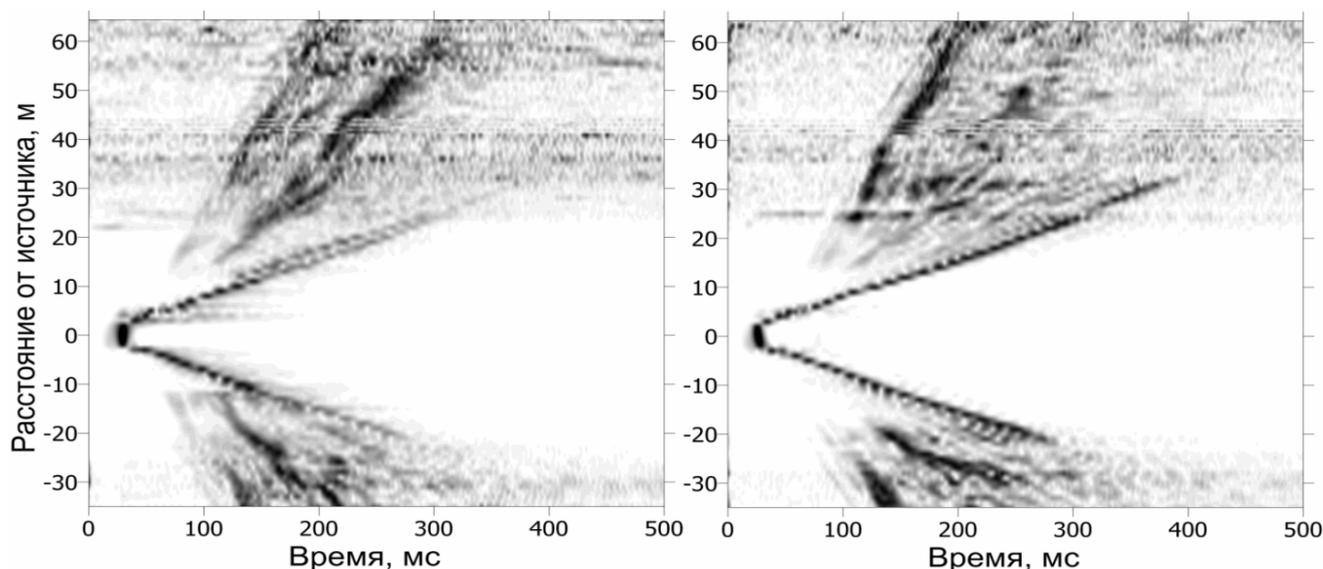


Рис. 3. Сейсмограммы общего отклика, полученные с вертикальных (слева) и горизонтальных (справа) датчиков

Измеренные смещения были сопоставлены с теоретическим расчетом, что позволило:

- оценить переменную силу, приложенную к грунту, и сравнить полученную величину с прямыми измерениями;
- оценить скорость и затухание волны Рэлея;
- сделать выводы об однородности исследуемой среды.

Таким образом, была произведена верификация модели и получено прямое подтверждение природы медленного волнового процесса.

Теоретический расчет был произведен по формулам работы [2] для продольных и поперечных проекций смещений волны Рэлея (которой соответствовал вклад полюсов в соответствующие выражения для скалярного и векторного потенциала). При этом вибратор трактовался как силовой источник с давлением, равномерно распределенным по круговой пло-

щадке. Минимальному отклонению между измеренными и вычисленными откликами отвечает амплитуда силы 340 Н (значение отвечает данным прямых наблюдений) и коэффициент потерь 0,09 (значение согласуется с измеренным ранее [3]). Полученное соотношение вертикальной и горизонтальной проекции смещения $U_z/U_r \approx 1,33$ отвечает коэффициенту Пуассона $0,06 \pm 0,01$, что согласуется с теоретической оценкой в рамках модели Герца-Миндлина для гранулированных сред в отсутствие цементирования зерен [4]. В итоге, была произведена оценка скорости волны Рэлея; полученное значение $V_R \approx 90 \pm 5$ м/с согласуется с полученными ранее данными [3].

Согласие откликов волны Рэлея для ближайших к излучателю геофонов вполне удовлетворительное, а дальше начинают сказываться приходы других волн (главным образом, Р-волны), влияние неоднородности, различные диссипативные эффекты, дисперсия и т.п. Согласие откликов по горизонтальной проекции сохраняется на большие расстояния, чем по вертикальной проекции (рис. 4). Это, по-видимому, объясняется тем, что глубина проникновения вертикальной компоненты больше, и она испытывает большее рассеяние.

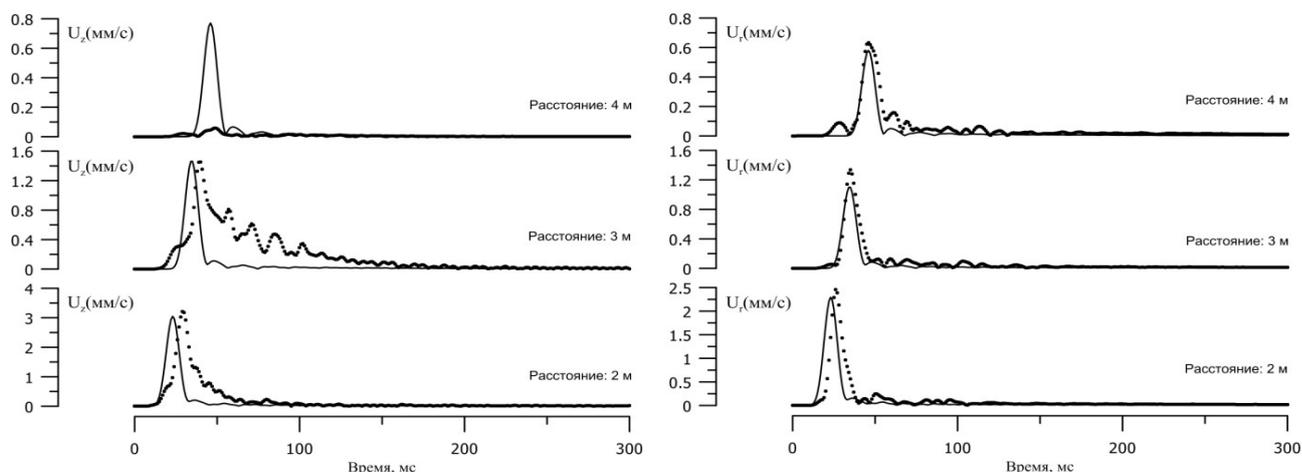


Рис. 4. Огибающие откликов:

сплошная линия соответствует теоретическому расчету; пунктирная – экспериментальным данным

Также дополнительно было получено подтверждение «зеркальной» однородности трассы, т.е. для источника, расположенного и слева и справа от сейсмокося, зависимость скорости Р-волны от расстояния выглядит одинаково с точностью до погрешности измерений (рис. 5). Структуру поля на ближайших к излучателю датчиках авторы связывают с нелинейностью.

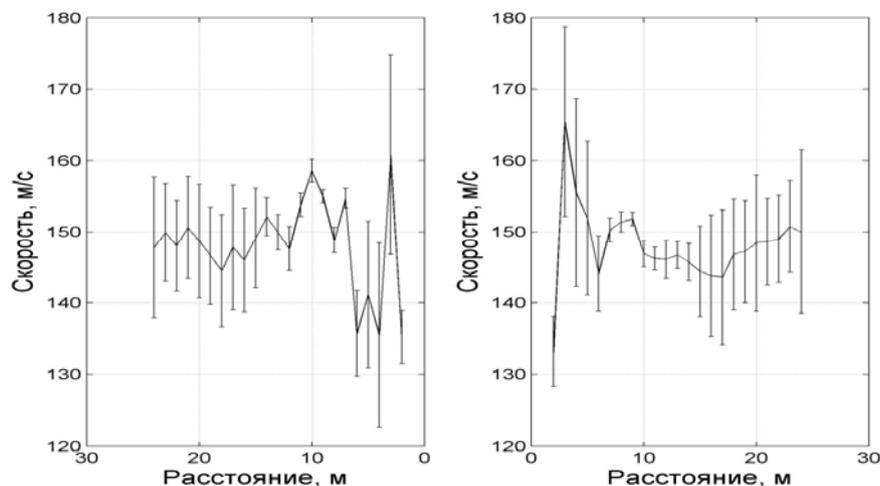


Рис. 5. Зависимость вычисленной продольной скорости волны от расстояния слева и справа от источника соответственно

Для проверки данной гипотезы были использованы данные для сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигналов) и построены скользящие спектры (рис. 6, цв. вкл., стр. 145). Как оказалось, на ближайших датчиках (при расстоянии 2 м от вибратора) отчетливо видны вторая и третья гармоники, в то время как на удалении в 9 м они уже не наблюдаются. В области возбуждения деформация достигает значения порядка 10^{-5} (значение соответствующего акустического числа Маха), а вне этой области – 10^{-7} . Из литературы известно, что структурно-неоднородные природные среды имеют выраженные нелинейные акустические свойства, начиная с уровня деформаций порядка 10^{-6} [5, 6].

Проведенное количественное сопоставление откликов волны Рэлея указывает на возможность использования не только кинематических характеристик (скорости), но и динамических (амплитуды), что позволяет, к примеру, провести анализ зависимости коэффициентов отражения от угла падения волн (выражения, аналогичные формулам Френеля) для отраженных и преломленных волн.

Таким образом, нами было показано, что использование портативного вертикального вибратора в комплекте с цифровой сейсмостанцией может быть эффективно для определения физико-механических свойств грунтов в естественных условиях (модуля упругости Юнга, коэффициента Пуассона, параметров затухания). Было произведено сравнение размерных величин, параметры определены по всей трассе. Авторы хотели бы отметить хорошее не только качественное, но и количественное согласие эксперимента с теорией.

В настоящее время в ИПФ РАН активно ведутся работы по дальнейшей расшивке волновой картины с использованием всей информации отклика, т.е. решается задача определения параметров слоистой среды по минимизации отклонения между полными измеренными и вычисленными откликами, включающими вклад отраженных и преломленных волн, аналогично тому, что было сделано для волны Рэлея. Таким образом, решается динамическая задача инверсии параметров.

Авторы выражают благодарность своему научному руководителю, д-ру ф.-м.н. А. В. Лебедеву за помощь. Работа частично поддержана грантами РФФИ № 11-05-00774, 11-02-01419 и программой фундаментальных научных исследований ОФН РАН «Когерентные акустические поля и сигналы».

Список литературы

1. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии – М.: изд-во МГУ, 1981. – С. 91–94.
2. Miller G. F., Pursey H. The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of a semi-infinite isotropic solid – London: Proceedings of the Royal Society, 1954. – 538 p.
3. Авербах В. С., Лебедев А. В., Марышев А. П., Таланов В. И. Диагностика акустических свойств неконсолидированных сред в натуральных условиях // Акустический журнал. – 2008. – Т. 54, №4. – С. 526–537.
4. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media // Cambridge University Press. – 2005. – P. 149–151.
5. Guyer R. A., Johnson P. A. Nonlinear mesoscopic elasticity: the complex behaviour of rocks and soil // Weinheim: Wiley-VCH. – 2009. – 6 p.
6. Ostrovsky L. A., Johnson P. A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. // Rivista del nuovo cimento. – 2001. – V. 24, N 7. – 5 p.

Рецензент – доктор физико-математических наук Ю. П. Лукашин.

УДК 550.827.76, 556.545, 556.114.5

Д. И. Петлеваний (СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия)

Е. Ю. Киселев (Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург, Россия)

ГЕОРАДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ ГАЛОКЛИНА

D. I. Petlevany (SPbSU, Saint-Petersburg, Russia)

E. Yu. Kiselev (Institute of limnology RAS, Saint-Petersburg, Russia)

GPR MONITORING OF HALOCLINE

Исследованы процессы, происходящие на границе (галоклине) между пресной и соленой водой в устьевых областях, что является важной задачей океанологии. Одним из наиболее эффективных инструментов, позволяющих увидеть галоклин, является метод георадиолокации. В результате георадарных исследований в устьевой области реки Кереть (Лоухский район, Карелия) было выявлено наличие внутренних волн. Использование двух георадаров, работающих синхронно, позволило получить представление о динамике колебательных процессов, протекающих в толще воды. Приводится спектральный анализ колебательных процессов на границе галоклина.

Ключевые слова: георадиолокация, георадар, устьевая область, галоклин, внутренние волны.

Investigation of the processes occurring at the boundary between fresh and salt water (halocline), observed in estuarine areas is an important task of Oceanology. Ground Penetrating Radar (GPR) is one the most effective tools which allows to see the halocline. As a result of GPR researches in the mouth of the river Keret (Louhi region, Karelia republic) the presence of internal waves were detected. Thanks to the use of two GPR operating simultaneously, idea of the dynamics oscillatory processes occurring in the midwaters was obtained. Spectral analysis of oscillatory processes occurring at the boundary of the halocline is presented.

Keywords: GPR, ground penetrating radar, estuarine area, halocline, internal waves.

Введение

В устьевых областях рек, впадающих в море, распространение пресной речной воды происходит в поверхностном слое на значительные расстояния. Постоянный приток пресной воды в море влияет на формирование своеобразия гидрологического, солевого, гидротермического, гидробиологического режимов в прибрежной зоне морей. Изучение динамики процесса взаимодействия морских и речных вод, выявление их границы (галоклина) является одной из важных научных задач при исследовании устьевых областей.

Существенную помощь в решении этой задачи могут оказать современные геофизические методы, в частности, метод подповерхностной радиолокации или георадиолокации. Метод основан на изучении отражения коротких электромагнитных импульсов, посылаемых в нижнее полупространство от границ внутри геологической среды, разделяющих области с разными электрическими свойствами. Поскольку морская и речная вода обладают резко отличающимися электропроводностями, существуют хорошие предпосылки для выявления границы между ними при помощи георадиолокации.

В данной статье представлены результаты, полученные при изучении галоклина в устьевой зоне реки Кереть в период 2007–2011 гг. сотрудниками физического и географического факультетов Санкт-Петербургского государственного университета.

Методика экспериментов

Эксперименты по исследованию галоклина методом георадиолокации проводились, как правило, в меженьный период в августе. Река Кереть, в устье которой выполнялись исследования, берёт начало из озера Кереть, расположенного на севере Карелии, и при впадении в Белое море образует однорукавную устьевую область. Среднегодовой расход реки составляет 22,6 м³/с. По морфологическим признакам устье реки Кереть является бездельтовым однорукавным (эстуарий), что характерно для малых рек с небольшим стоком и мощным воздействием приливов.

Наблюдать границу галоклина достаточно сложно, она не фиксируется эхолотом. Сильно изменяется лишь один параметр воды – солёность, а значит, и тесно связанное с ним электрическое сопротивление. В связи с этим увидеть скачок электропроводности можно, используя методы геоэлектрики. Как было установлено на практике, пресная более легкая вода всегда распространяется в устьевой области в приповерхностном слое. Радиосигнал же может распространяться как раз только в пресной воде (в соленой он быстро затухает). Таким образом, создается возможность для наблюдения галоклина с поверхности воды при помощи георадара. Результаты работ также показали, что отражения от границы пресной и солёной воды достаточно четко фиксируются на радарограммах даже при наличии очень слабых градиентов проводимости.

Все измерения выполнялись с использованием маломерных плавсредств (рис. 1). Антенны георадара помещались в надувной лодке со спущенным дном во избежание переотражений от поверхности воды. Измерения проводились как методом профилирования, так и методом непрерывных измерений в одной точке.



Рис. 1. Общий вид измерительного комплекса

Радиолокационное профилирование осуществлялось с помощью георадара «Око» с антенными блоками АБ-150 и АБ-400, обладающими разной глубиной. Резиновая лодка с антенным блоком буксировалась другой резиновой лодкой с мотором малым ходом. При этом лодка с антенным блоком закреплялась у борта мотолодки, что позволяло наблюдать невозмущенную винтом мотора границу пресной и солёной воды. Одновременно эхолотом измерялась глубина и осуществлялась привязка радиолокационных профилей при помощи GPS. Синхронно с радиолокационной съемкой на пяти станциях проводились измерения общей минерализации воды по глубине. В некоторых экспериментах выполнялись также определения электропроводности, скорости и направления течения на разных глубинах. Это позволило получить достаточно детальную картину распределения пресных и соленых вод устьевой области и их взаимодействия в течение приливо-отливного цикла.

Помимо стандартного для георадара метода профилирования, в 2009–2011 гг. проводились также эксперименты по непрерывной фиксации глубины залегания границы пресной и соленой воды в различных точках эстуария. Использовался, в основном, наиболее подходящий для этих целей антенный блок АБ-400, однако при синхронных измерениях использовался дополнительно блок АБ-250. Измерения проводились с шагом по времени примерно в 1 с на протяжении всего приливо-отливного цикла. Для удобства на всех радарограммах каждые полчаса ставились метки.

Результаты профилирования

В процессе исследований [1] была выполнена детальная георадиолокационная съемка устьевой области на разных фазах приливо-отливного цикла для прослеживания динамики галоклина. Было установлено, что процесс смешивания пресной и соленой воды длится до-

вольно долго. Поэтому на продолжительном участке эстуария (десятки и даже сотни метров) устанавливается практически горизонтальная структура с ярко выраженной границей. На рис. 2 представлена «трехмерная» картина границы пресной и соленой воды в устьевой зоне реки Кереть на фазе отлива, которая была построена по данным профилирования (продольный и два поперечных профиля).

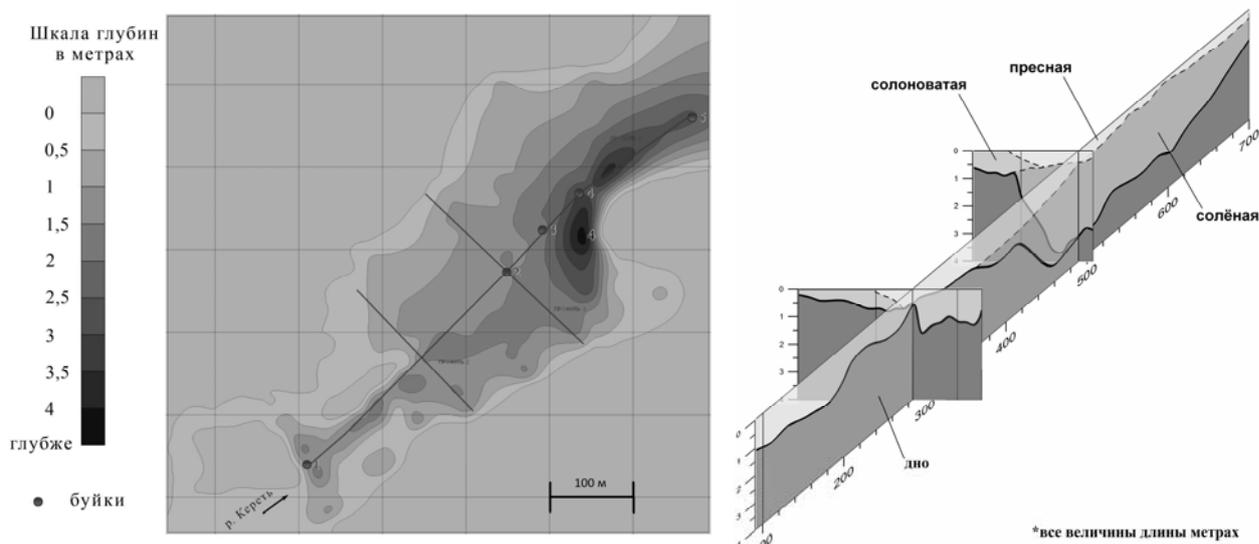


Рис. 2. Схема расположения профилей с восстановленной по ним пространственной структурой галоклина

Пресной на рисунке условно названа вода с минерализацией менее 1000 мг/л; солоноватой – 1000–10000 мг/л; солёной – более 10000 мг/л. Солоноватая (продукт смешивания) вода наблюдается только на поперечных профилях вдали от русла реки, где течение практически отсутствует.

Результаты стационарных измерений

Будучи достаточно гладкой, граница галоклина, одновременно с этим, не находится в покое. Помимо циклических полусуточных колебаний приливо-отливного цикла на ней присутствует целый спектр различных возмущений. Для детального изучения этих возмущений была разработана и применена методика стационарных непрерывных измерений в одной точке [2].

На рис. 3 представлена 12-часовая радарограмма. Видно, что граница галоклина не остается гладкой во времени. Она сильно изрезана, причем возмущения наиболее интенсивны в периоды смены фаз прилива. Так как ось времени сильно сжата, на рисунке невозможно рассмотреть быстрые колебания границы. Для того чтобы их увидеть, необходимо растянуть радарограмму.

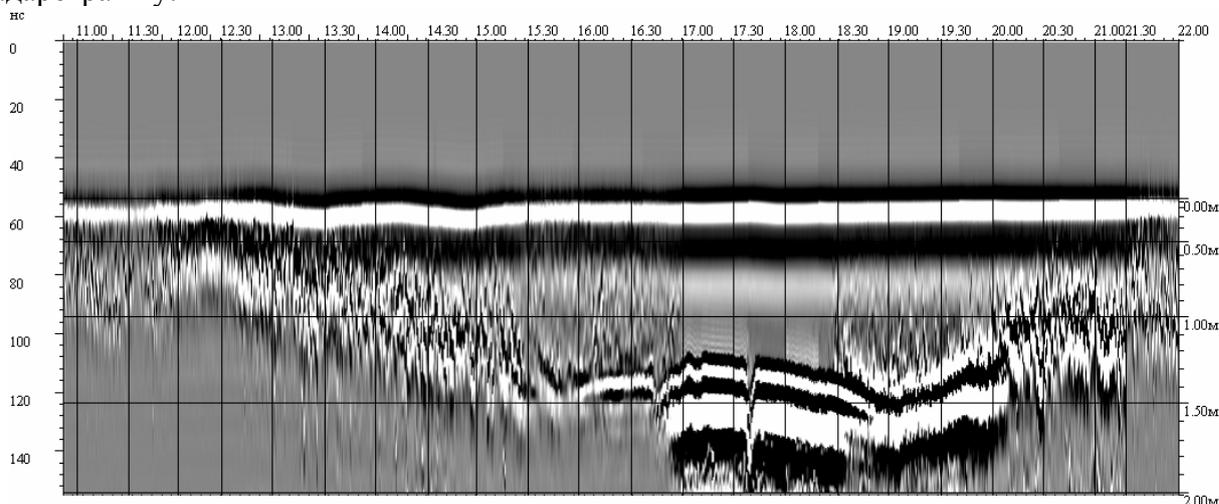


Рис. 3. Пример 12-часовой радарограммы, снятой в одной точке

Так на рис. 4 приведен фрагмент записи, соответствующий интервалу времен 14–15 ч (фаза спада уровня воды). На этом же рисунке приведены дополнительные сведения о зондируемой среде в виде графиков изменения с глубиной скоростей течения и удельного электрического сопротивления. Измерения эти проводились каждые полчаса одновременно с записью радарограмм при помощи погружаемых на разные глубины измерительных зондов. Видно, что изменение границы представляет собой хаотический процесс, в котором присутствуют характерные всплески, имеющие форму «зубьев пилы», затянутых в сторону больших времен (см. рис. 4). Такой вид всплесков легко объясняется разностью в скоростях течения на разных глубинах, однако само происхождение всплесков пока непонятно.

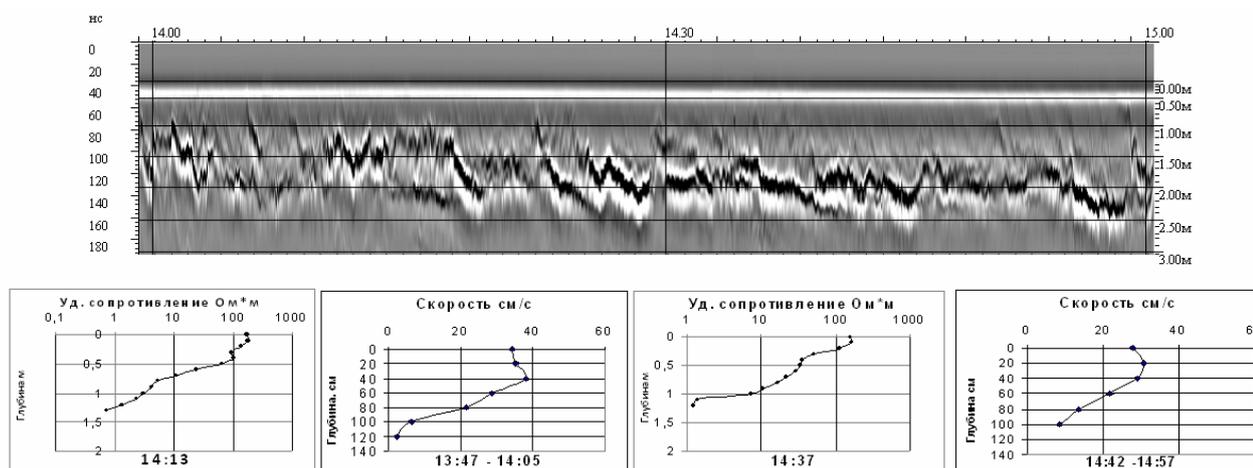


Рис. 4. Фрагмент стационарной радарограммы в интервале 14–15 ч и соответствующие вертикальные профили удельного сопротивления и скорости течения

Еще на одной радарограмме, полученной в 2011 году (рис. 5), хорошо видно, что на фазе прилива устанавливаются колебания, напоминающие синусоиду, с периодом около 20 мин. В том или ином виде крупные возмущения границы с похожей периодичностью прослеживаются и на других радарограммах, полученных в разное время в разных точках. Соответственно они вызывают наибольший интерес.

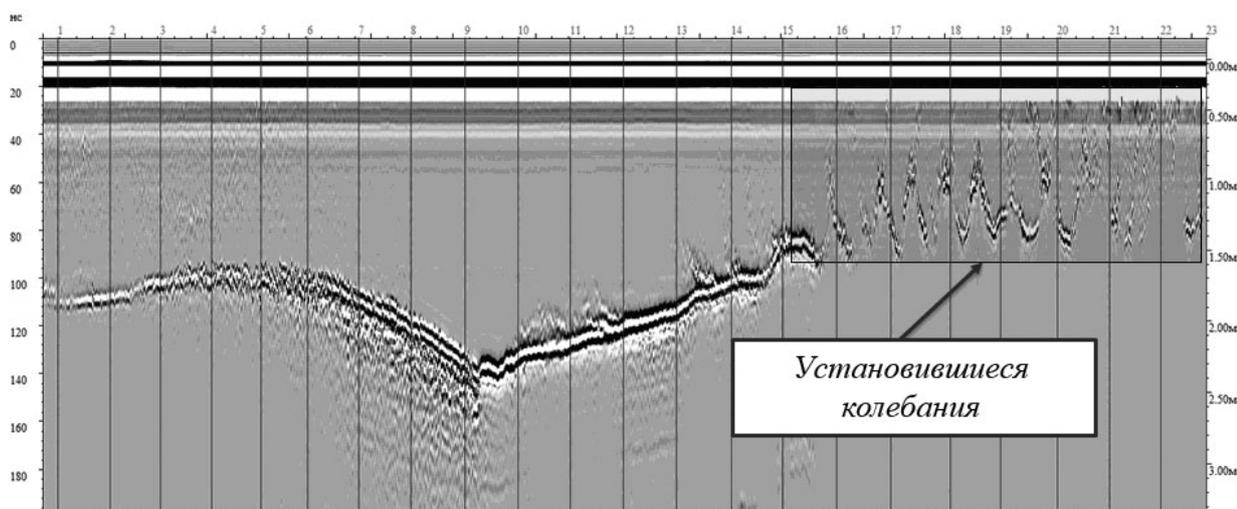


Рис.5. Радарограмма с установившимися гармоническими колебаниями

Хотя природа этих колебаний до конца неясна, понятно, что образуются они где-то за пределами активной области галоклина. Оцененные значения частоты Вайсяля-Брента по

величине градиентов солености в этой области свидетельствуют о том, что в зоне галоклина могут формироваться только более высокочастотные колебания. 20-минутным периодам будут соответствовать более низкие градиенты солености, которые вероятно могут существовать в акватории керетьской губы. То что наблюдать полную синусоиду колебаний удастся не везде, лишь подтверждает гипотезу о существовании внутренних волн, приходящих в точку наблюдения с заданной периодичностью. Если представить, что внутренняя волна накатывается со стороны моря, она должна как и обычная береговая волна разрушаться при уменьшении глубины. Наблюдаемые таким образом пилообразные всплески – волны на стадии разрушения.

Для лучшего понимания динамики галоклина в 2011 г. был поставлен эксперимент с одновременной записью двух радарограмм в точках на некотором известном расстоянии друг от друга. Схема расположения станций показана на рис. 6. В первом случае точки были выбраны вдоль устья (точки 1 и 2) на расстоянии 67 м, во втором поперек (точки 3 и 4) на расстоянии 17 м.

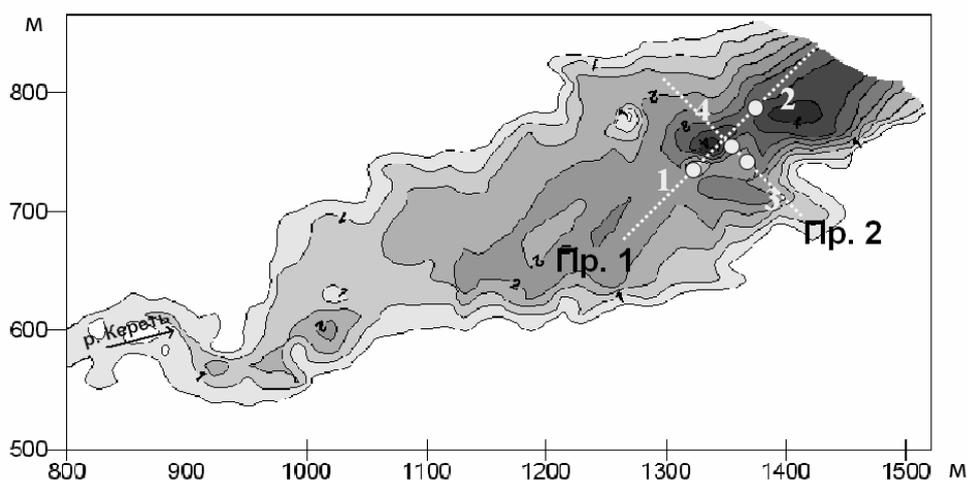


Рис. 6. Схема расположения станций в устье реки Кереть в 2011 г.

Анализ радарограмм, снятых в этих точках, выявил целый ряд любопытных особенностей. Поскольку глубина в точках 3 и 4 несколько различается, соленая вода появляется на дне сначала в точке 3 и, лишь спустя 25 м, в точке 4. Появление соленой воды хорошо видно на радарограмме по смене фазы отраженной волны (см. рис. 7). Из этого можно сделать вывод, что на ранних стадиях прилива уровень соленой воды не возмущен и практически горизонтален. Прибывать он будет со скоростью около 1 см/с.

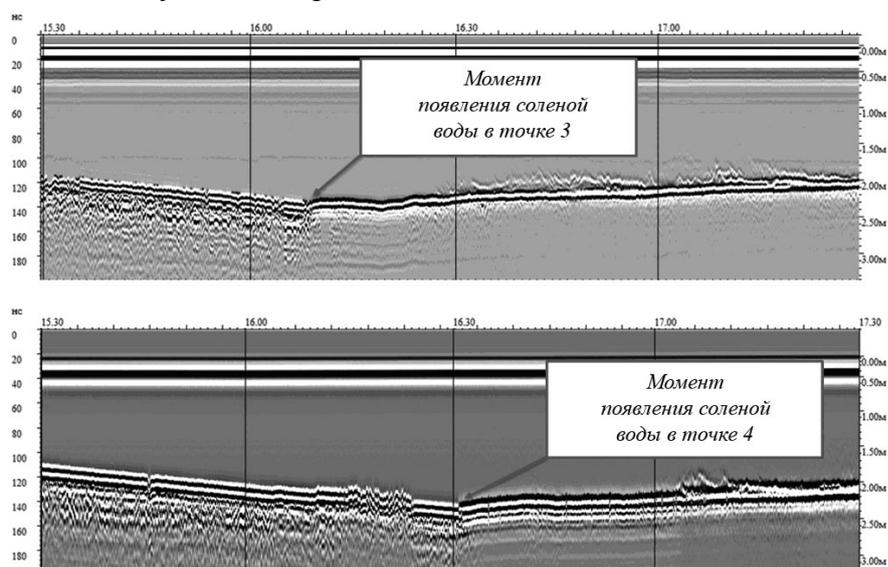


Рис. 7. Отрезки синхронных радарограмм, сделанных в точках 3 и 4

Для того чтобы количественно проанализировать ряды зависимости глубины границы галоклина от времени, ввиду их сильной зашумленности, а так же сложности выделения самой границы, пришлось пользоваться статистическими методами анализа данных.

Так функция взаимной корреляции (см. рис. 8) сигнала точек 3 и 4 показывает небольшой сдвиг главного максимума влево, что соответствует приходу сигнала в точку 4 с небольшим запозданием. Это можно объяснить тем, что эта точка 3 располагается ближе к руслу реки, а значит скорость течения в ней больше, и, соответственно, все возмущения будут доходить до нее раньше.

На графиках спектров мощности видим, что в точках 3 и 4 главные максимумы колебаний соответствуют немного разным частотам. Это может быть связано с разной скоростью течения в этих точках. Если предположить, что длинные волны приходят со стороны моря, эффект Доплера должен будет создавать наблюдаемый сдвиг.

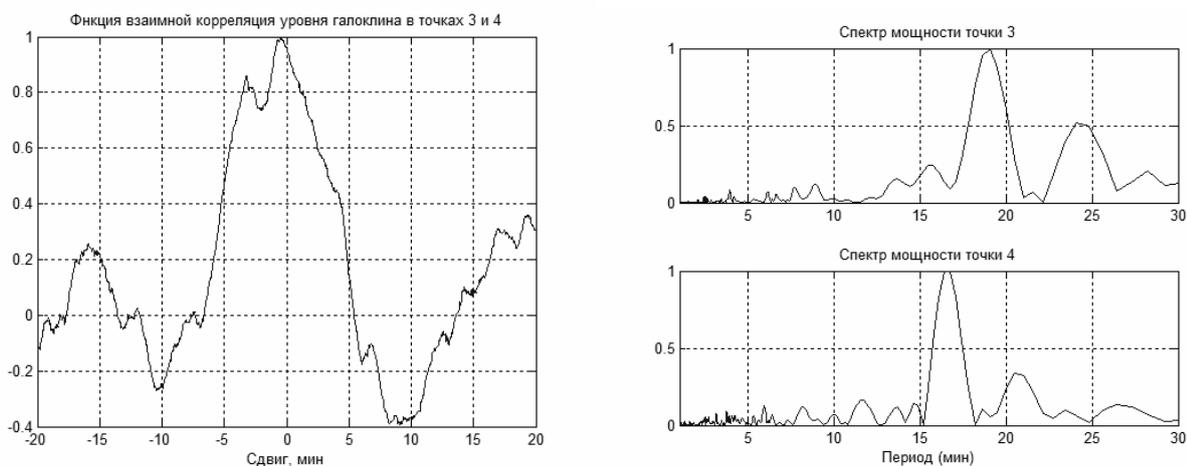


Рис. 8. Функция взаимной корреляции и спектры мощностей для точек 3 и 4

На рис. 9 приведен пример спектрально-временного анализа (оконное преобразование Фурье) квазигармонического участка колебаний границы галоклина в точке 3. Хорошо видно, как по ходу прилива возрастает период колебаний. Это может быть связано как с увеличением уровня воды, так и с увеличением скорости течения.

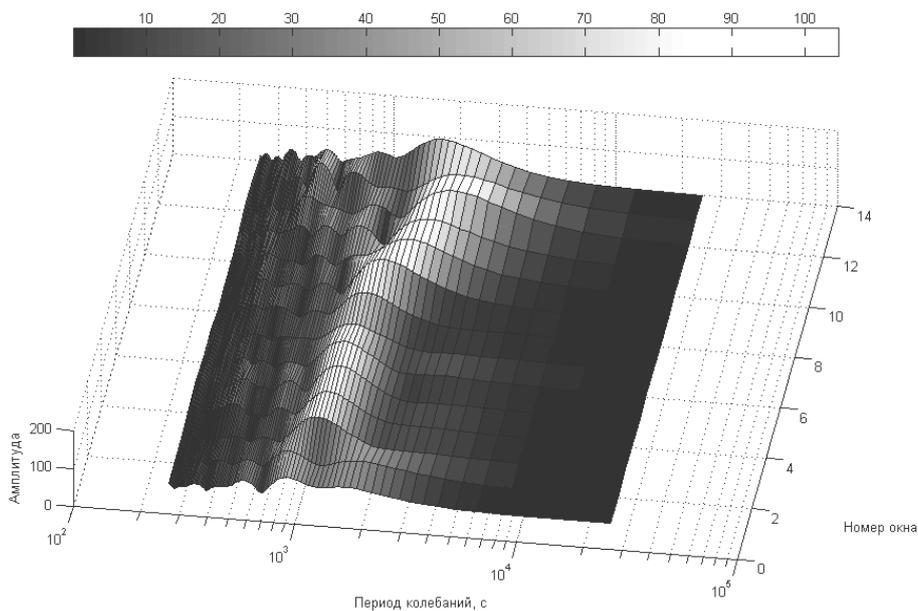


Рис. 9. Спектрограмма ряда данных, полученных в точке 3

Тенденция к увеличению периода колебаний с возрастанием уровня воды характерна для многих радарограмм. Это позволяет говорить о некоторой закономерности и, возможно, может послужить отправной точкой для создания математической модели образования, распространения и разрушения внутренних волн.

Заключение

Результаты экспериментов в устье реки Кереть показали, что георадиолокация может быть эффективным средством для оперативного выявления границы пресных и соленых вод и отслеживания изменений её структуры при мониторинге устьевых зон.

Несмотря на то, что не удалось полностью понять природу наблюдаемых внутренних волн, уже сам факт обнаружения является достижением. Внутренние волны, представляя большой интерес прежде всего для океанологов, вместе с тем остаются плохо изученным явлением именно из-за своей неуловимости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 11-05-01211-а.

Список литературы

1. Бобров Н. Ю. , Крылов С. С. , Киселев Е. Ю. , Пряхина Г. В. , Федорова И. В. Применение георадиолокации в гидрологии // Записки Горного института. Т. 183. – 2009. – С. 219-223.

2. Крылов С. С. , Бобров Н. Ю., Киселев Е. Ю. , Петлеваний Д. И. Георадарные технологии при изучении динамических процессов в устьевых областях // Труды Государственного океанографического института. Вып. 213. Исследования океанов и морей / Под ред. Грузинова В. М., Борисова Е. В. – М.: Изд-во Атифекс, 2011. – С. 356–368.

Рецензент – доктор геолого-минералогических наук В. П. Кальварская.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ 3D-ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ОБЛИЦОВОЧНОГО КАМНЯ

THE 3D-ELECTRICAL RESISTIVITY IMAGING RESULTS OF USE ON THE DIMENSION STONE DEPOSIT

Использование 3D-электротомографии является средством повышения надежности обработки электро-разведочных данных, а также более эффективным методом для корреляции распределения электрических сопротивлений и фактической добычи месторождений. В статье демонстрируются возможности такой методики для исследования состояния трещиноватости массива горных пород высоких сопротивлений (габбродолерит) и особенности её применения на карьерах облицовочного камня.

Ключевые слова: 3D-электротомография, карьер облицовочного камня, трещиноватость массива, корреляция

Using 3D-electrical resistivity imaging is a means to improve the reliability of electrical survey data processing, as well as a more effective method for correlation distribution of electrical resistivity and the actual production fields. The paper present the capabilities of this technique for studying the fracturing state of rock high resistivity (gabbrodolerite) and especially its use in decorative stone quarries.

Keywords: 3D-electrical resistivity imaging, dimension stone quarry, fracture of rocks, correlation

Введение

На сегодняшний день малоглубинные геофизические методы находят себе новое применение в различных областях научно-прикладной деятельности. Особенно популярным стало использование современной динамично развивающейся методики электроразведки на постоянном токе – электротомографии [1]. Одним из направлений её прикладного применения является изучение неоднородности и нарушенности массивов горных пород, в том числе, и для оценки качества сырья на карьерах по добыче облицовочного камня. Существует ряд успешных примеров геофизических работ (главным образом 2D-электротомографии), по которым можно судить о перспективности дальнейшего изучения и развития этого направления инженерной геофизики [2, 3, 4]. Данная статья демонстрирует опыт использования электротомографии на действующем месторождении габбродолеритов. Как правило, такой подход позволяет получить информацию, позволяющую качественно оценить распределение кондиционного сырья природного камня. В тоже время можно обозначить две основные проблемы применения 2D-электротомографии на месторождениях облицовочного камня. Это, прежде всего, отсутствие учёта электрического сопротивления изучаемой среды по всем трём направлениям. Так, при двухмерном моделировании ячейки удельного сопротивления рассчитываются по измеренным параметрам и распределению чувствительности по x , y без учёта влияния окружающей массы, которая также вносит свой вклад в значение регистрируемого сигнала. Это снижает достоверность подбираемой модели и затрудняет сопоставление с реальной геологической ситуацией, особенно при сложном, неоднородном строении изучаемого объекта. Ещё одной проблемой (прикладного характера) регулярного использования геофизических работ на карьерах природного камня является трудность восприятия полученных результатов для специалистов горной отрасли. Получаемая информация, как правило, имеет представление в одномерной или двумерной формах, что не позволяет оценить распределение сырья по одному из направлений. Поэтому использование 3D- (трёхмерной) визуализации может служить эффективным средством повышения достоверности получаемых результатов, а также более надёжным способом для корреляции электроразведочных данных и результатов реальной отработки месторождения облицовочного камня.

Методика проведения работ

Республика Карелия является перспективным регионом для развития горнодобывающего бизнеса природного камня. Однако существует ряд проблем при разработке месторождений такого типа. Главная из них – оценка качества сырья, с учетом оценки трещиноватости массива горных пород [5]. Поэтому в лаборатории геофизики Института геологии КарНЦ РАН идёт разработка методов разведки и эксплуатационного сопровождения объектов облицовочного камня. Для проведения экспериментальных работ был выбран участок на технологическом горизонте № 126 действующего карьера по добыче габбродолерита «Другорецкий–3» (южная Карелия). Измерения выполнялись многоэлектродной электроразведочной станцией «СКАЛА-48» (рис. 1, а, цв. вкл., стр. 146) с двумя электроразведочными косами по 24 электрода каждая [6]. Шаг позиций электродов равнялся 1 м, такая геометрия (исходя из установки) позволила получить максимальную глубину 6,5 м. Это является достаточным для выполнения поставленной задачи, так как высота уступа не превышает 6 м. Длина профилей (общим количеством 6) составляла 48 м, расстояние между ними 5 м (рис. 1, а, б, цв. вкл., стр. 146). Используемая сетка измерений позволила сформировать массив данных, включающий более трёх тысяч замеров. Следует отметить, что несмотря на сложные условия заземления (вскрытое скальное основание), а также наличия множества приповерхностных неоднородностей, аппаратура позволила получить приемлемые результаты на протяжении всего участка измерений (рис. 1, в, цв. вкл., стр. 146).

Важный момент выполнения электротомографических работ – выбор типа электродной установки. Как показано в ряде источников, установки различных типов имеют разные характеристики как по глубинности исследования, так и по распределению и уровню чувствительности в изучаемой среде [7, 8]. Поэтому для получения качественных и, прежде всего, корректных результатов требуется первичный анализ поставленных задач и изучаемой среды. Для проводимых исследований была выбрана дипольная установка (*dipole-dipole*). Это обусловлено рядом факторов:

1. Исходя из методики работ 3D-электротомографии, только дипольная установка обладает необходимым распределением чувствительности (захватывающим области находящиеся не только внутри приёмной линии, но и в краевых частях) для выполнения измерений с расстояниями между профилями, более чем в два раза превышающими расстояние между электродами.

2. Результаты использования дипольной установки можно корректно экстраполировать в краевые части для получения разрезов прямоугольной формы.

3. Дипольная установка чувствительна к вертикальным границам, которые на участке представлены двумя основными системами вертикальных и субвертикальных трещин.

4. Выбранная установка имеет хорошую разрешающую способность.

Как показала практика, дипольная установка действительно соответствует заявленным параметрам и главный её недостаток, как и было указано – малый уровень сигнала. Для проверки проверяемых результатов проводилось измерение наиболее ярко выраженных естественных трещин, а также, в последующем, сравнение значений удельного сопротивления построенной модели с практическим выходом блоков с вышележащего уступа № 126.

Основные результаты

В результате проведения работ получены шесть профилей распределения кажущегося удельного сопротивления (ρ_k). Анализ первичной информации выделил наличие единичных замеров, которые можно рассматривать как случайные (с сопротивлениями в десятки раз выше или ниже средних значений). Наиболее целесообразно такие замеры отфильтровывать, так как общая картина не изменится, к тому же число плохих замеров не превышает первых процентов от общего количества. Также выделяется резкий контраст между минимальным и максимальным значениями. Это является следствием общего высокого сопротивления разреза, характерного для пород Карелии, расположенных в пределах докембрийского кристаллического щита. Удельные сопротивления здесь варьируются от первых сотен до десятков ты-

сяч Ом·м. Для участка исследования характерны средние значения (по результатам ряда экспериментальных работ) в интервале 6–10 кОм·м. В дальнейшем, это следует учитывать при подборе параметров инверсии. На разрезе измеренных значений явно прослеживается интенсивный С-эффект [9, 10], что было ожидаемо для представленного геологического строения среды, то есть наличия приповерхностных сильноконтрастных неоднородностей (обводнённые трещины) на фоне условно однородного монолита габбродолеритов высоких сопротивлений (рис. 2, цв. вкл., стр. 146).

Следующий этап обработки результатов – построение 2D-(двумерных) геоэлектрических моделей сопротивлений. Для каждого профиля строился отдельный разрез удельных сопротивлений (рис. 3, цв. вкл., стр. 147). При построении вводится поправка для учёта приповерхностных неоднородностей, а также усиление (вследствие преобладания вертикальных неоднородностей) по y -направлению. Если не использовать такие механизмы на разрезе, получится ряд приповерхностных высокоомных аномалий, не соответствующих реальному геологическому строению.

В результате, анализируя полученные геоэлектрические модели, можно судить о строении геологической среды. Распределение аномалий резко не однородно, что объясняется сложной картиной трещиноватости. Не всегда прослеживается направление высокоомных и низкоомных зон с профиля на профиль. В целом полученные результаты позволяют оценить распределение кондиционного сырья (наименее нарушенного и трещиноватого) сопоставлением с областями сопротивлений выше определённого среднего значения (в данном случае 10 кОм·м). Однако для более корректного решения обратной геофизической задачи и, в последствии, для перехода на полуколичественную оценку, измерения, полученные обычной 2D-технологией, обрабатываются в 3D-варианте (рис. 4, цв. вкл., стр. 147). Следует отметить, что полученная модель является самой элементарной по сложности и детальности. Это связано с методикой съёмки и плотностью получаемых результатов [4, 8, 11, 12]. Но для практического использования необходим компромисс между качеством работ и их ценой. Это является следствием относительно простого строения (в первом приближении) изучаемого объекта, а также невысокой стоимости конечной продукции.

При 3D-моделировании выделяется ряд особенностей, который необходимо упомянуть. Это, прежде всего, ориентация аномалий по y -оси, что является следствием, как отмечалось выше, недостаточной частоты профилей на участке. Такой эффект характерен для методики 3D-электротомографии и носит название «*banding effect*» [8]. Вторая особенность – большая приповерхностная разрешающая способность в совокупности с резким контрастом приповерхностных аномалий. Из-за этого верхние части модели сильно дифференцированы. Это осложняет выделение структурных объектов и затрудняет интерпретацию в целом. И если для устранения первого типа помех используются механизмы усиления по y -направлению, то для преодоления второго необходимо усиливать «вес» моделируемых значений с глубиной (рис. 5, цв. вкл., стр. 148).

Интерпретация результатов позволяет выделить основную область качественного сырья, локализованную между пикетами $x15$ – $x30$ с удельными сопротивлениями порядка 20–30 кОм·м. Эта зона выдержана по глубине, однако на самых нижних уровнях сопротивления падают. Возможно, это связано с большей трещиноватостью нижней части технологического уступа и, как следствие, большей обводнённостью из-за особенностей разработки месторождения. По y -оси картина получается менее выдержанная, однако и здесь возможно выделить наиболее перспективные области между пикетами $y0$ – $y15$. Также уверенно фиксируются отдельные крупные трещины различных направлений, прослеживающиеся по низким сопротивлениям.

Последующее сравнение результатов обработки с данными практической отработки вышележащего уступа выявляет высокую степень корреляции. Однако на большинстве карьеров ведётся лишь приблизительная оценка блочности с осреднением по крупным объёмам горной массы. Поэтому сопоставление имеет лишь качественный характер с высоким уровнем приближения.

Выводы

Следует отметить, что несмотря на малый интервал расположения электродов (1 м) и большой объем получаемой информации, на данный момент не удаётся провести параметрическую оценку горной массы (т.е. выделение отдельных блоков). Это связано, вероятней всего, со сложным неоднородным строением объекта исследований, интегральным характером измерений, а также особенностями обработки и представления данных. Характер получаемых результатов является следствием высокой сложности изучаемого объекта, который в первом приближении рассматривается как однородная среда высоких сопротивлений со множественными линейными маломощными включениями низких сопротивлений. Исследования, проведенные на действующем карьере облицовочного камня «Другорецкий – 3» методикой 3D-электротомографии, позволяют сделать следующие выводы:

1. Для проведения 3D-электротомографии необходим тщательный выбор сетки наблюдения и измерительной электродной установки, исходя из целей и задач проводимого исследования.

2. При обработке следует опираться на имеющуюся геологическую информацию и физико-геологическую модель, что позволит избежать ряда ошибок и получать более корректные результаты.

3. 3D-способ представления данных намного проще сопоставляется с реальными объектами и позволяет проводить благодаря интерактивной визуализации более детальный анализ.

4. Большую достоверность будут иметь результаты, полученные непосредственно на технологическом уступе, по которому проводились измерения.

5. Применение такой методики является не накоплением избыточной информации, а необходимым условием эффективной разведки и оценки месторождений облицовочного камня.

Список литературы

1. *Маништейн А. К.* Малоглубинная геофизика // Учебное пособие – Новосибирск: НГУ, 2002. – 136 с.

2. *Копылов М. И., Пустовойтова И. В.* Опережающие геофизические и петрофизические исследования при поисках и разведке строительных материалов на Дальнем Востоке // Тихоокеанская геология. – 2006. – № 4. – С. 69–78.

3. *Соколов С. Я., Рязанцев П. А., Климовский А. В., Нилов М. Ю.* Геофизические методы изучения породной толщи на объектах облицовочного камня // Горный журнал. – 2011. – №5. – С. 15–19.

4. *Magnusson M., Fernlund J., Dahlin T.* Geoelectrical imaging in the interpretation of geological conditions affecting quarry operations // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2010. – N 3. – P. 465–486.

5. *Шеков В. А., Иванов А. А.* Методологические основы классификации месторождений блочного камня // Горный журнал. – 2011. – №5. – С. 5–8.

6. *Балков Е. В., Панин Г. Л., Маништейн Ю. А., Маништейн А. К., Белобородов В. А.* Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // [Электронный ресурс], www.nemfis.ru. – 2010. – 21 с.

7. *Dahlin T., Zhou B.* A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging with Ten Electrode Arrays // Geophysical Prospecting. – 2004. – N 52. – P. 379–398.

8. *Loke M. H.* Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys [Электронный ресурс], www.geotomo.com. – 2010. – 148 p.

9. *Колесников В. П.* Основы интерпретации электрических зондирований. – М.: Научный мир. 2007. – 248 с.

10. Электроразведка методом сопротивлений // Учебное пособие / Под ред. В. К. Хмелевского и В. А. Шевнина. – М.: МГУ. 1994. – 160 с.

11. Bentley L. R., Gharibi M. Two- and three-dimensional electrical resistivity imaging at a heterogeneous remediation site // Geophysics. – 2004. – N 3. – P. 674–680.
12. Dahlin T., Bernstone C., Loke M. H. A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden // Geophysics. – 2002. – N 6. – P. 1692–1700.

Рецензент – доктор геолого-минералогических наук К. В. Титов.

Авторский указатель
Index of authors

Адиев А. Я. Adiev A. J.	53	Красильников К. С. Krasilnikov K. S.	25
Александров Д. В. Alexandrov D. V.	45	Красинский Е. М. Krasinskij E. M.	66
Белевская М. А. Belevskaya M. A.	7	Королева Т. Ю. Koroleva T. Yu.	16
Буторин А. В. Butorin A. V.	87	Михайлов И. В. Mikhaylov I. V.	76
Буторина М. А. Butorina M. A.	90	Манаков С. А. Manakov S. A.	99
Бызов Д. Д. Byzov D. D.	41	Москалева Е. В. Moskaleva E. V.	29
Верхоланцев Ф. Г. Verkholantsev F. G.	7	Петлеваний Д. И. Petlevany D. I.	103
Глущенко М. Н. Glushchenko M. N.	96	Петрищев М. С. Petrishchev M. S.	71
Голышева Ю. С. Golysheva Yu. S.	49	Петров А. Н. Petrov A. N.	61
Даниловская Л. О. Danilovskaya L. O.	10	Половков В. В. Polovkov V. V.	93
Дешененков И. С. Dshenenkov I. S.	55, 61	Пономаренко А. В. Ponomarenko A. V.	22, 32
Емцева В. В. Emtseva V. V.	16	Рязанцев П. А. Ryazantsev P. A.	110
Заалов Н. Ю. Zaalov N. Yu.	29	Сальцберг А. В. Saltsberg A. V.	38
Иркабаев Д. Р. Irkabaev D. R.	53	Сметанина Л. В. Smetanina L. V.	76
Казей В. В. Kazei V. V.	22	Соболев А. Ю. Sobolev A. Yu.	96
Киселев Е. Ю. Kiselev E. Yu.	103	Фадеева Н. В. Fadeeva N. V.	41
Коваленко К. В. Kovalenko K. V.	55, 61	Шигапов Р. А. Shigarov R. A.	45
Коньков А. И. Konkov A. I.	99	Эзирбаев Т. Б. Ezirbaev T. B.	83

К статье Белевской М. А., Верхоланцева Ф. Г. «Сейсмичность на Верхнекамском месторождении калийных солей (2008–2010 гг.)»

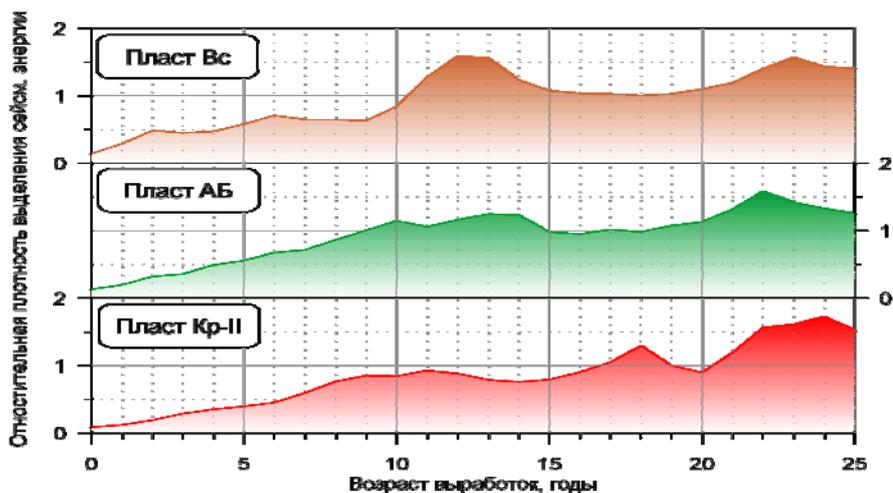


Рис. 1. Графики зависимости плотности потока сейсмической энергии от возраста выработок

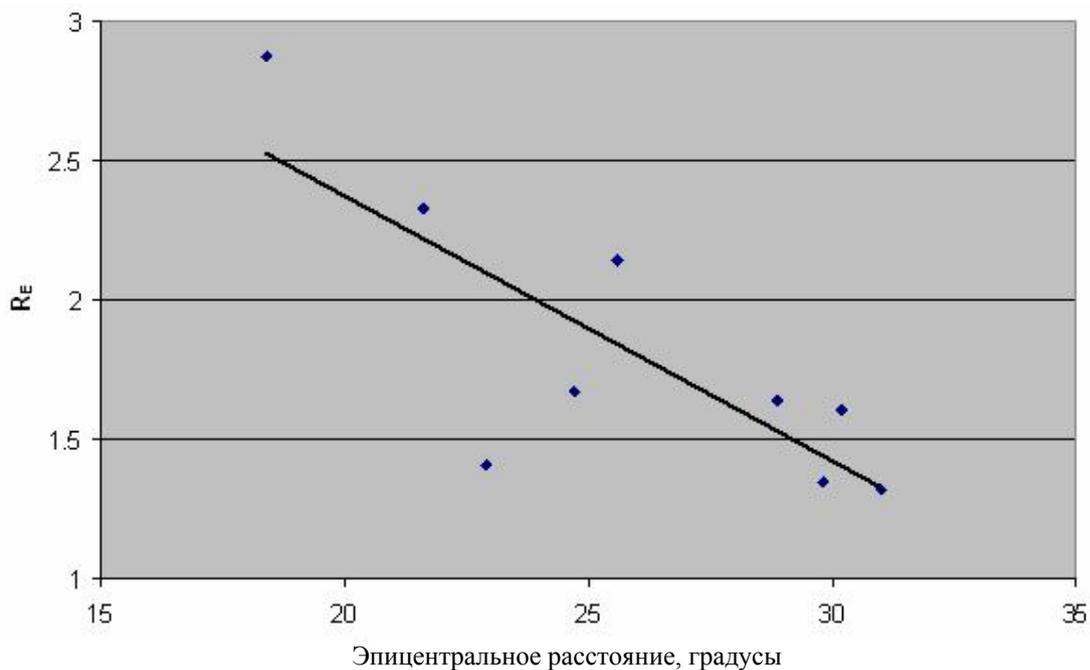


Рис. 2. Отношение количества событий в шахте до и после землетрясения от расстояния до очага землетрясения

К статье Емцевой В. В., Королевой Т. Ю. «Определение скоростного строения верхней мантии методом поверхностно-волновой томографии с учетом влияния землетрясений»

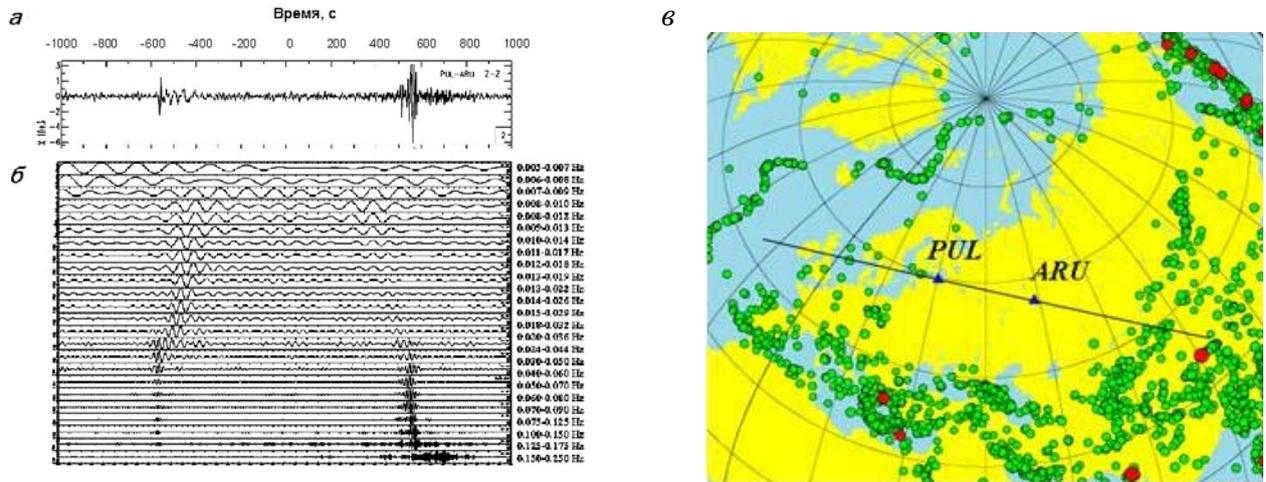


Рис. 1. Пример асимметрии корреляционной функции: а – кросс-корреляционная функция шума за 2001 г. на станциях ARU-PUL; б – результат ее фильтрации узкополосными фильтрами за год; (цифры у оси ординат – граничные частоты фильтров); в – эпицентры землетрясений с $M > 4$ за этот же год. Линией показана трасса между станциями ARU и PUL и ее продолжения в обе стороны

К статье Казея В. В., Пономаренко А. В. «Влияние головных волн на качество восстановления скоростной неоднородности методом обращения полного волнового поля»

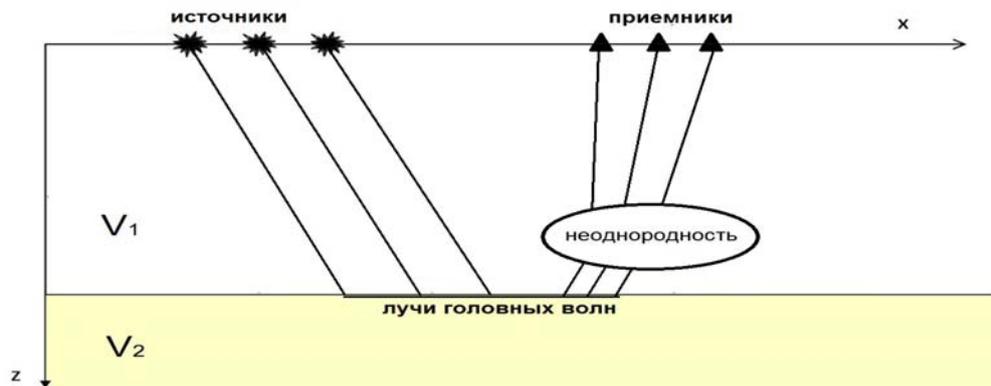


Рис. 1. Постановка задачи, модель эксперимента

К статье Москалевой Е. В., Заалова Н. Ю. «Характеристические проявления локальных неоднородностей полярной шапки на ионограммах вертикального зондирования»

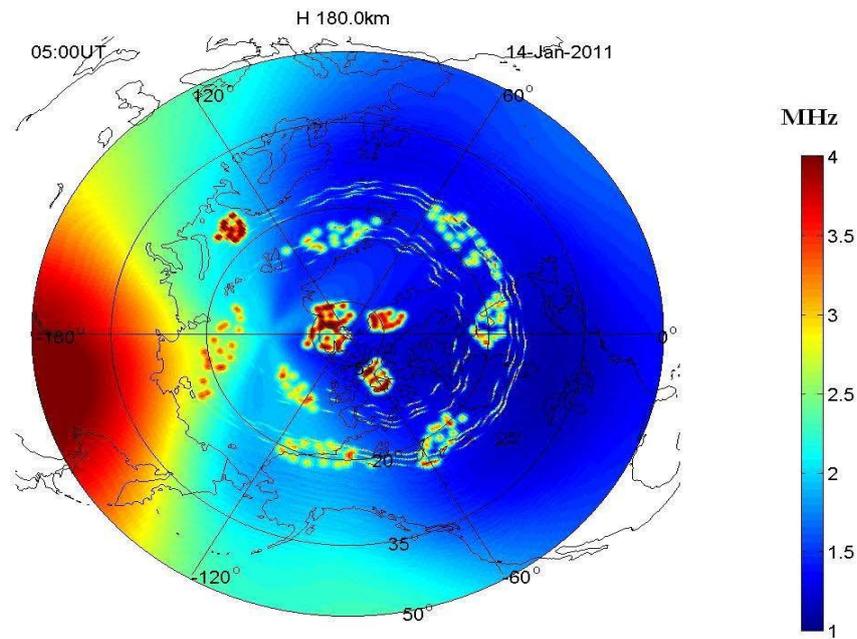


Рис. 1. Модель ионосферы, представленная пространственным распределением критических частот F-области

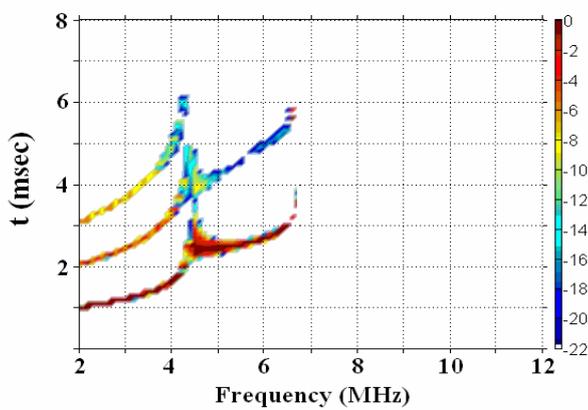


Рис. 2

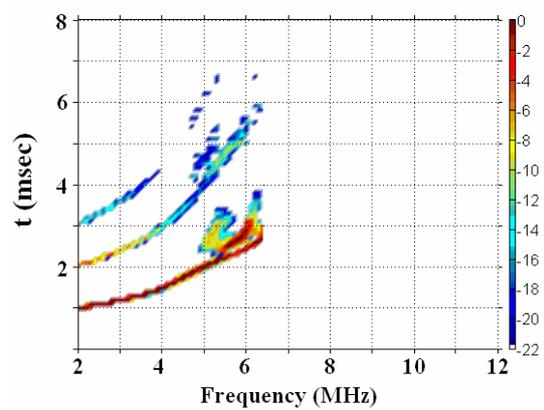


Рис. 3

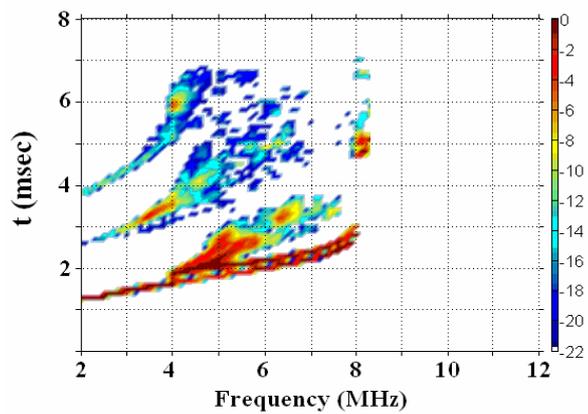


Рис. 4

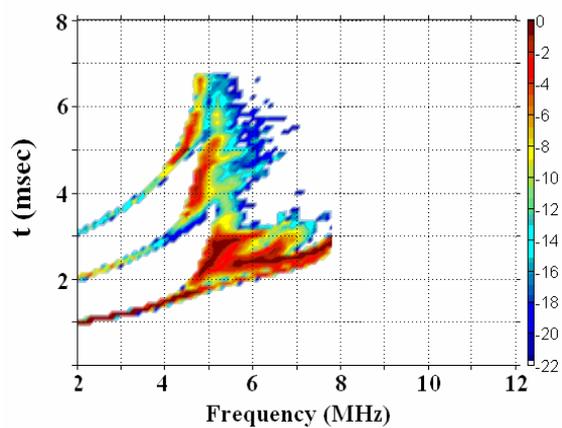


Рис. 5

Рис. 2–5. Примеры симулированных ионограмм

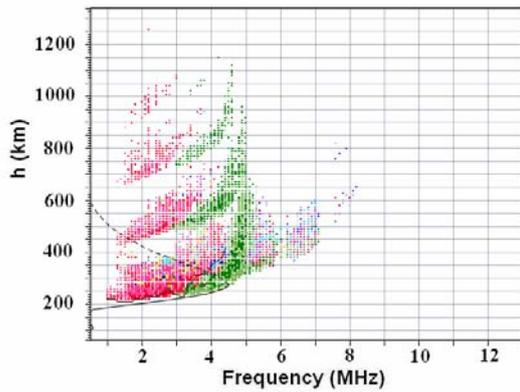


Рис. 6

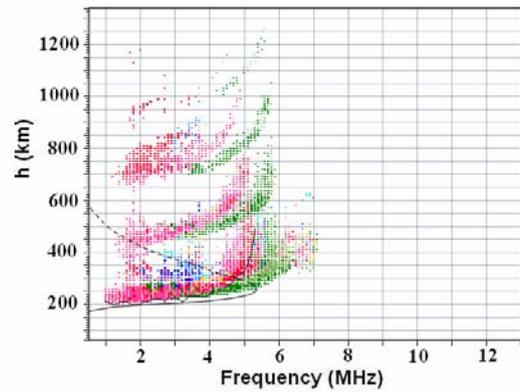


Рис. 7

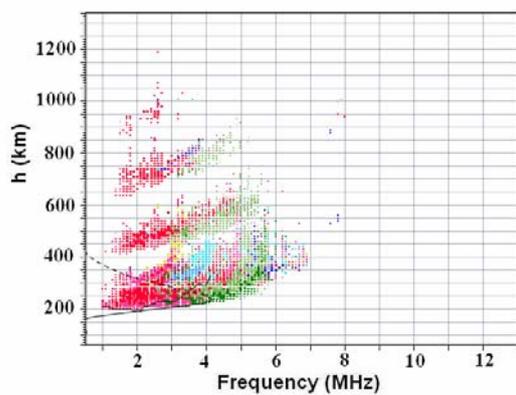


Рис. 8

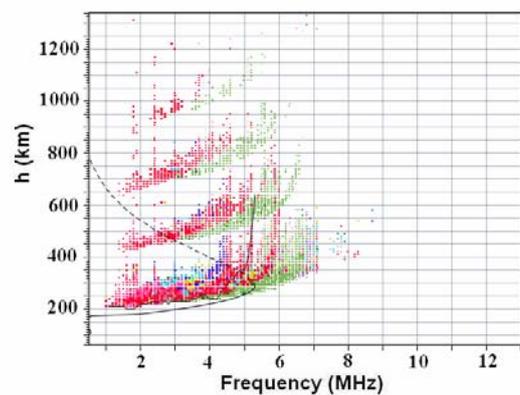


Рис. 9

Рис. 6–9. Примеры реальных ионограмм, полученных на станции Туле 14 января 2011 года

К статье Сальцберг А. В. «Результаты магнитотеллурических зондирований на островах Среднем и Пезжострове Белого моря»

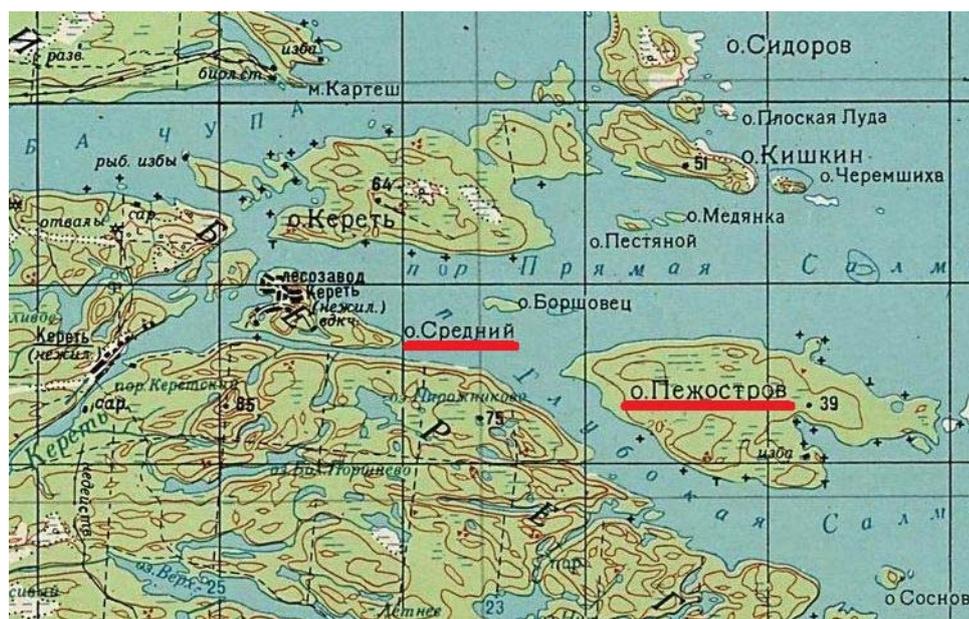


Рис. 1. Географическая карта территории проведения зондирований (крупный план)

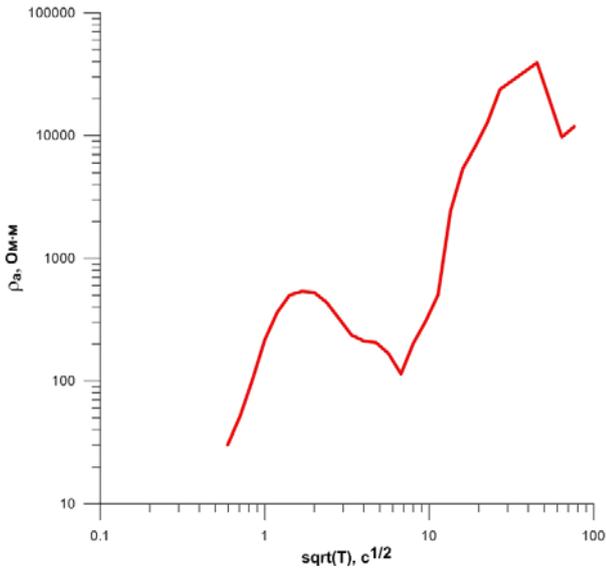


Рис. 3. Кривая кажущегося сопротивления $\rho_{эфф}$, полученная на о. Среднем

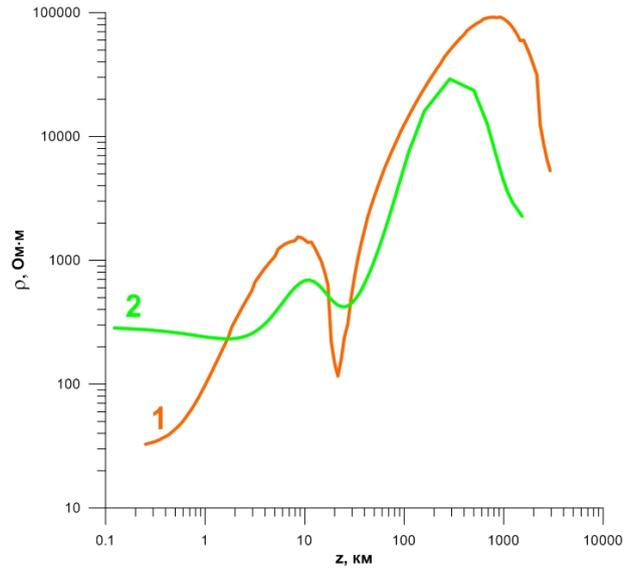


Рис. 4. Результаты 1D-инверсии данных МТЗ на о. Среднем по SVD (1) и МЭЛ (2)

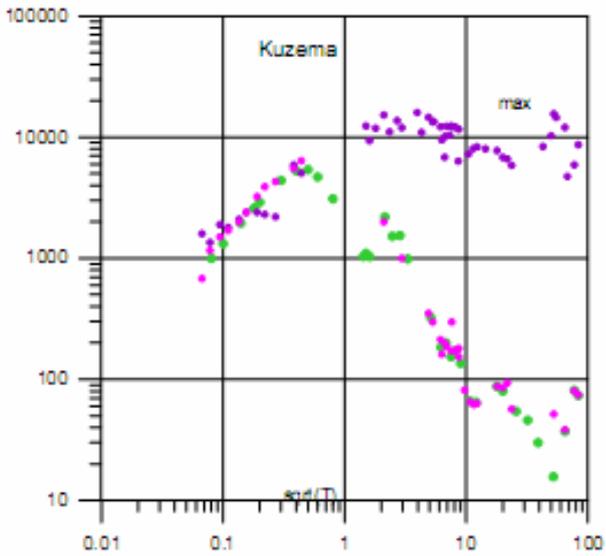


Рис. 5. Кривые кажущихся сопротивлений: построены по данным для Куземы

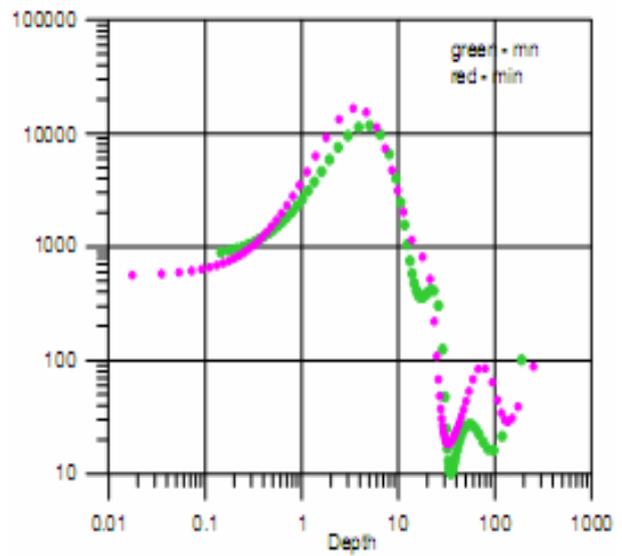


Рис. 6. Геоэлектрический разрез: построен по данным для Куземы

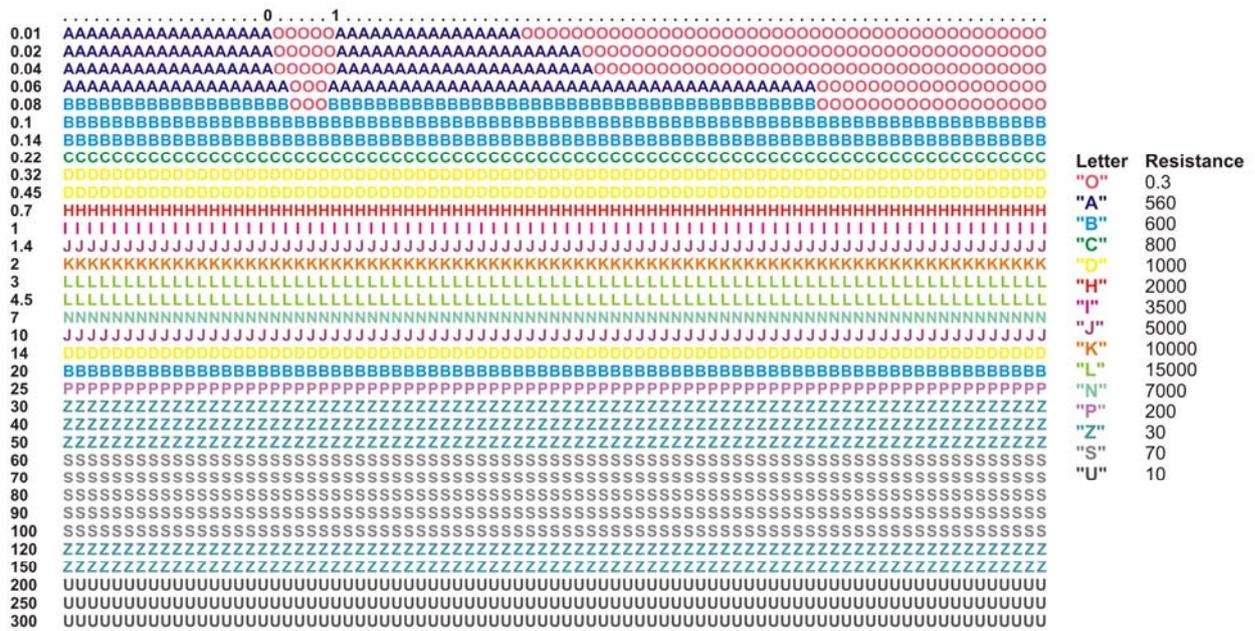


Рис. 7. Априорный геоэлектрический разрез Пезжострова

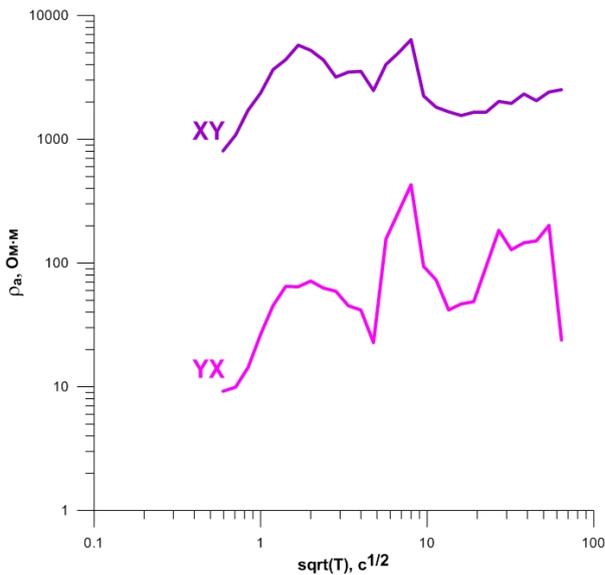


Рис. 8. Кривые ρ_{xy} и ρ_{yx} для Пезжострова: получены обработкой временных рядов

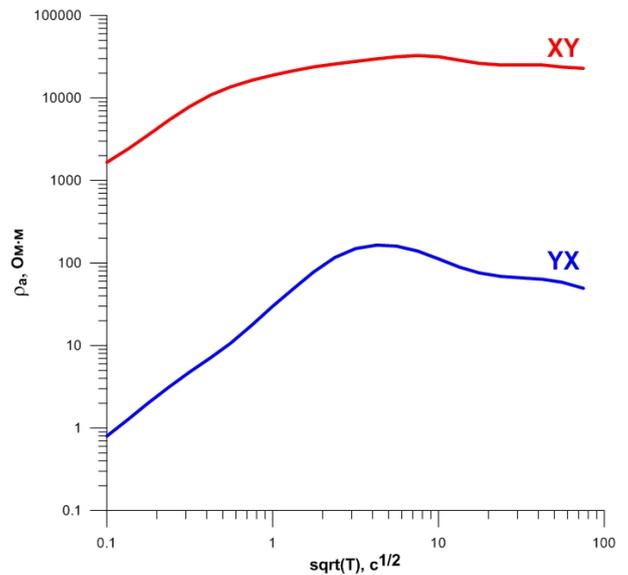


Рис. 9. Кривые ρ_{xy} и ρ_{yx} для Пезжострова: получены прямым 2D-моделированием

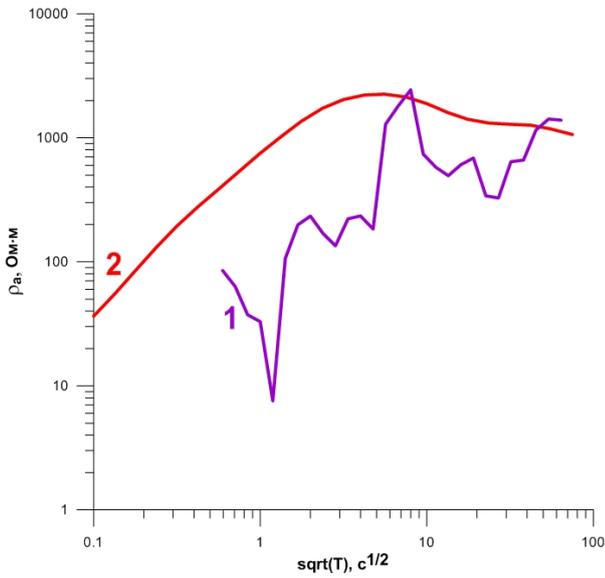


Рис. 10. Кривые $\rho_{эфф}$ для Пежострова:
 получены обработкой временных рядов (1);
 прямым 2D-моделированием (2)

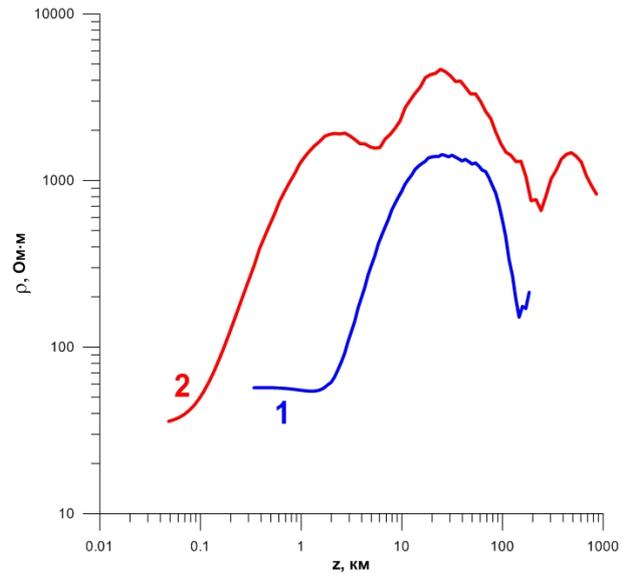


Рис. 11. Результаты 1D-инверсии
 для Пежострова:
 получены обработкой временных рядов (1);
 2D-моделированием (2)

К статье Фадеевой Н. В., Бызова Д. Д. «Моделирование областей нулевого гравитационного потенциала»

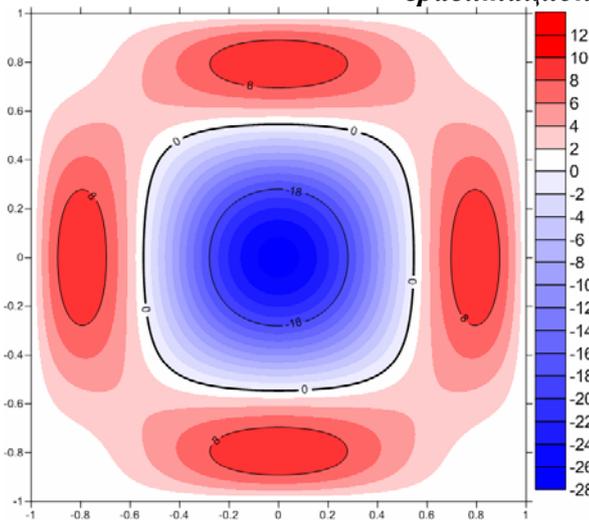


Рис. 2. Область 1

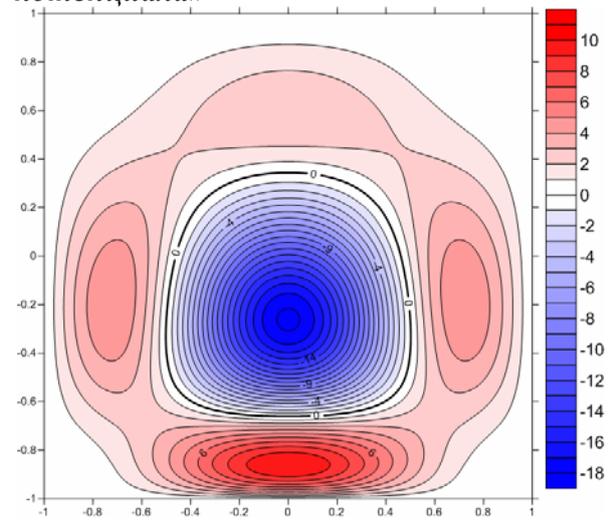


Рис. 3. Область 2

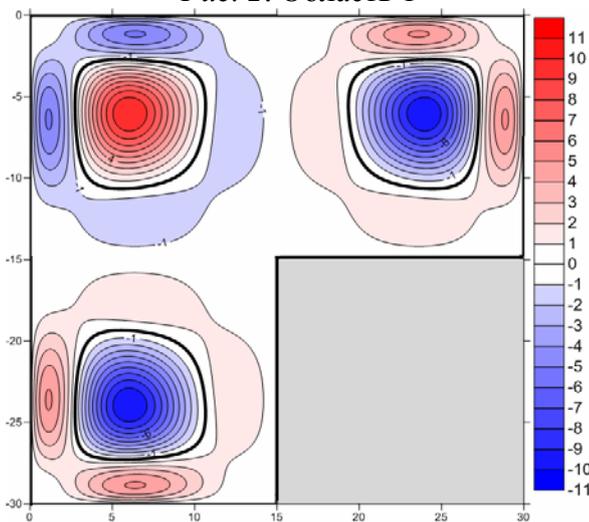


Рис. 4. Область 3

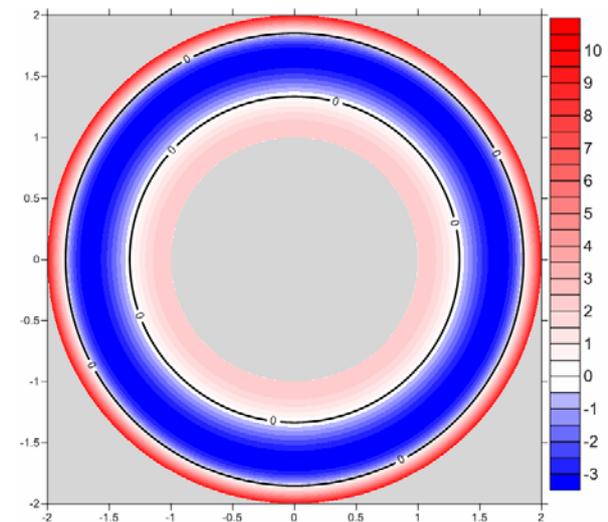
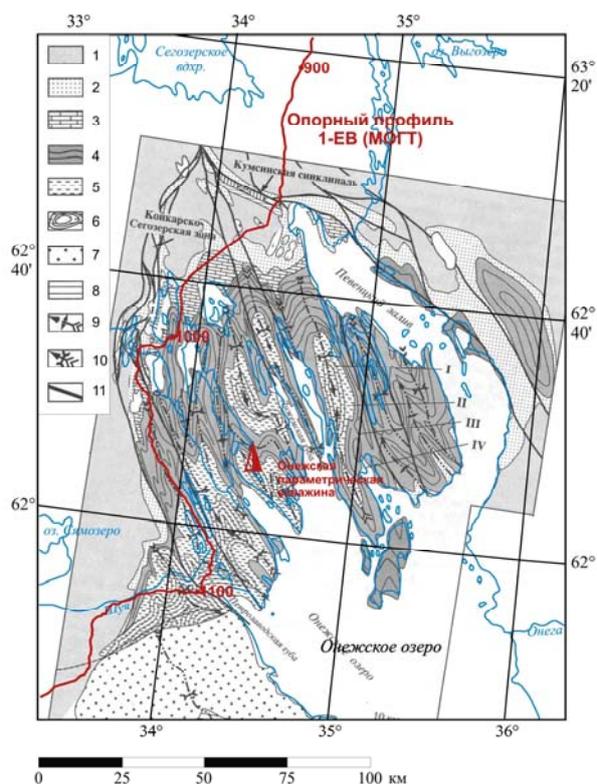


Рис. 5. Область 4

К статье Голышевой Ю. С. «Применение 3D-плотностного моделирования при создании Онежской «опорной площадки»



Основа - структурно-геологическая схема Онежской мульды по М.Г. Леонову, 2008 (составил С.Ю. Колодяжный с использованием данных [Войтович В.С., 1971; Новикова А.С., Чахмахчев В.Г., 1967; Сыстра Ю.Й., 1991], фондовых материалов и личных наблюдений)

Рис. 1. Обзорная схема района работ

- 1 – архейские комплексы; 2–7 – раннепротерозойские комплексы проточехла:
- 2 – сумий, сарилий, нижний ятулий (сегозерская серия: янгозерская, медвежьегорская свиты);
- 3 – верхний ятулий (туломозерская свита); 4, 5 – людиковый: 4 – заонежская свита;
- 5 – суйсарская свита; 6 – ливий (калевий) (кондопожская, вазезерская свиты);
- 7 – вепсий (петрозаводская, шокшинская свиты); 8 – вендские отложения;
- 9, 10 – осевые плоскости антиклиналей (9) и синклиналей (10); 11 – взбросо-сдвиги, сдвиги.

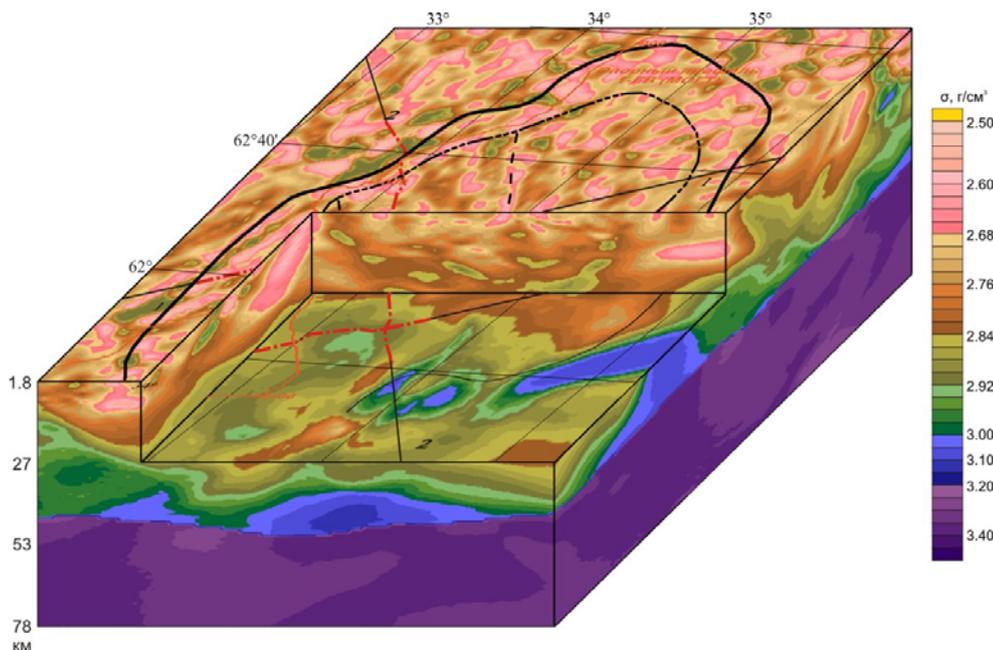


Рис. 2. 3D-модель распределения плотностных неоднородностей

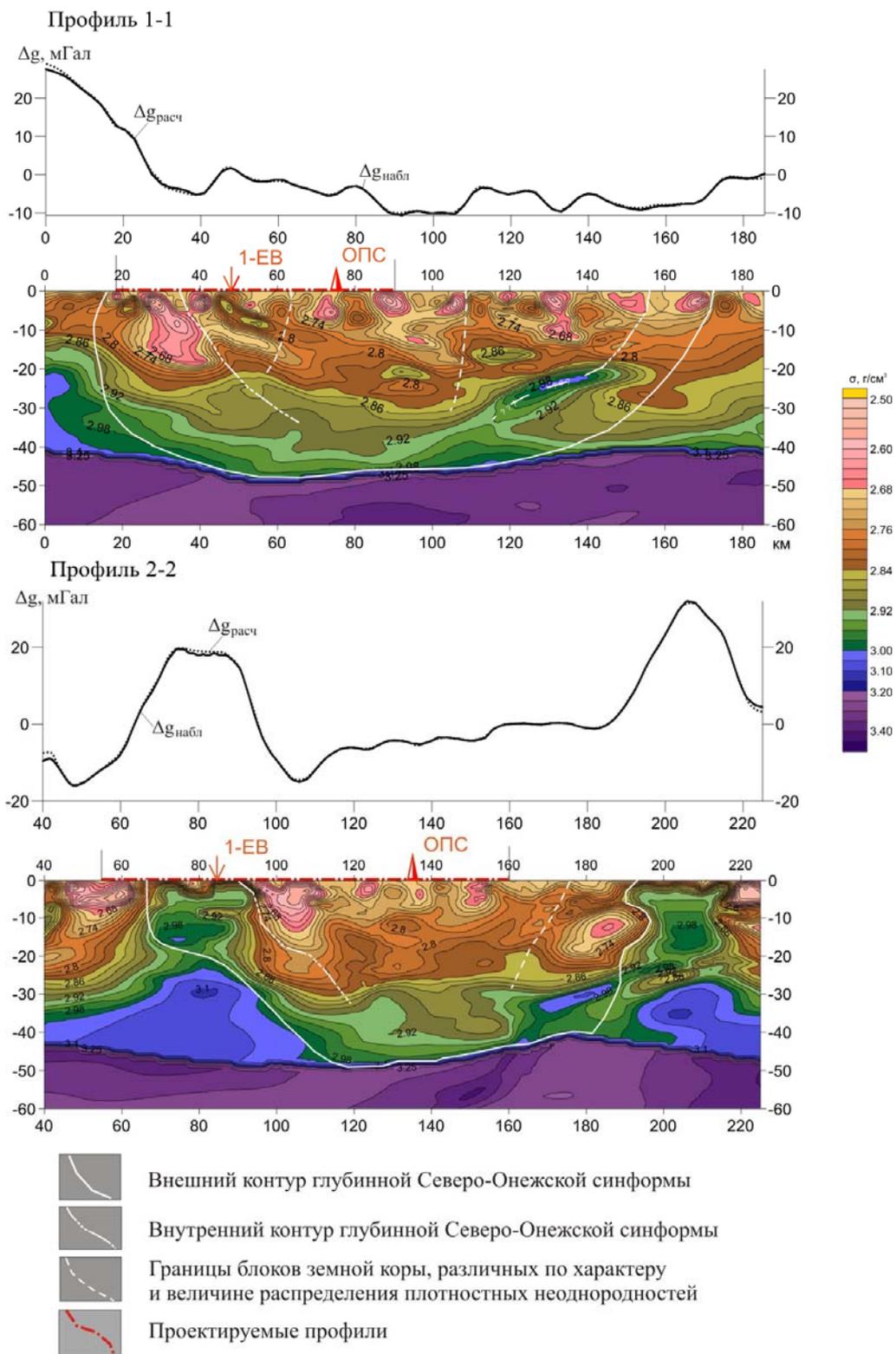


Рис. 3. Вертикальные срезы земной коры

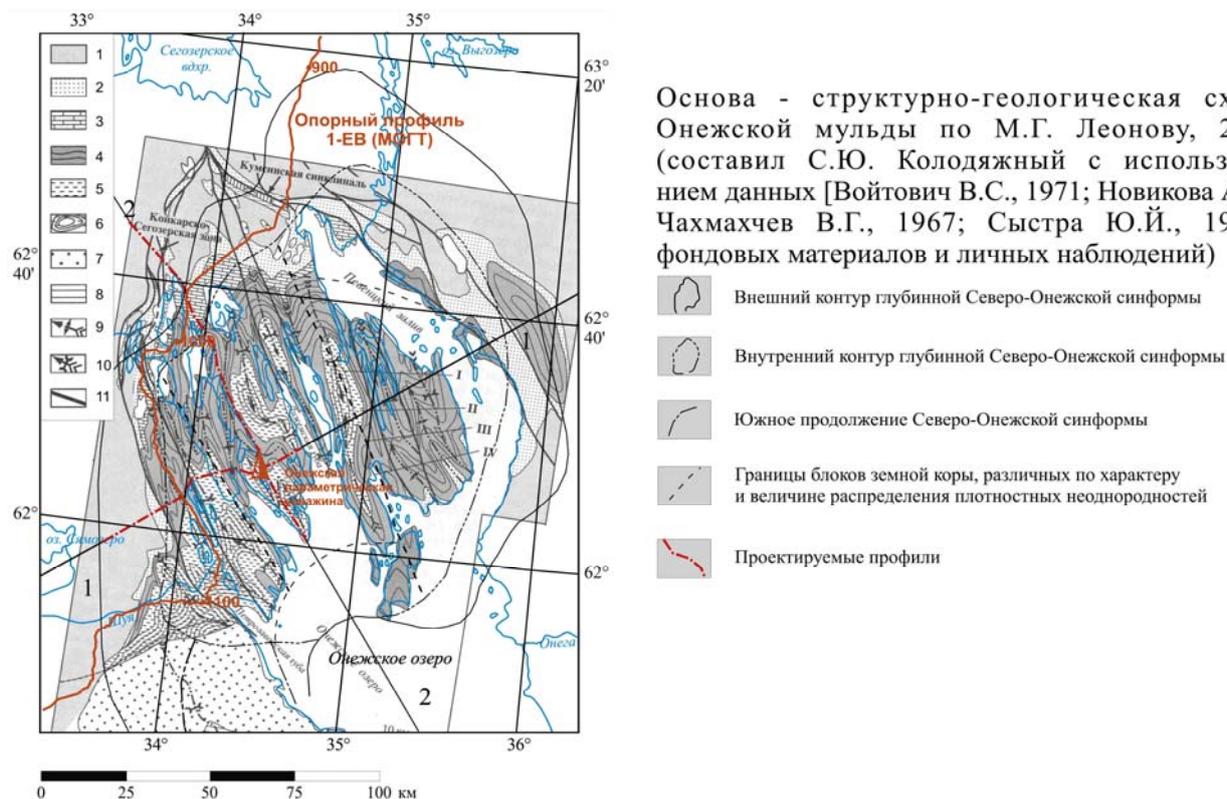
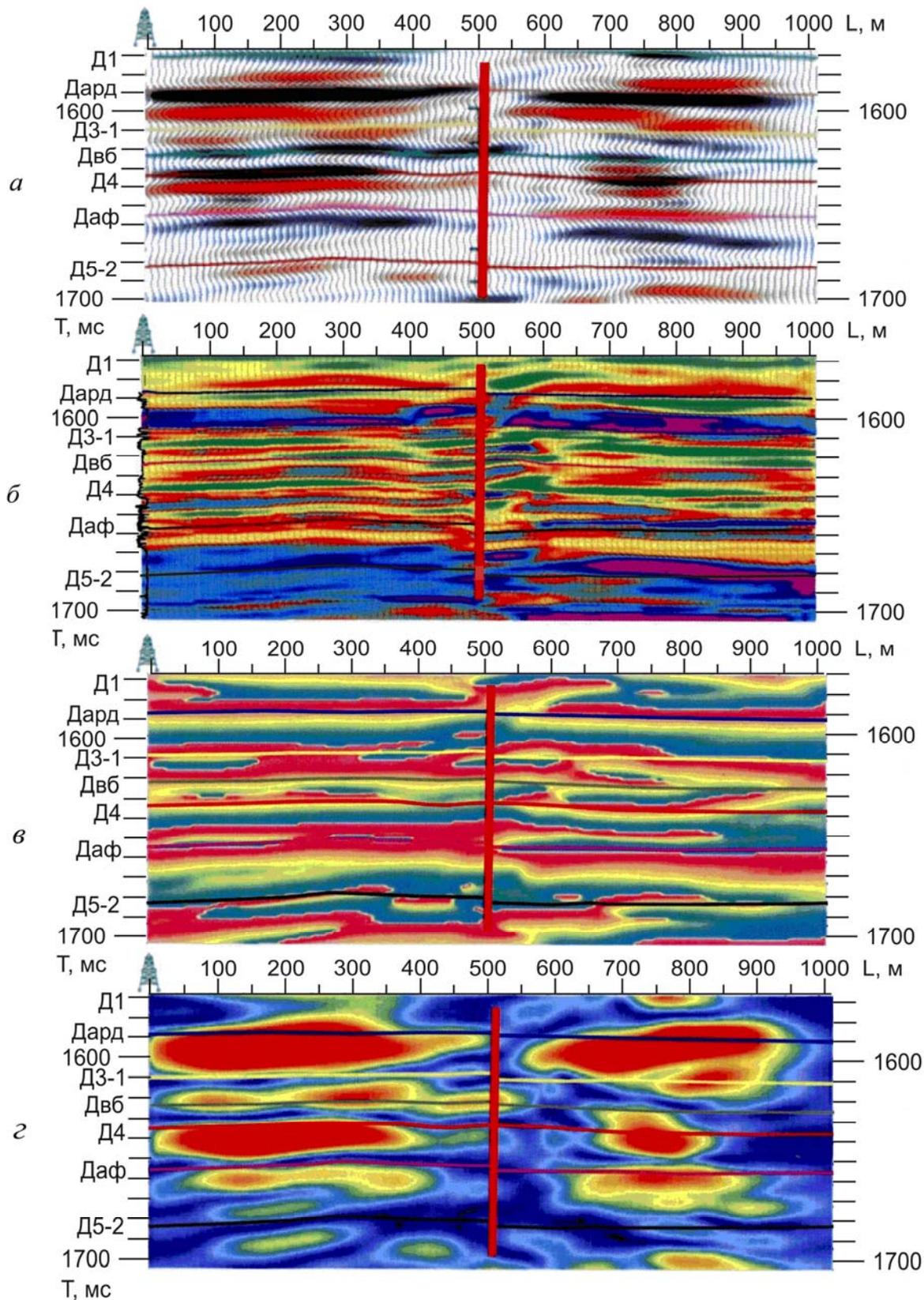


Рис. 4. Схема расположения проектируемых профилей

- 1 – архейские комплексы; 2–7 – раннепротерозойские комплексы проточехла:
 2 – сумий, сариолий, нижний ятулий (сегозерская серия: янгозерская, медвежьегорская свиты);
 3 – верхний ятулий (туломозерская свита); 4, 5 – людиковий: 4 – заонежская свита;
 5 – суйсарская свита; 6 – ливий (калевий) (кондопожская, вашезерская свиты);
 7 – вепсий (петрозаводская, шокшинская свиты); 8 – вендские отложения;
 9, 10 – осевые плоскости антиклиналей (9) и синклиналей (10); 11 – взбросо-сдвиги, сдвиги.

К статье Иркабаева Д. Р., Адиева А. Я. «Прогноз структуры и коллекторских свойств пород в околоскважинном пространстве на основе данных ВСП, НВСП»



*Рис. 1. Выделение тектонических нарушений на основе данных НВСП:
 а – временной сейсмический разрез; б – разрез акустического продольного импеданса;
 в – разрез мгновенных фаз; г – разрез мгновенных амплитуд*

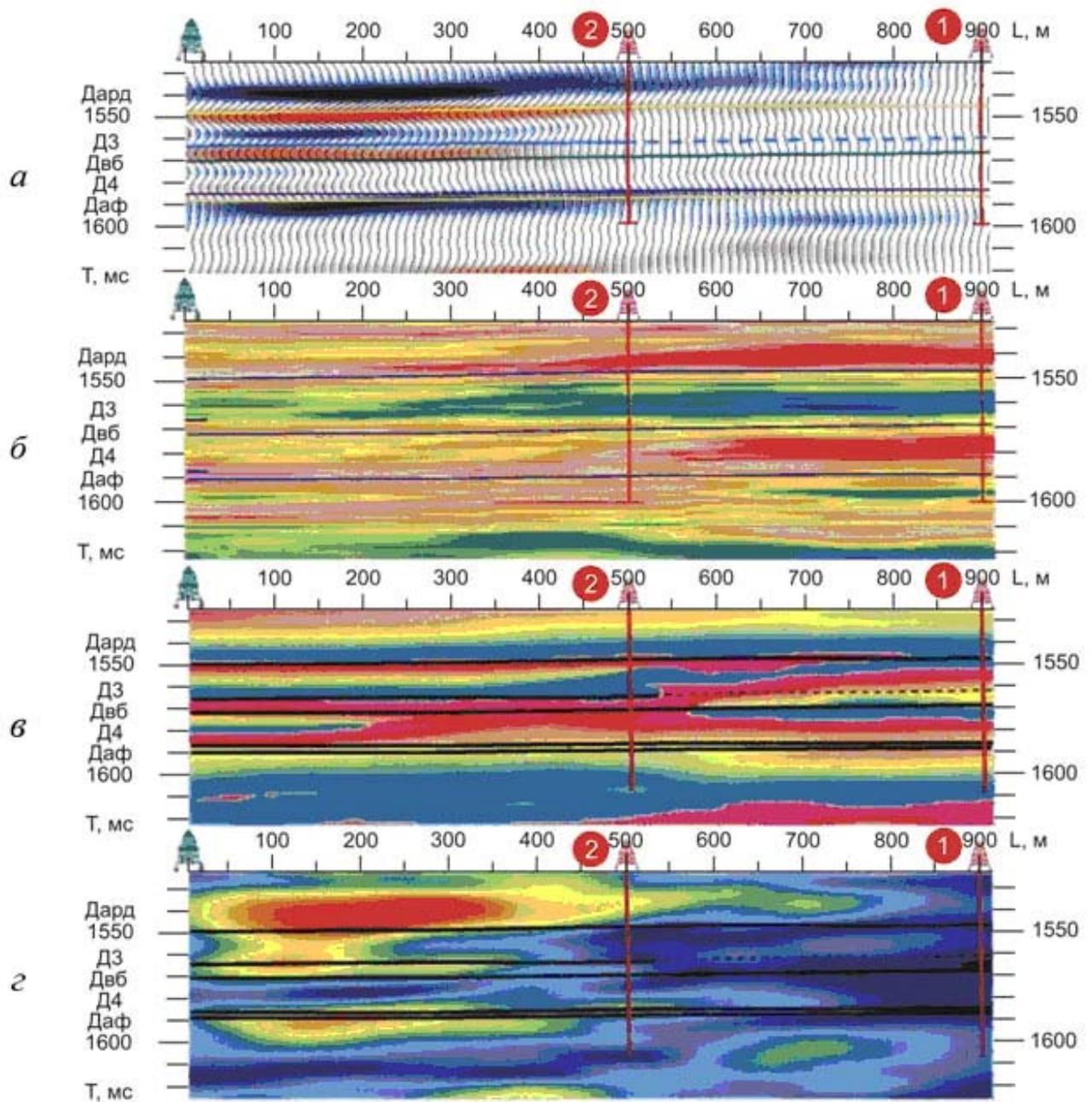


Рис. 2. Определение участков околоскважинного пространства с улучшенными коллекторскими свойствами по данным НВСП:
а – временной сейсмический разрез; *б* – разрез акустического продольного импеданса;
в – разрез мгновенных фаз; *г* – разрез мгновенных амплитуд

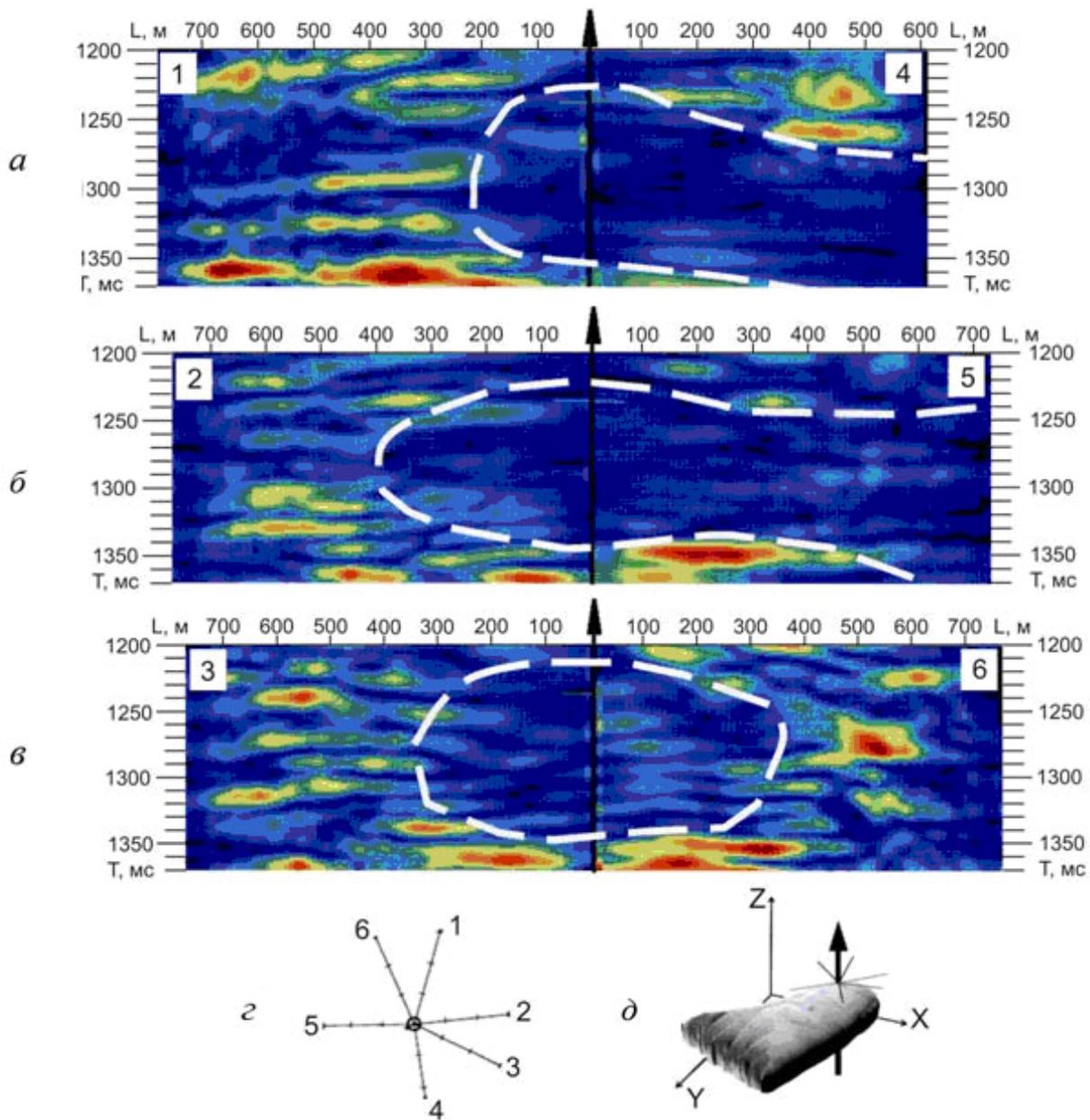


Рис. 3. Изучение по сейсмическим данным НВСП биогермной постройки:

a – в – разрезы мгновенных амплитуд по направлению профилей ;
г – схема профилей; *д* – объемная модель постройки

К статье Коваленко К. В., Дешененкова И. С. «Расчет сжимаемости коллекторов нефти и газа при различном насыщении для упругого моделирования месторождений»

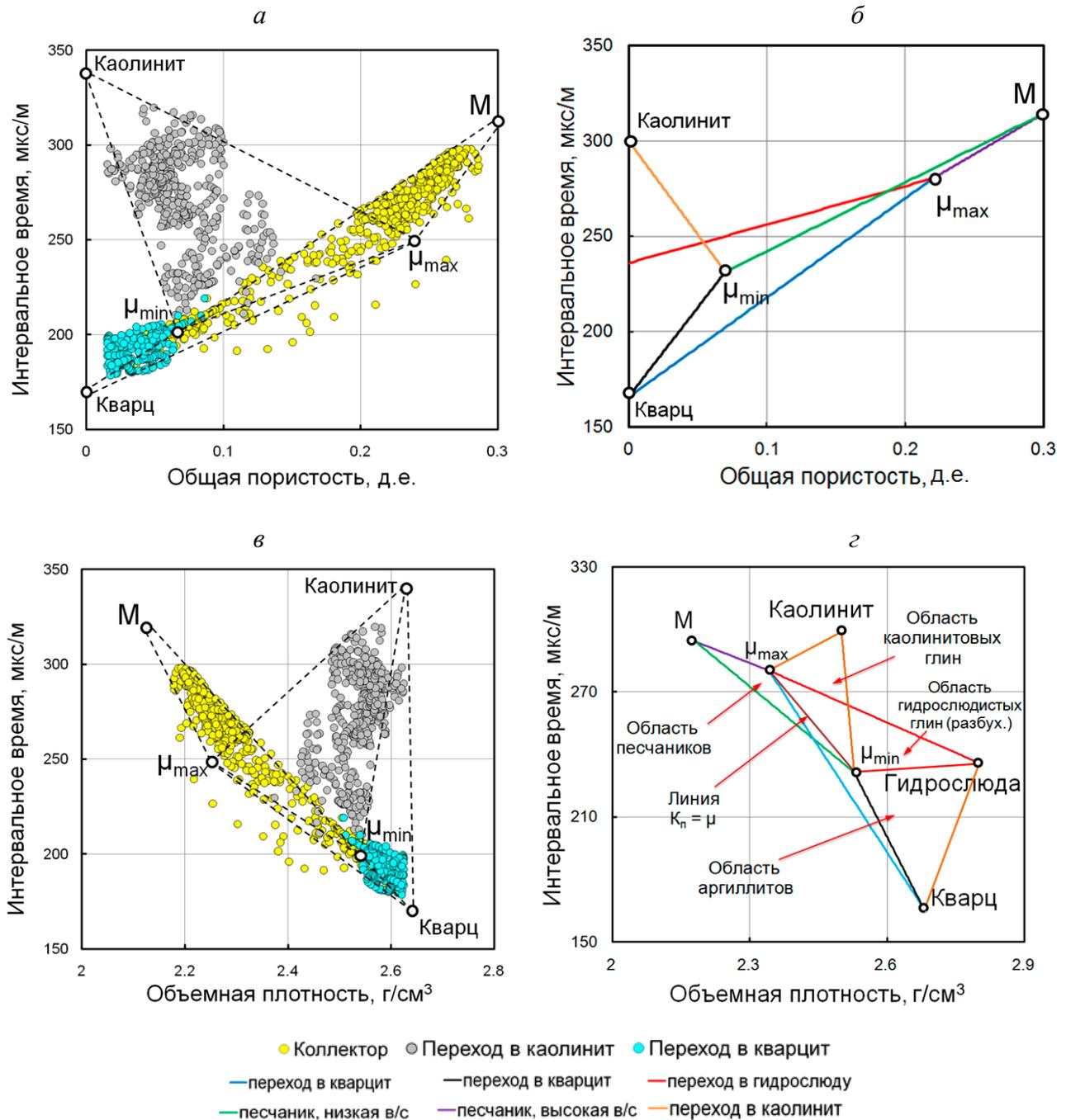


Рис. 1. Результаты моделирования зависимости показаний методов ГИС от общей пористости для различного литологического состава изучаемых отложений и отражение моделей на фактических данных:

a, б – модельные представления и фактические зависимости интервального времени от общей пористости; в, г – модельные представления и фактические зависимости интервального времени от объемной плотности

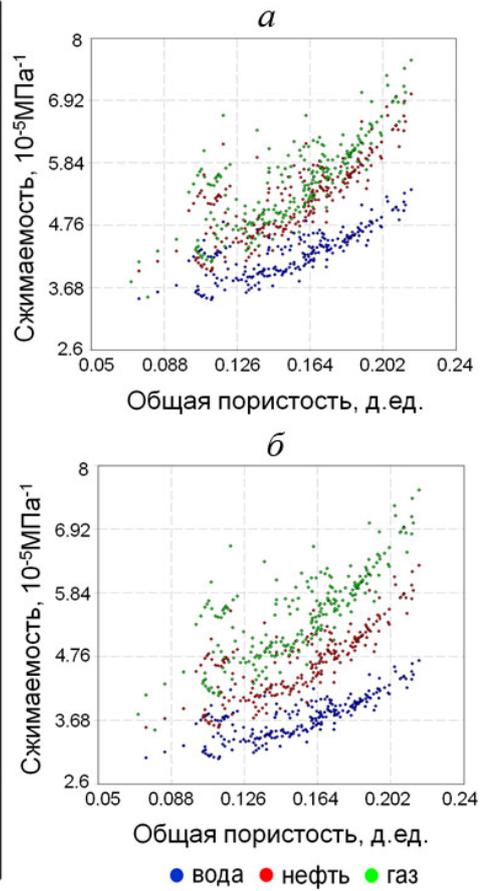
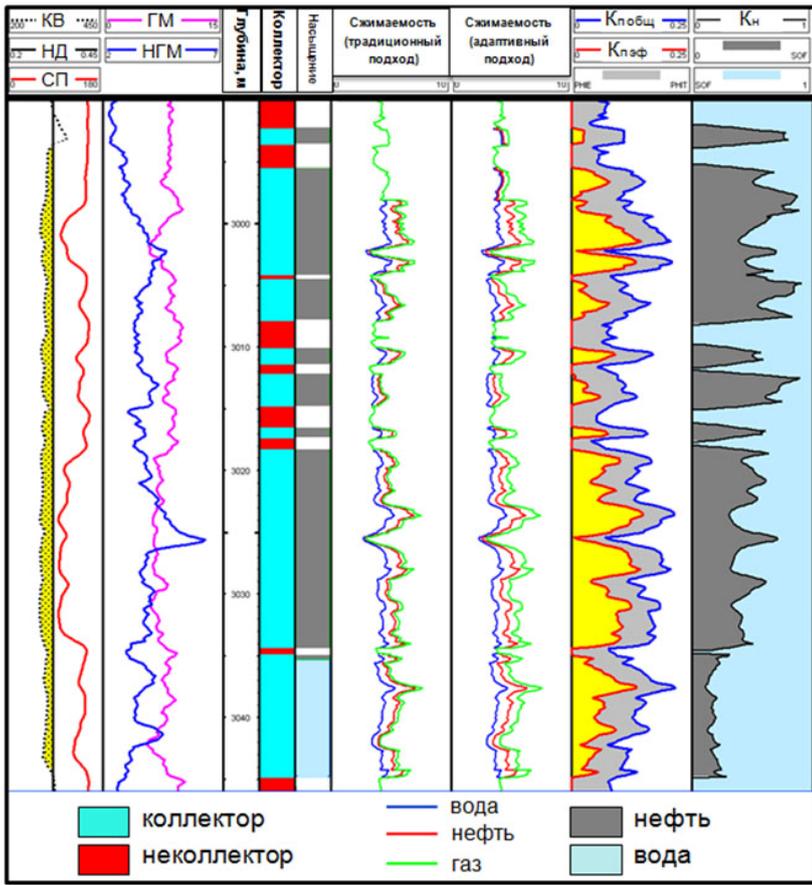


Рис. 3. Разделение коллекторов по упругим свойствам в зависимости от типа флюида по результатам флюидозамещения по традиционной и модифицированной модели Гассмана (сравнение объемных сжимаемостей)

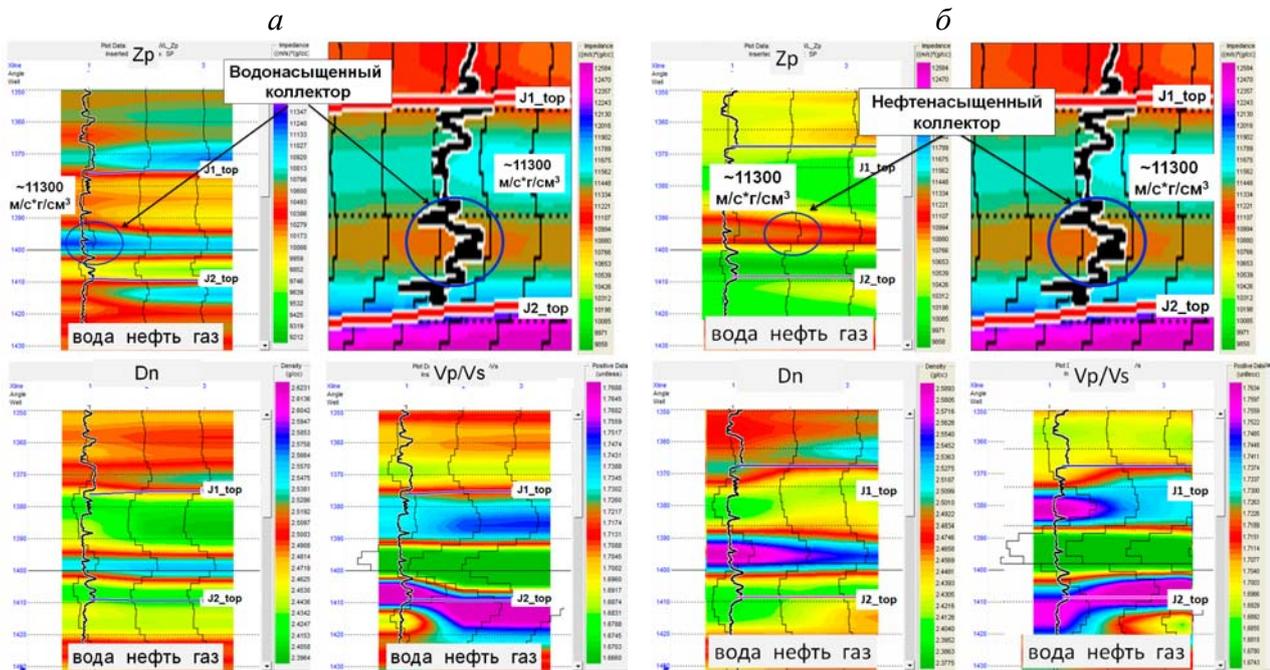


Рис. 4. Сопоставление результатов синхронной инверсии модельных сейсмограмм при различном насыщении коллекторов: для традиционной (а) и модифицированной (б) модели с результатами инверсии полевых сейсмических данных

К статье Коваленко К. В., Дешененкова И. С., Петрова А. Н. «Применение модели капиллярного давления при геологическом моделировании коллекторов в концепции эффективного порового пространства»

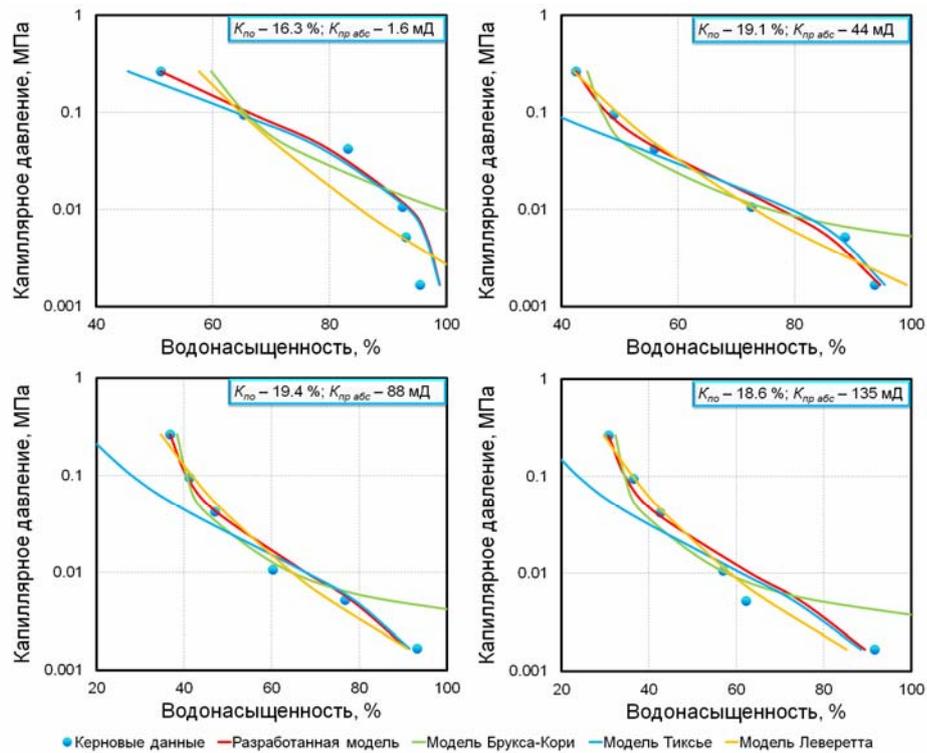


Рис. 1. Сопоставление моделей капиллярных давлений для представительной коллекции юрских песчаников Западной Сибири. ФЕС образцов

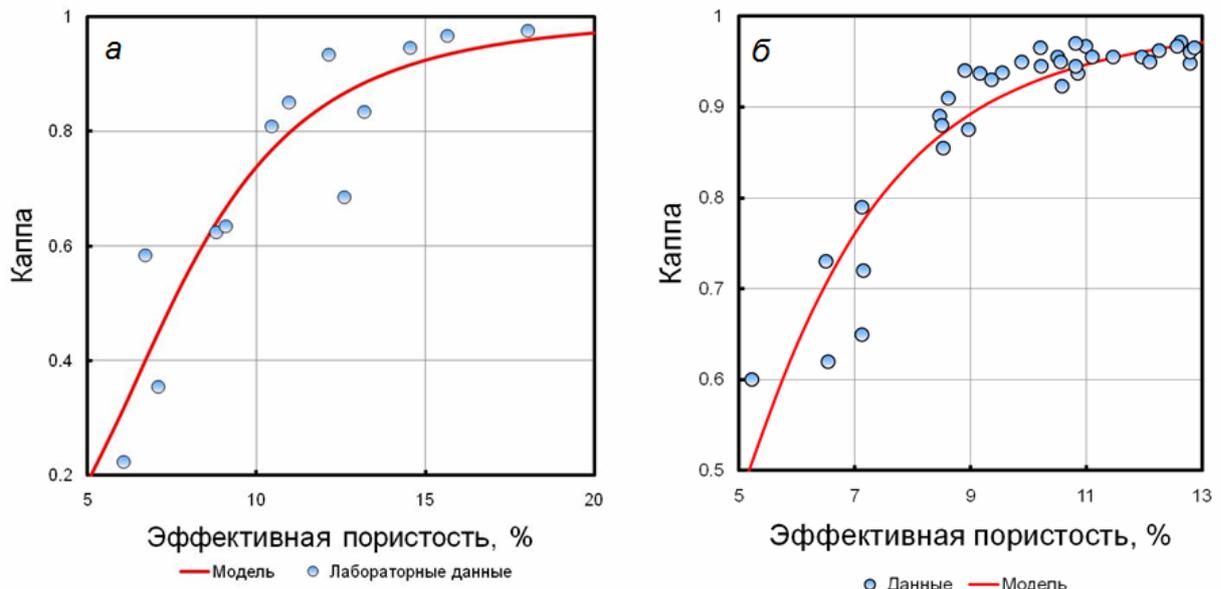


Рис. 2. Связь параметра каппа (κ) с эффективной пористостью, результаты обработки капиллярных кривых и модель (по формуле 8)
а – север; *б* – юг Западной Сибири

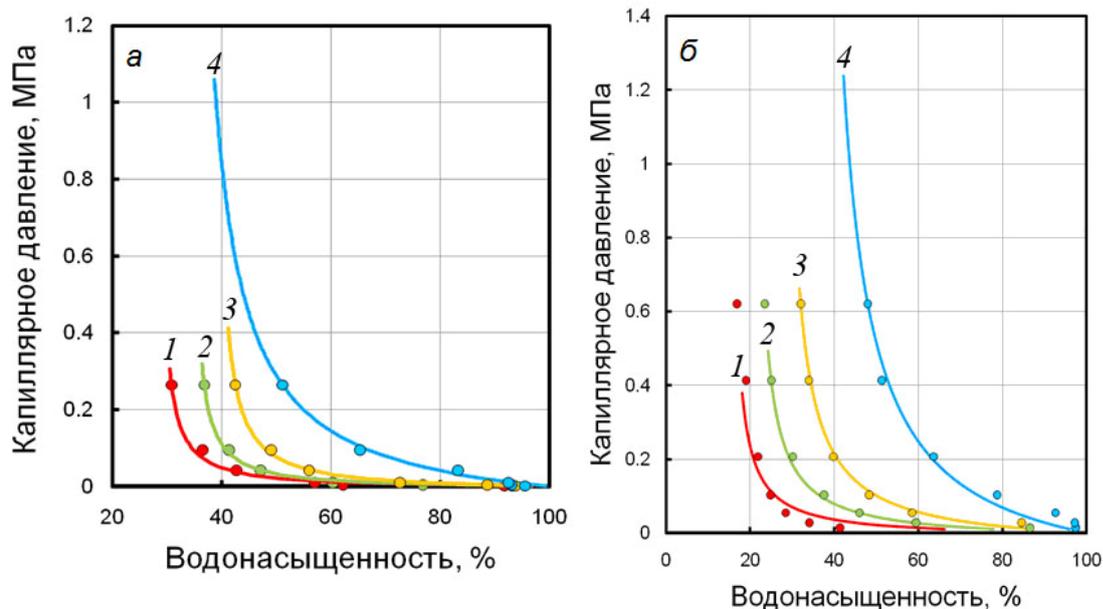


Рис. 3. Связь капиллярного давления с текущей водонасыщенностью, измеренные и рассчитанные по формуле (13) значения для коллекторов
a – север; *б* – юг Западной Сибири.

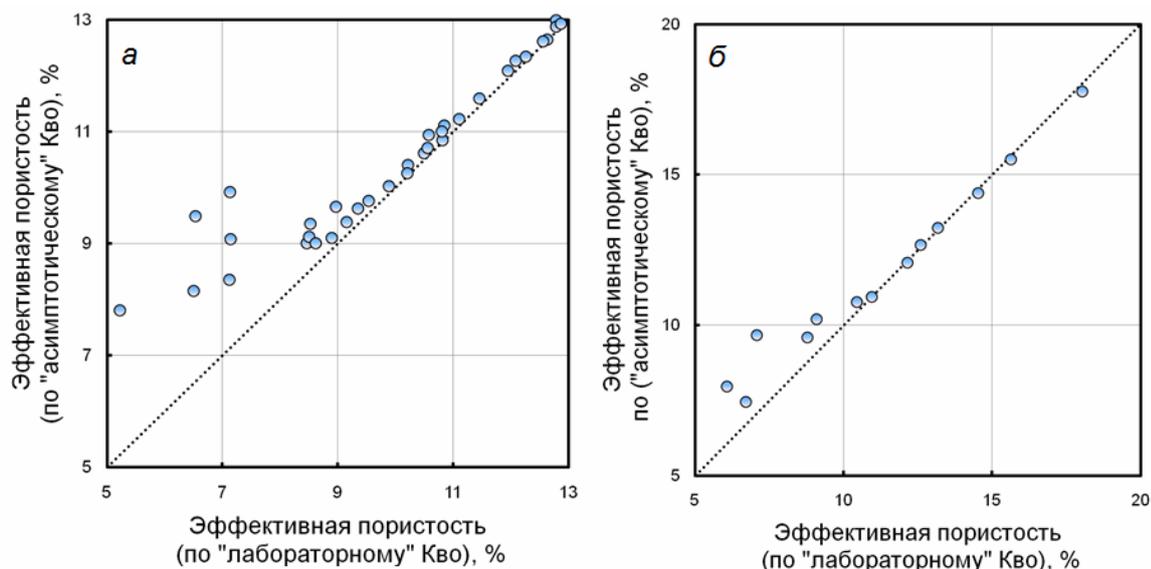


Рис. 4. Изменение величины эффективной пористости, при переходе от «лабораторного» $K_{во}$ к расчетному «асимптотическому»
a – север; *б* – юг Западной Сибири

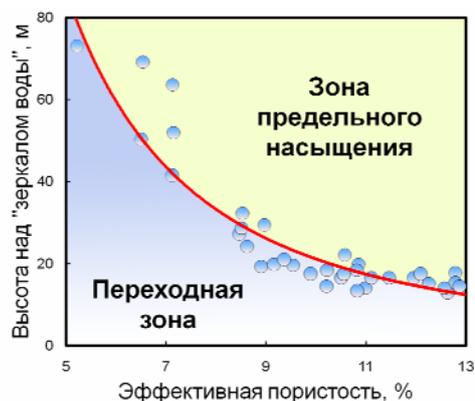


Рис. 5. Связь высоты зоны предельного насыщения над ЗЧВ, рассчитанного по формулам (13) и (15), с эффективной пористостью

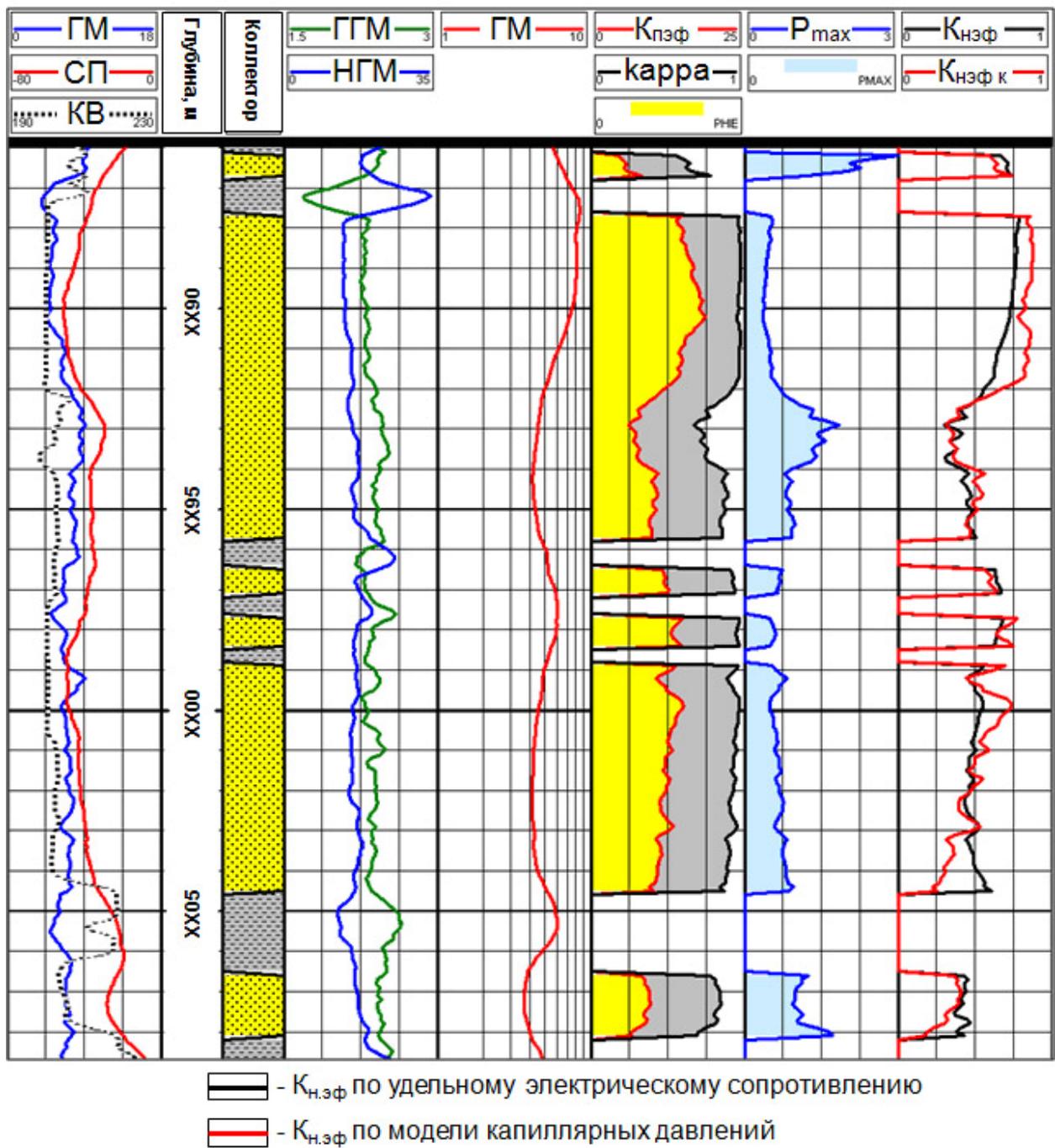


Рис. 6. Пример практической реализации методики для средне и мелкозернистых юрских песчаников Западной Сибири

К статье Красинского Е. М. «Опыт использования крупномасштабных аэромагнитных съемок при создании геофизической основы (ГФО) масштаба 1:1 000 000 Государственной Геологической карты третьего поколения (ГГК-1000/3) на примере листа Q-41»

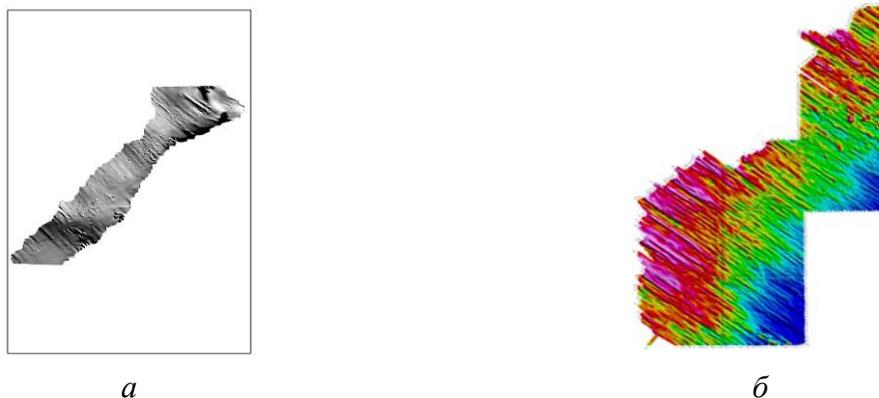


Рис. 1. Примеры недоувязанных аналоговых материалов по листу Q-41:

а – грид аномального магнитного поля, созданный по оцифрованным картам изолиний масштаба 1:100 000;
б – грид аномального магнитного поля, созданный по оцифрованным картам графиков масштабов 1:50 000, 1:25 000

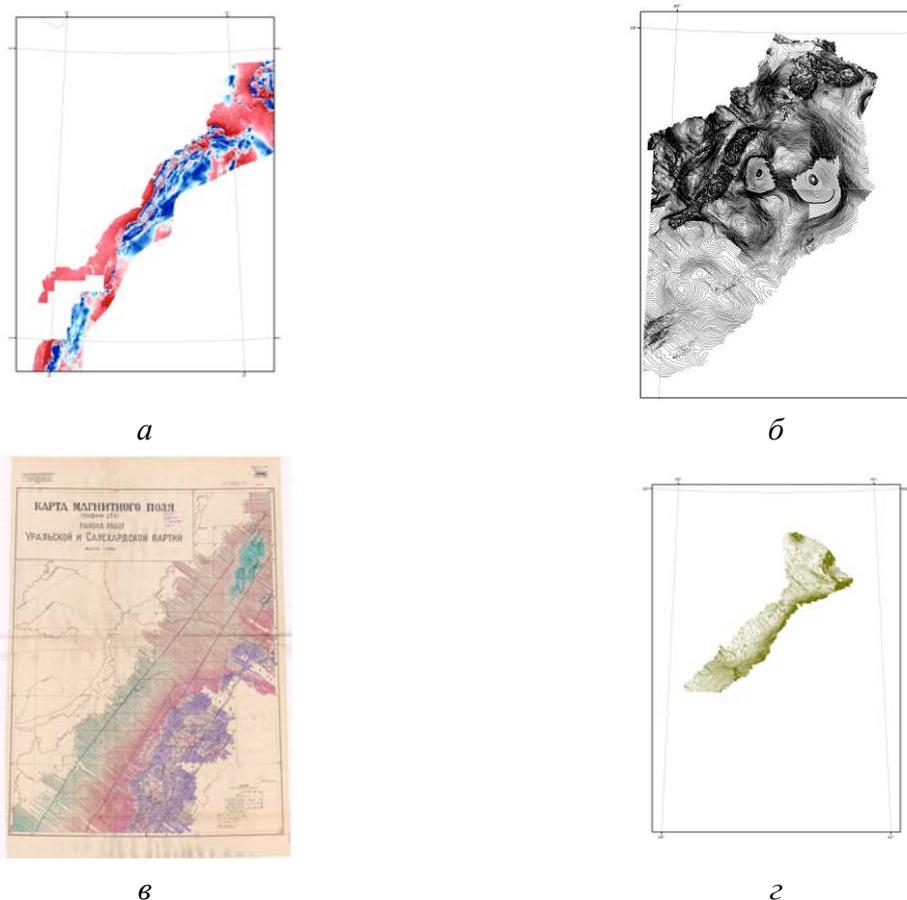


Рис. 2. Исходные материалы, использованные для актуализации листа Q-41:

а – современные цифровые материалы аэромагнитной съёмки масштаба 1:50 000;
б – аналоговые карты изолиний аномального магнитного поля масштаба 1:50 000;
в – аналоговые карты графиков аномального магнитного поля масштаба 1:50 000, 1:25 000;
г – аналоговые карты изолиний аномального магнитного поля масштаба 1:100 000

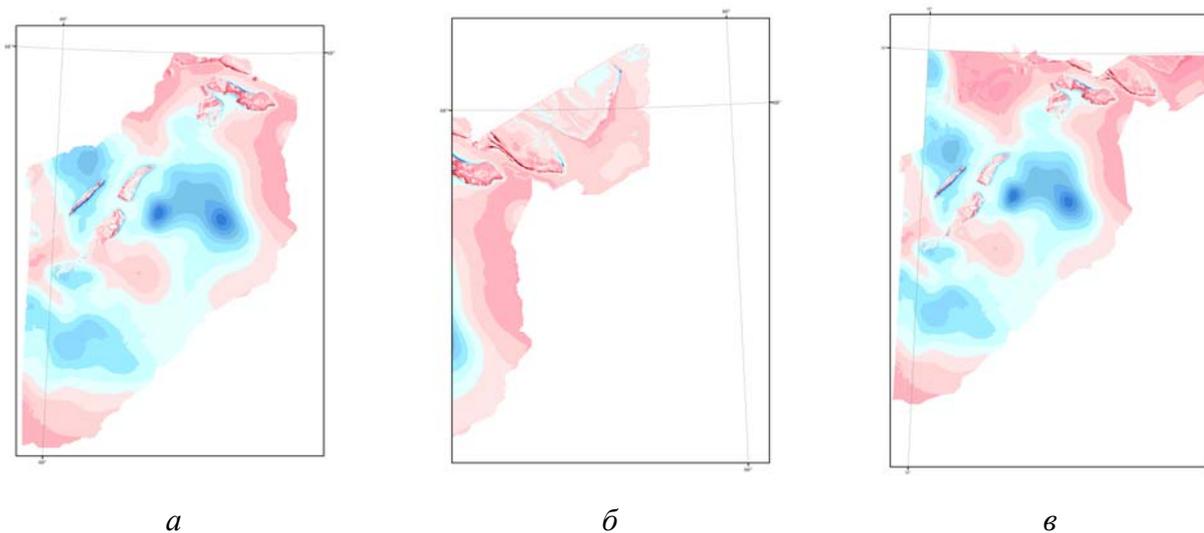


Рис. 3. Процесс внешней увязки исходных оцифрованных материалов и создания единого массива данных для последующей актуализации листа Q-41:
a – увязка базового грида и грида, полученного по съёмке [2]; *б* – увязка базового грида и грида, полученного по съёмке [3];
в – итоговый грид для последующей актуализации листа Q-41

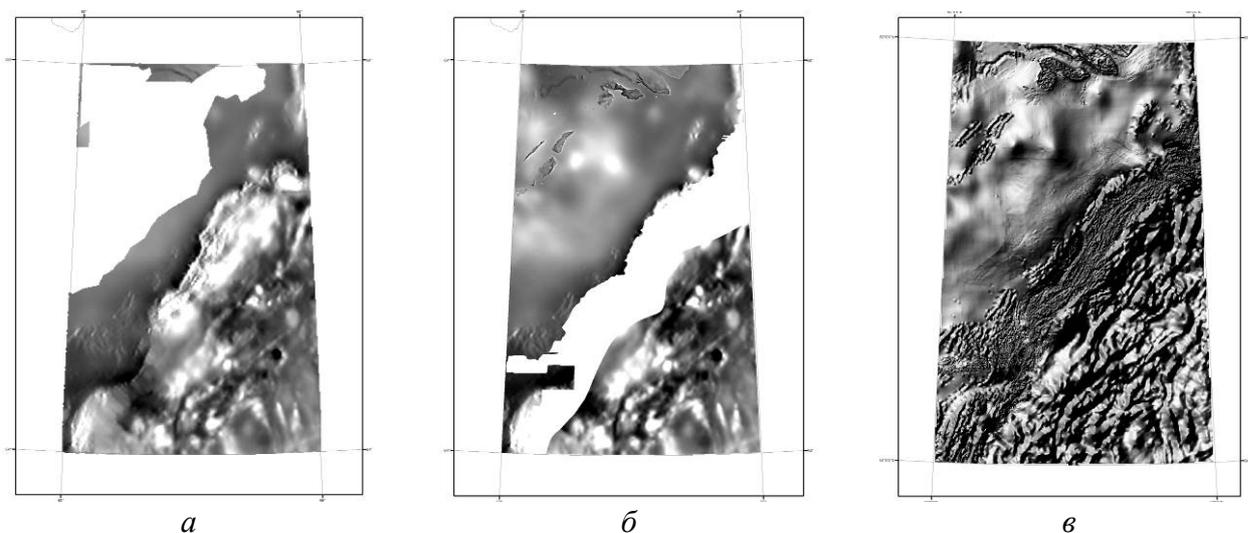
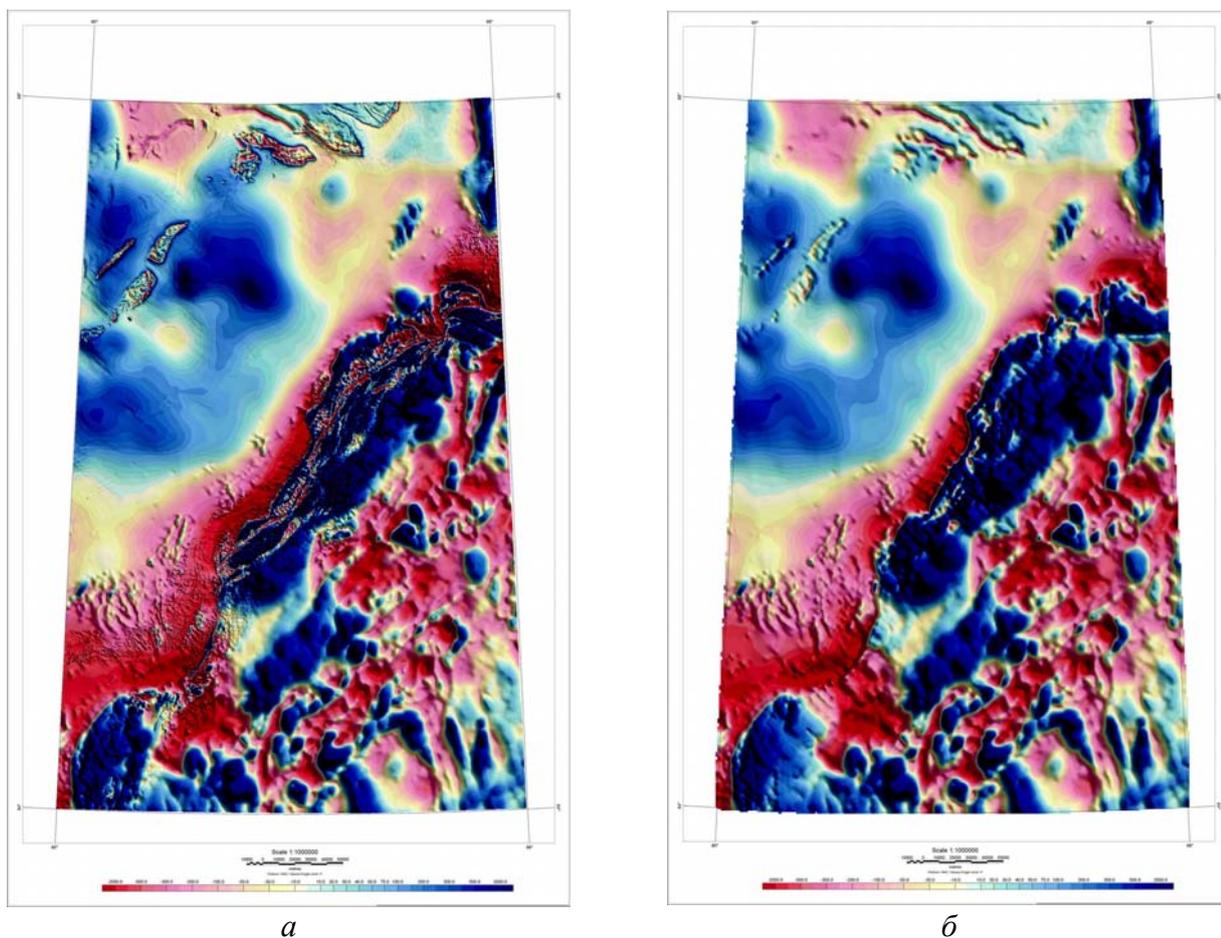


Рис. 4. Последовательность процесса актуализации листа Q-41:
a – актуализация базовой матрицы (1×1 км) гридом, полученным из оцифрованных карт изолиний масштаба 1:50 000 (0,25×0,25 км); *б* – актуализация базовой матрицы (1×1 км) гридом, полученным на основе современных аэромагнитных съёмок (0,1×0,1 км); *в* – итоговая актуализированная матрица (0,25×0,25 км) по листу Q-41



*Рис. 5. Цифровая карта аномального магнитного поля по листу Q-41, созданная:
 а – в рамках проекта по актуализации комплектов ГФО-1000, ВСЕГЕИ, 2011; б – в рамках подготовки комплекта карт
 геофизической основы Геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 лист Q-41,42 (Салехард),
 ВИРГ-Рудгеофизика, 1999*

К статье Эзирбаева Т. Б. «Обоснование моделей каротажа пористости для альб-аптских отложений Терско-Сунженской нефтегазоносной области»



Рис. 1. Схема трехкомпонентной модели терригенной породы

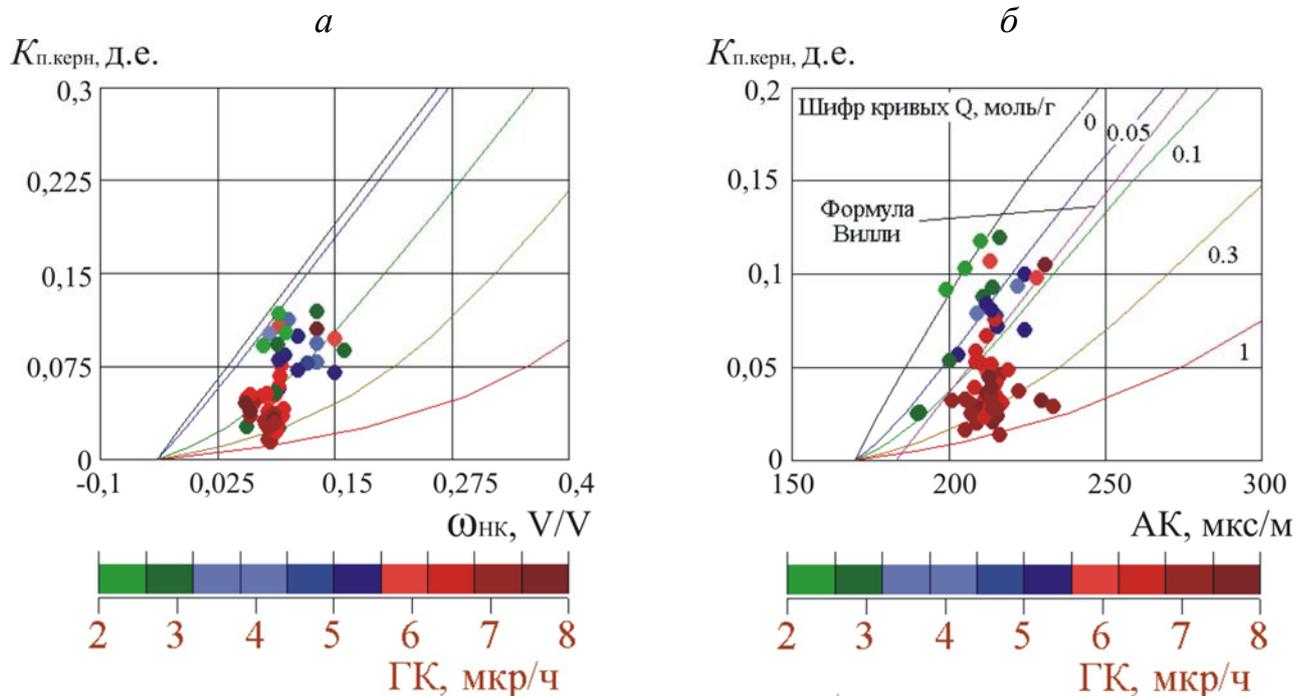


Рис. 2. Сопоставление пористости по керну и показаний водородосодержания (а) и АК (б) нижнемеловых пород по скважинам месторождений Терско-Сунженской нефтегазоносной области. Теоретические кривые рассчитаны по моделям (2) и (3)

К статье Буторина А. В. «Применение моделирования волновых полей для повышения достоверности результатов интерпретации сейсмической инверсии в сирачойских отложениях северной части Тимано-Печорской провинции»

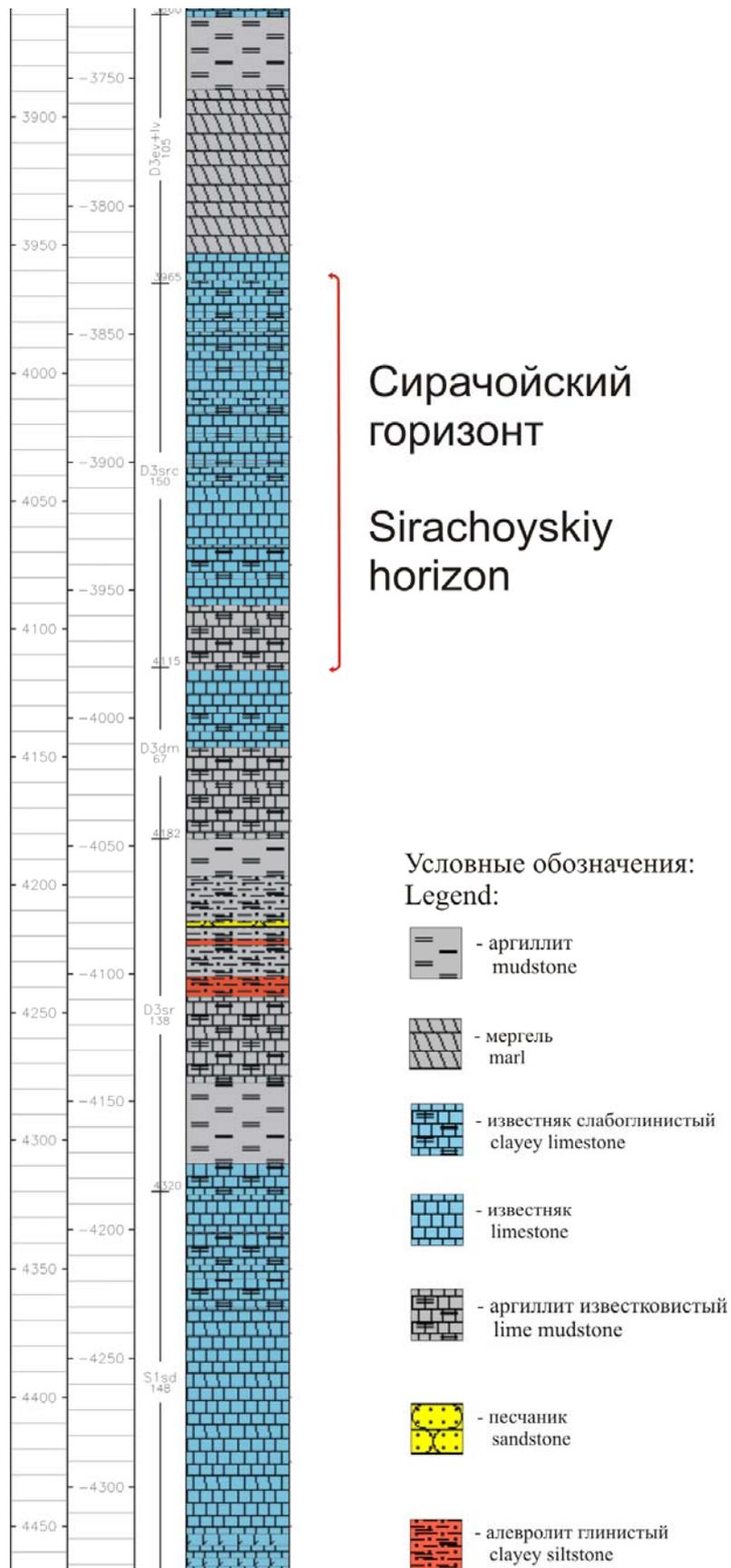


Рис. 1. Литологическая колонка изучаемого участка

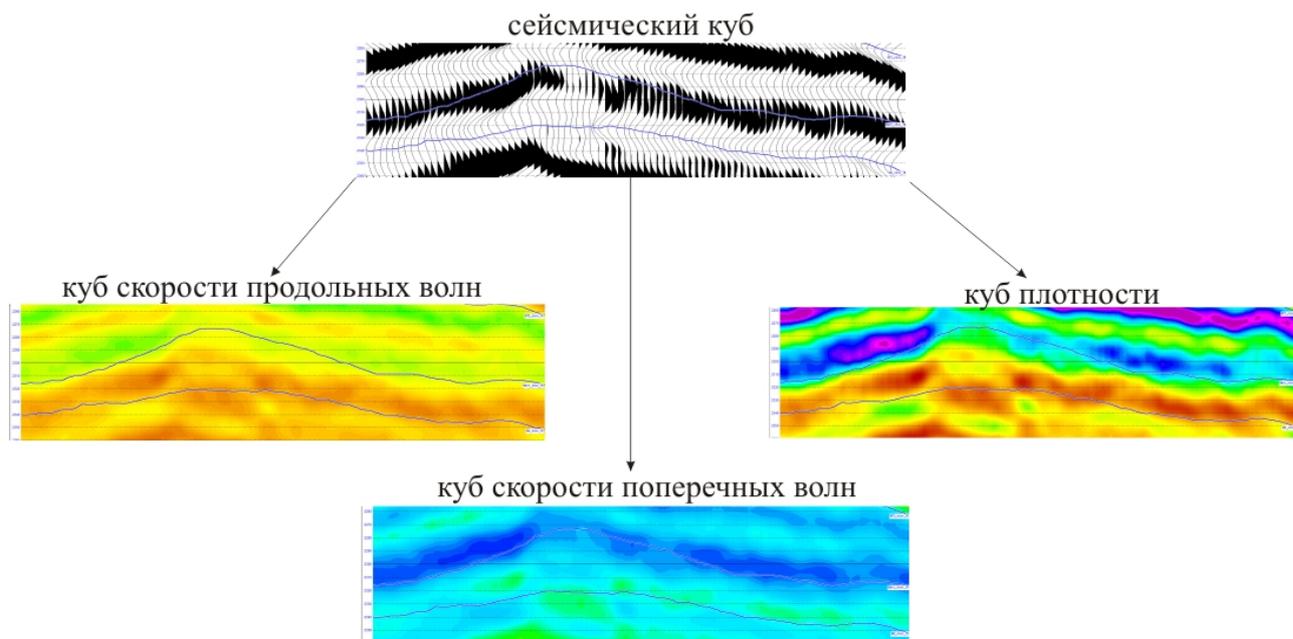


Рис. 2. Результат проведения упругой инверсии по интересующему участку разреза

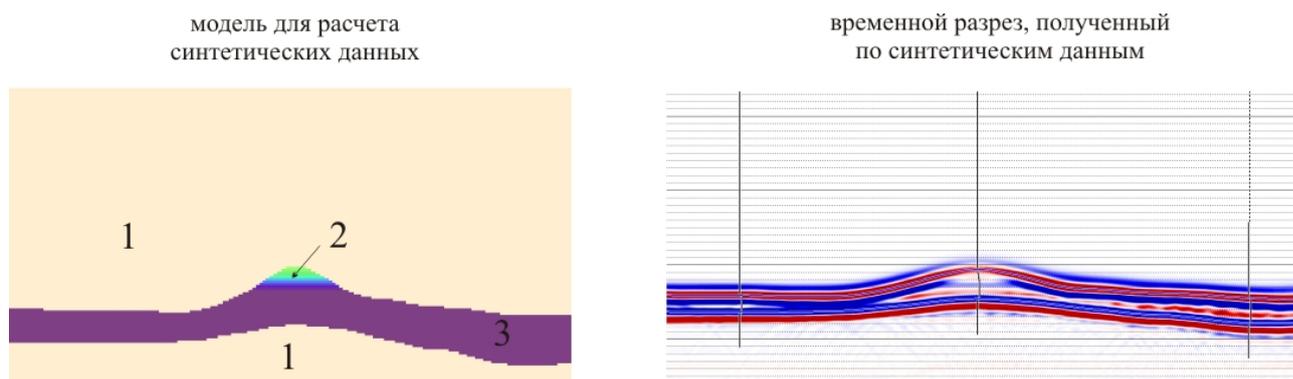


Рис. 3. Заданная модельная среда и полученный в результате обработки разрез ОГТ:
 1 – глинистые породы ($V_p = 5400$ м/с, $V_s = 3144$ м/с, $D = 2,56$ г/см³); 2 – купольная часть карбонатного пласта ($V_p = 5900-6350$ м/с, $V_s = 3449-3678$ м/с, $D = 2,64-2,76$ г/см³); 3 – карбонатный пласт ($V_p = 6350$ м/с, $V_s = 3678$ м/с, $D = 2,76$ г/см³)

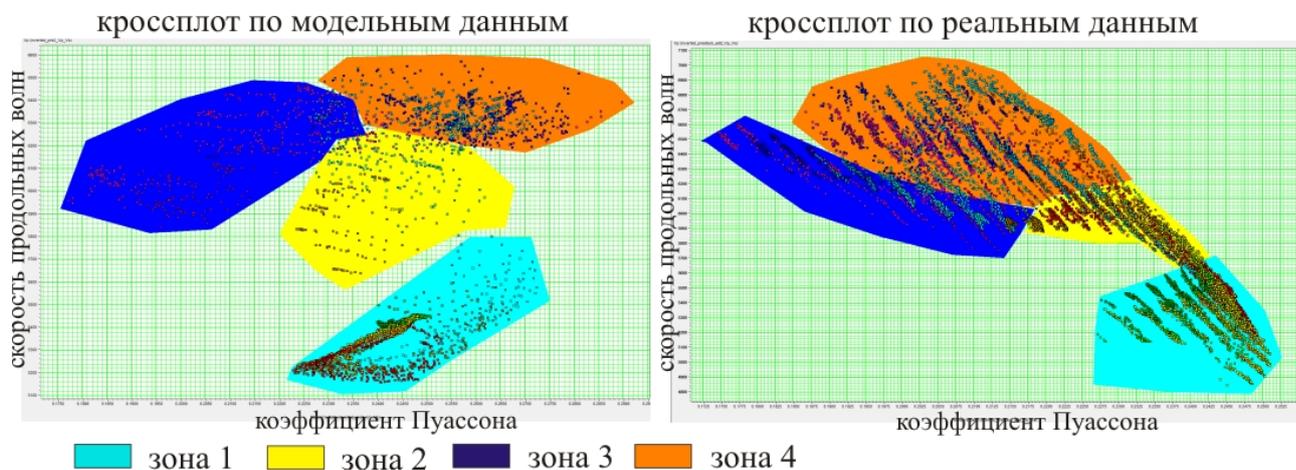


Рис. 4. Сопоставление кроссплотов, полученных по сейсмическим и модельным данным

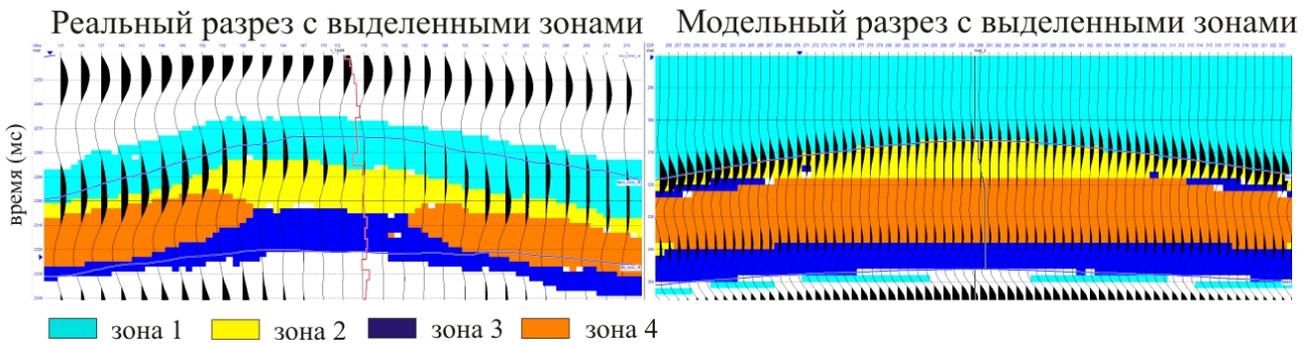


Рис. 5. Сопоставление разрезов, полученных по реальным и синтетическим данным цвета соответствуют выделенным на кроссплотах зонам

К статье Буториной М. А. «Оценка эффективности AVO-анализа сейсмических данных по опорному профилю 2-AP в Карском море»

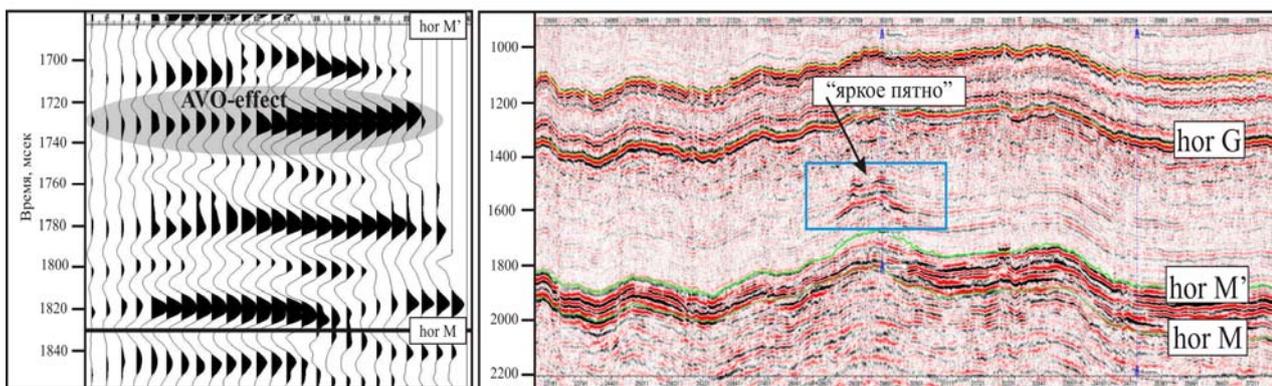


Рис. 1. Сейсмограмма с аномальным распределением амплитуд (слева) и фрагмент временного разреза по профилю 2-AP в районе месторождения Русановское (справа)

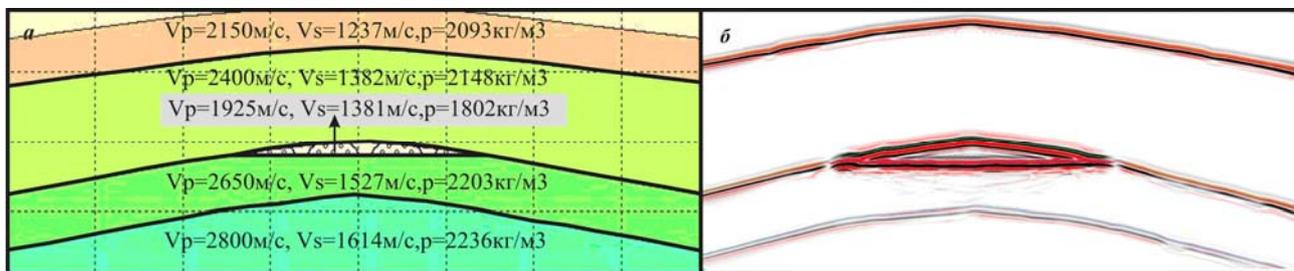


Рис. 2. Модель геологической среды (а) и полученный в результате обработки временной разрез (б)

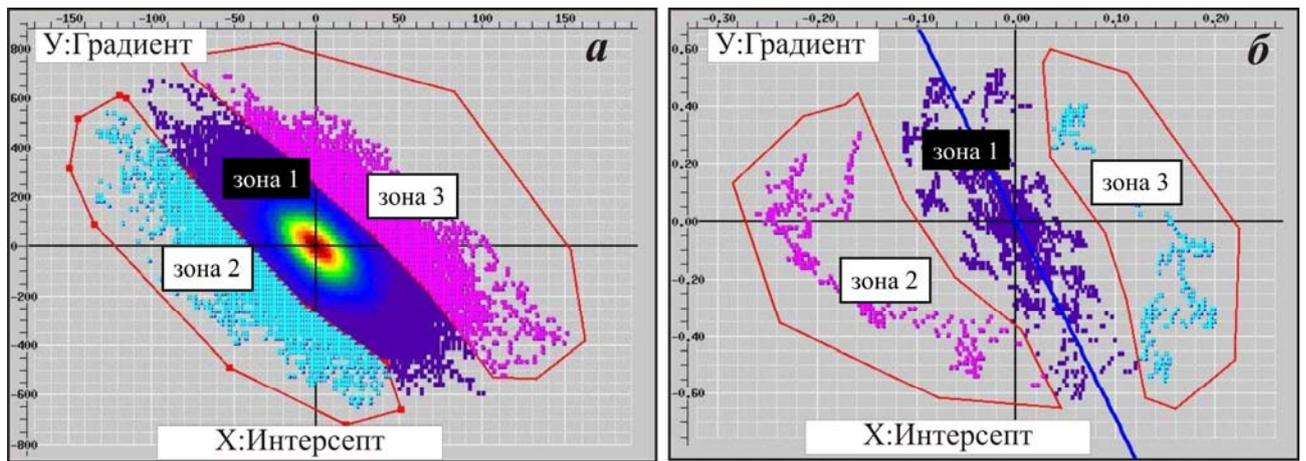


Рис. 3. Сопоставление кроссплотов с выделенными аномальными зонами по реальным (а) и по модельным данным (б)

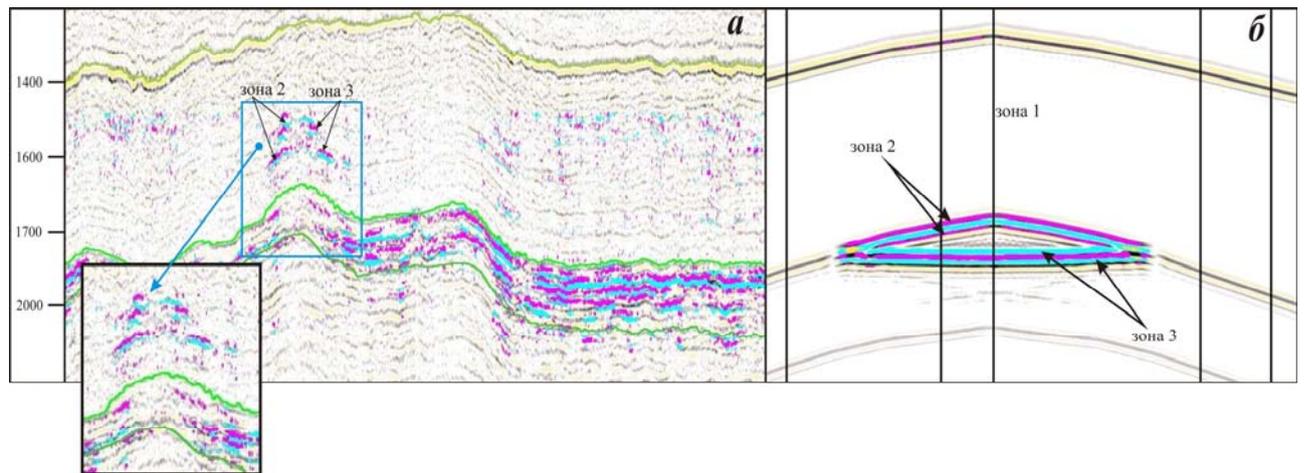


Рис. 4. Сопоставление временных разрезов с выделенными аномальными зонами кроссплотов по реальным (а) и по модельным данным (б)

К статье Половкова В. В. «Структура Челюскинская – перспективный на нефть и газ объект в Восточно-Сибирском море»

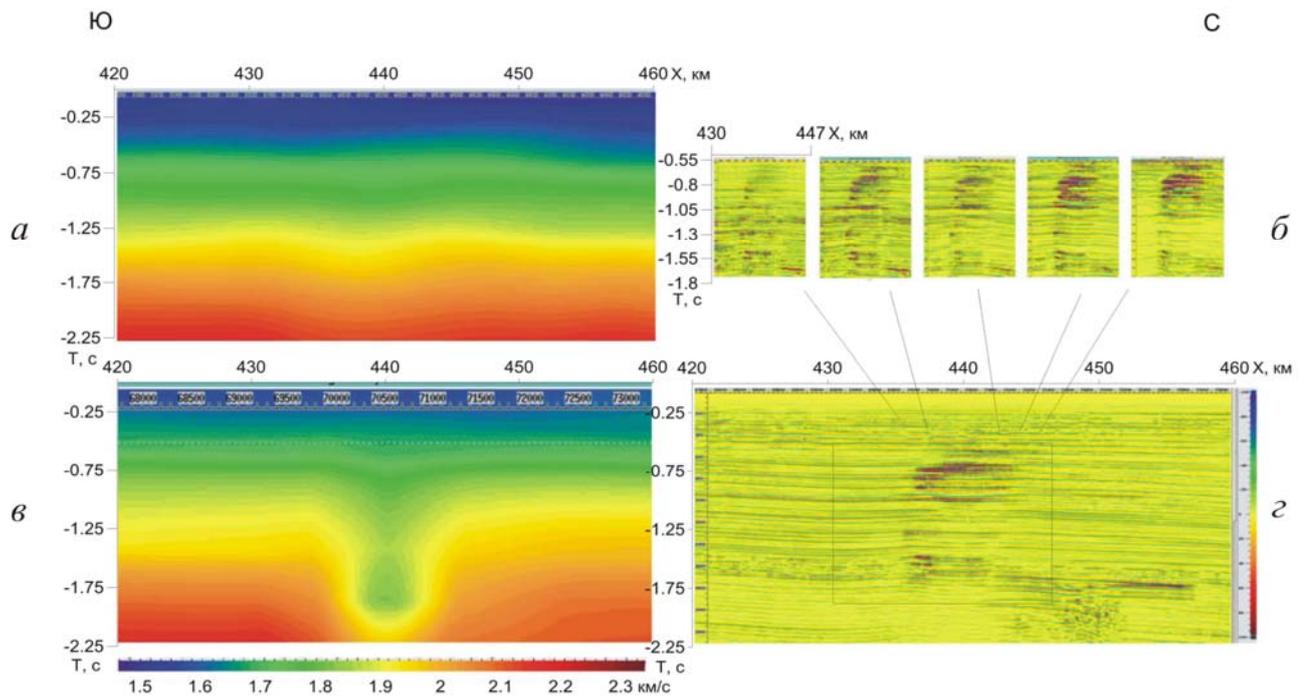


Рис. 1. Выделение залежи углеводородов в верхней части Северо-Чукотского прогиба:
а – фрагмент предварительного скоростного разреза; *б* – фрагмент угловых сумм, характеризующих изменение коэффициента Пуассона; *в* – фрагмент скоростного разреза после анализа горизонтальных спектров; *г* – разрез атрибута произведения константы Ламэ на плотность пород

К статье Глуценко М. Н., Соболева А. Ю. «Совместная интерпретация коротажных данных ВИКИЗ и БКЗ с использованием фильтрационного моделирования»

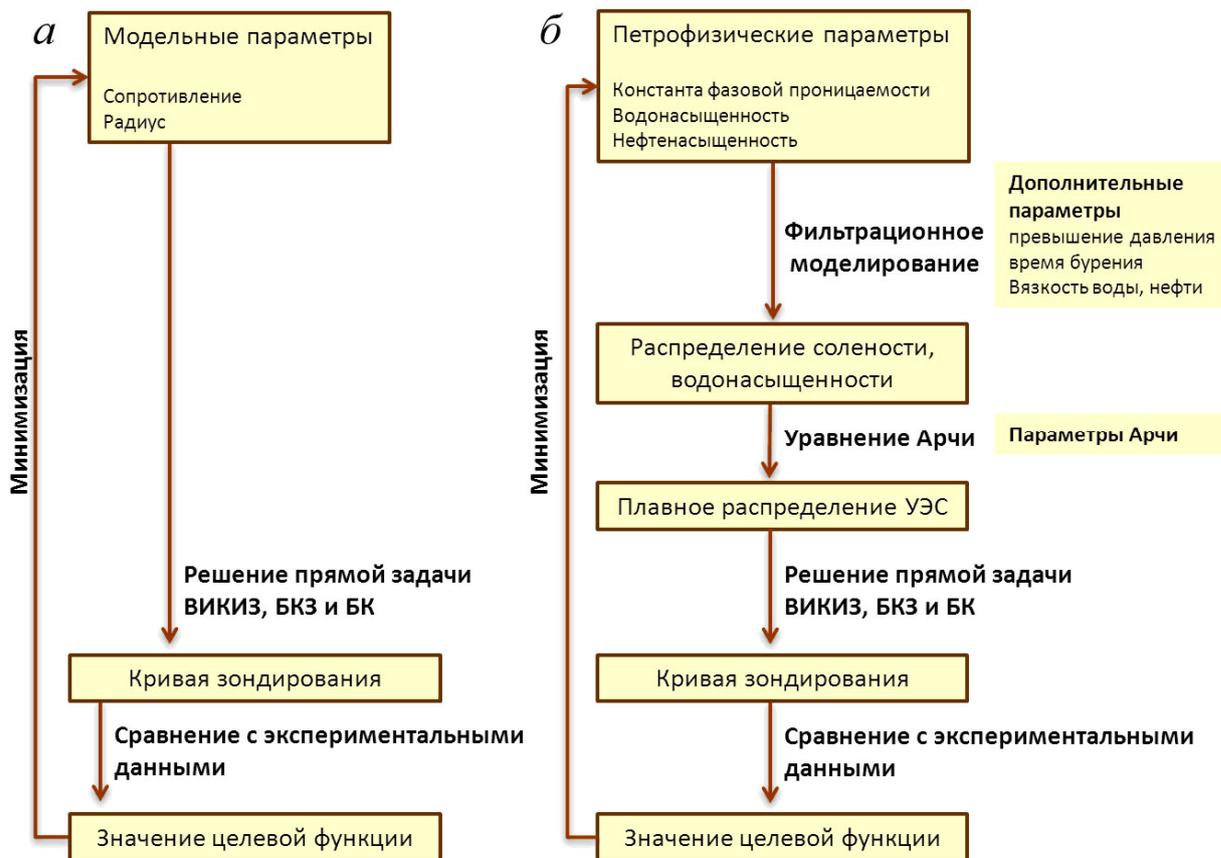


Рис. 1. Интерпретационная схема:
 а – стандартная обработка данных ГИС; б – предложенная схема интерпретации с подбором петрофизических параметров

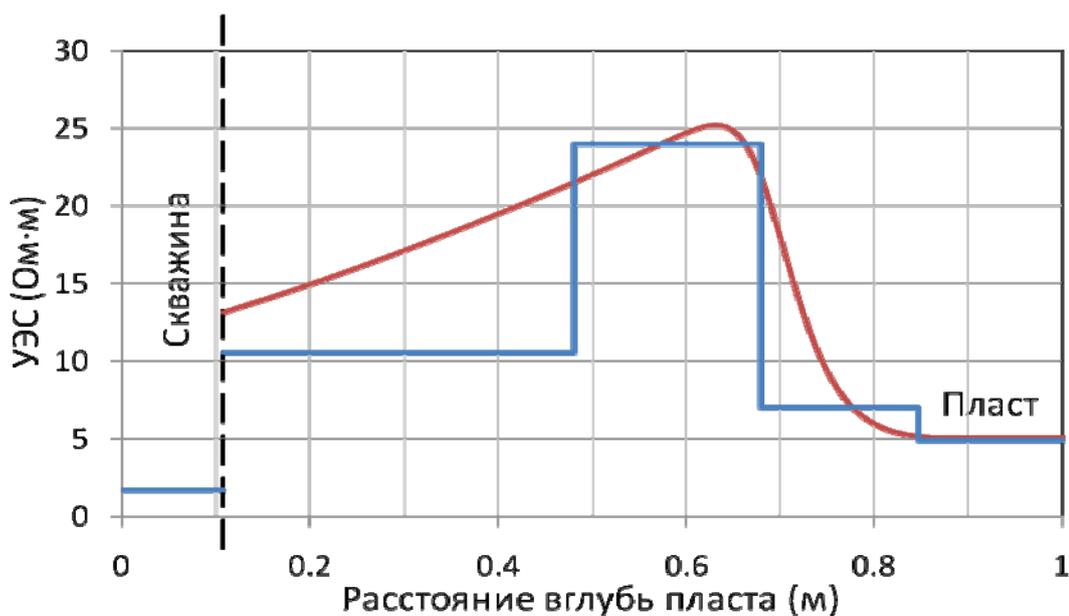


Рис. 2. Сопоставление результатов совместной инверсии ВИКИЗ и БКЗ и фильтрационного моделирования:
 — геозлектрическая модель (результат совместной инверсии данных ВИКИЗ и БКЗ);
 — профиль УЭС, построенный на основе численного моделирования формирования зоны проникновения

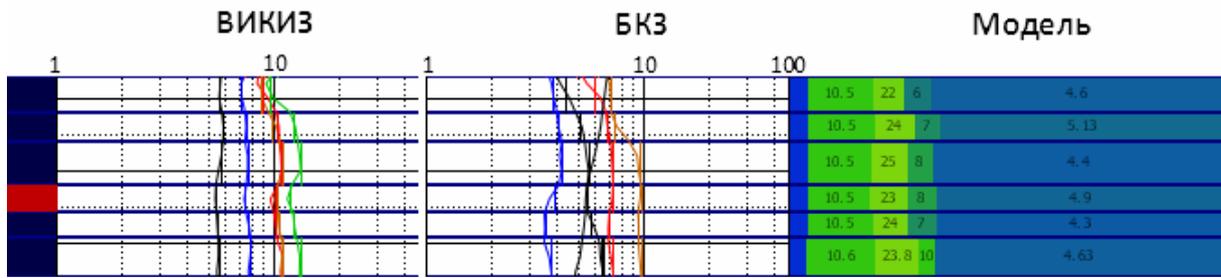


Рис 3. Каротажные диаграммы ВИКИЗ и БКЗ на интервале исследуемого коллектора

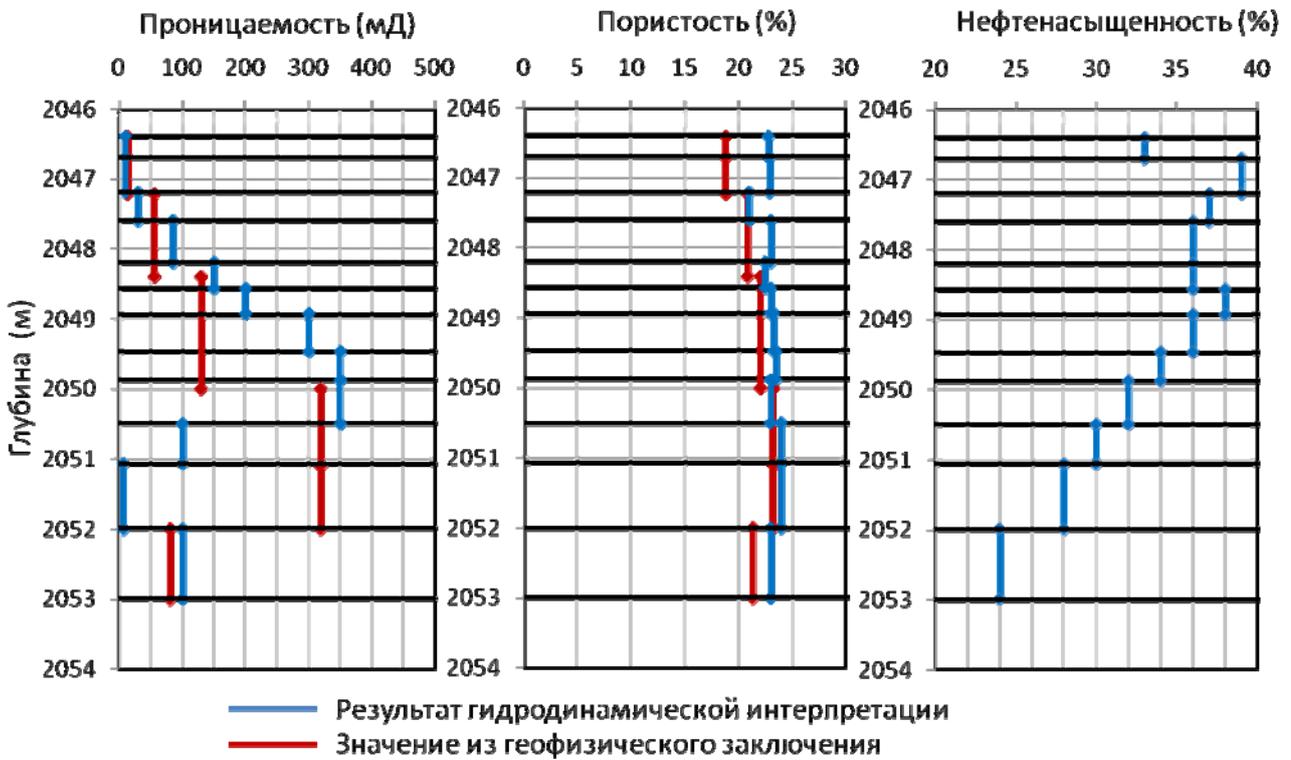


Рис 4. Сопоставление фильтрационно-емкостных свойств пласта: получены в результате гидродинамической интерпретации геоэлектрического профиля и взяты из заключения. Интервал нефтеводонасыщенного пласта АС 5–6

К статье Конькова А. И., Манакова С. А. «Оценка параметров грунта на основе анализа характеристик волны Рэлея»



Рис. 1. Излучатель и сейсмокоса

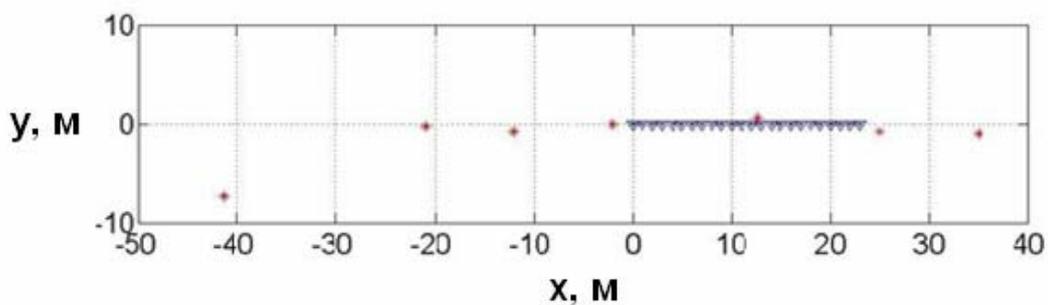


Рис. 2. Схема проведения эксперимента:
позиции приемных геофонов изображены треугольниками, позиции излучателя – звездочками.
Начало отсчета совпадает с положением первой пары геофонов

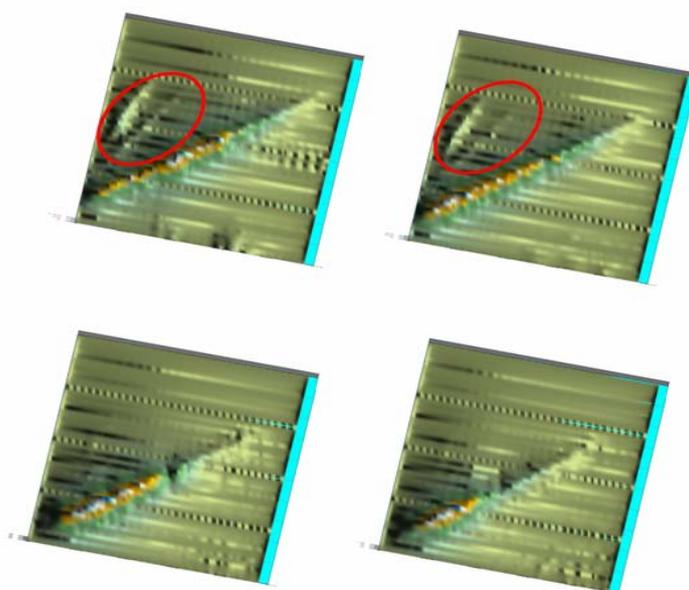


Рис. 6. Сравнение скользящих спектров ЛЧМ-сигналов, измеренных на вертикальных датчиках (слева) и горизонтальных (справа)

К статье Рязанцева П. А. «Результаты использования 3D-электротомографии на месторождении облицовочного камня»

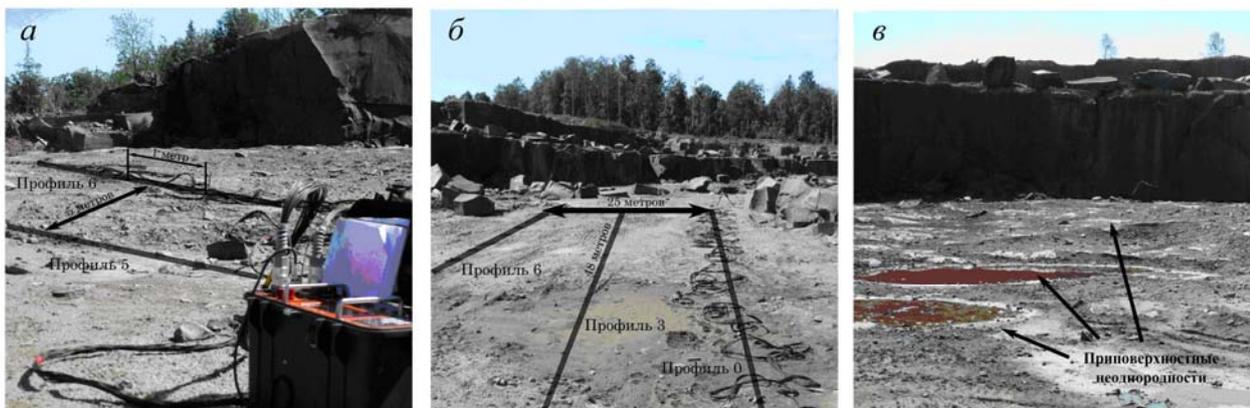


Рис. 1. Фотографии исследуемого участка

а – многоэлектродная электроразведочная станция «СКАЛА-48», б – положение профилей на исследуемом участке, в – типичные приповерхностные неоднородности

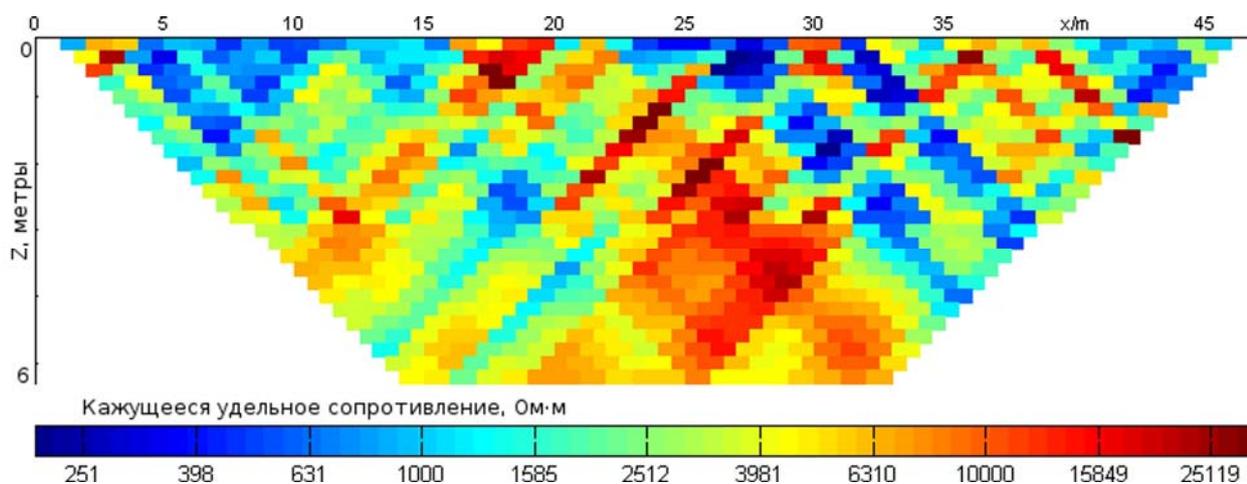


Рис. 2. Распределение измеренных ρ_k $\Omega \cdot m$ по профилю 4

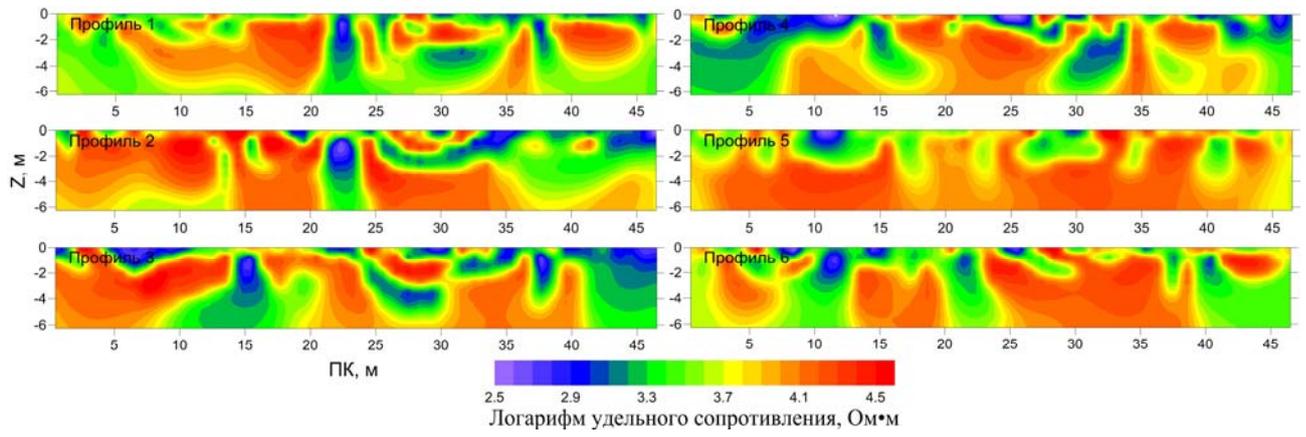


Рис. 3. 2D-геоэлектрические разрезы по каждому профилю

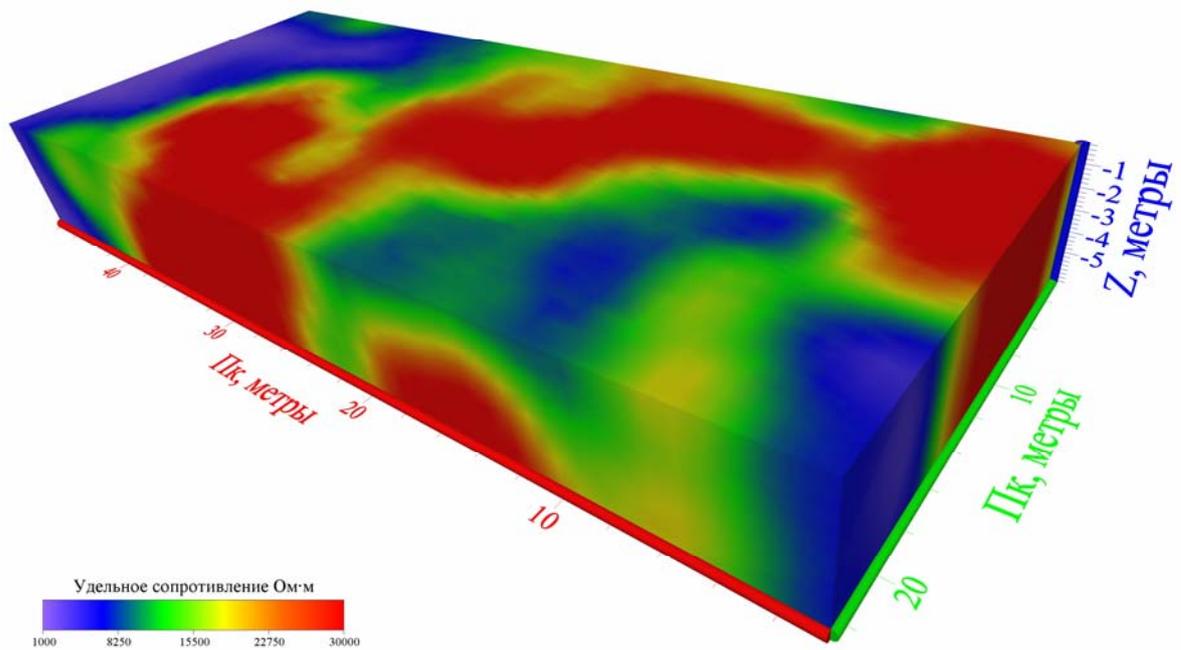


Рис. 4. Геоэлектрический «параллелепипед» удельных сопротивлений

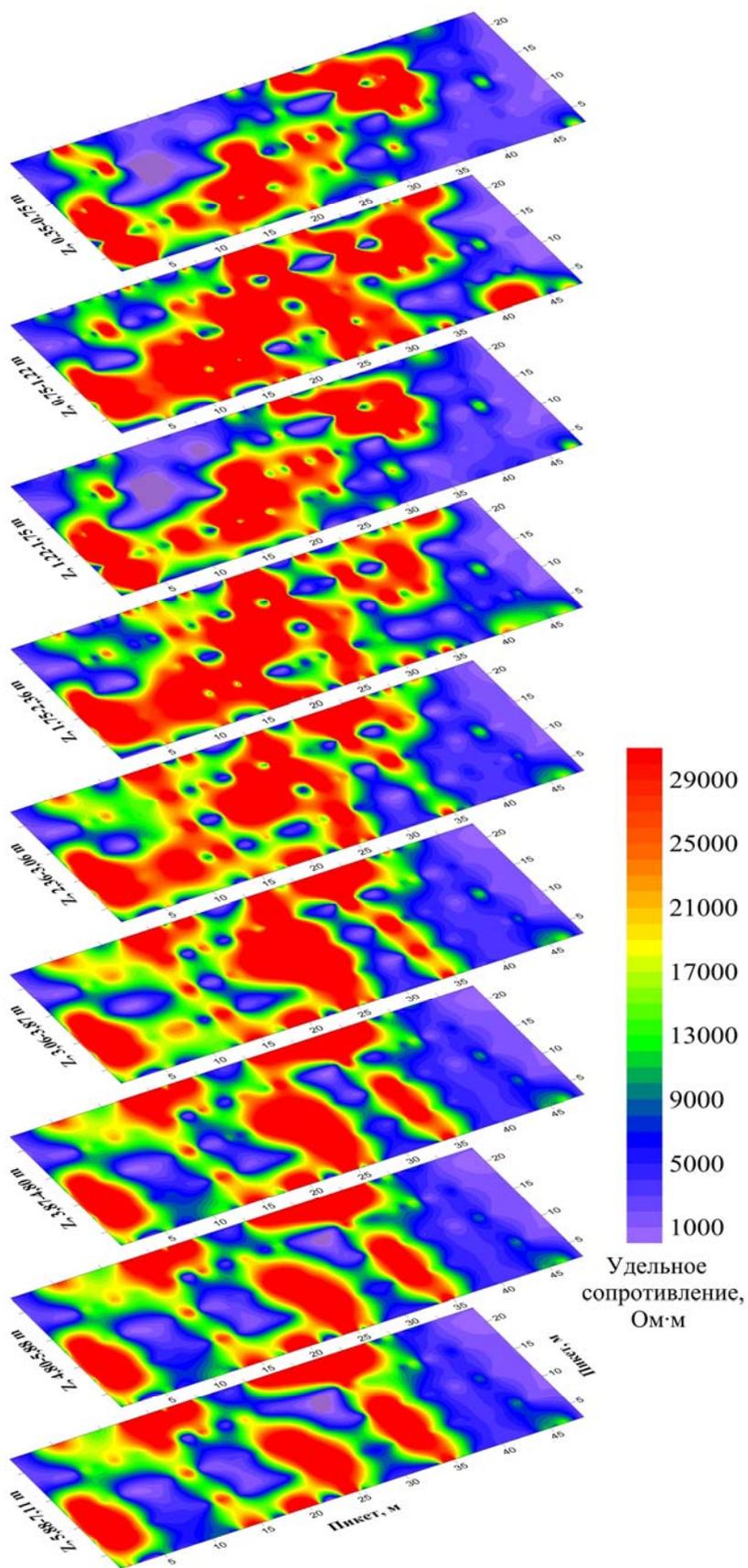


Рис. 5. Срезы удельных сопротивлений

Содержание Contents

Предисловие	3
Preface	3

I. Физика Земли I. Physics of the Earth

<i>Белевская М. А., Верхоланцев Ф. Г.</i> Сейсмичность на Верхнекамском месторождении калийных солей (2008–2010 гг.)	7
<i>Belevskaya M. A., Verkholantsev F. G.</i> Seismicity in Verkhekamskoye potash mines (2008-2010)	–
<i>Даниловская Л. О.</i> Волна Крауклиса в трехслойной модели	10
<i>Danilovskaya L. O.</i> Krauklis wave in a trilayer	–
<i>Емцева В. В., Королева Т. Ю.</i> Определение скоростного строения верхней мантии методом поверхностно-волновой томографии с учетом влияния землетрясений.....	16
<i>Emtseva V. V., Koroleva T. Yu.</i> Determination of upper mantle velocity structure by the noise surface wave tomography accounting influence of earthquake	–
<i>Казей В. В., Пономаренко А. В.</i> Влияние головных волн на качество восстановления скоростной неоднородности методом обращения полного волнового поля	22
<i>Kazei V. V., Ponomarenko A. V.</i> Head waves and the quality of the acoustic inhomogeneity recovering with full waveform inversion.....	–
<i>Красильников К. С.</i> Магнитное поле солнца как звезды в цикле солнечной активности.....	25
<i>Krasilnikov K. S.</i> Magnetic field of the Sun as a star during solar cycle	–
<i>Москалева Е. В., Заалов Н. Ю.</i> Характеристические проявления локальных неоднородностей полярной шапки на ионограммах вертикального зондирования.....	29
<i>Moskaleva E. V., Zaalov N. Yu.</i> Signatures of polar cap local irregularities in ionosonde data	–
<i>Пономаренко А. В.</i> Взаимодействие упругих волн с нелинейно-упругим шаром.....	32
<i>Ponomarenko A. V.</i> Interaction of the elastic waves with the nonlinear-elastic sphere.....	–
<i>Сальцберг А. В.</i> Результаты магнитотеллурических зондирований на островах Среднем и Пезжострове Белого моря.....	38
<i>Saltsberg A. V.</i> Preliminary results of magnetotelluric sounding on islands Sredniy and Pezhostrov of the White Sea	–
<i>Фадеева Н. В., Бызов Д. Д.</i> Моделирование областей нулевого гравитационного потенциала	41
<i>Fadeeva N. V., Byzov D. D.</i> Models of areas creating a zero gravitational potential	–
<i>Шуганов Р. А., Александров Д. В.</i> Оценивание проницаемости горной породы по микросейсмическим записям	45
<i>Shiganov R. A., Alexandrov D. V.</i> Rock permeability estimation using microseismic records	–

II. Региональная и поисково-разведочная геофизика (углеводороды и твердые полезные ископаемые)

II. Regional and exploration geophysics (hydrocarbons and solid minerals)

- Гольшиева Ю. С.* Применение 3D-плотностного моделирования при создании Онежской «опорной площадки» 49
Golysheva Yu. S. Application of 3D-gravity modeling for creation of the Onega “key area” –
- Иркабаев Д. Р., Адиев А. Я.* Прогноз структуры и коллекторских свойств пород в околоскважинном пространстве на основе данных ВСП, НВСП 53
Irkabaev D. R., Adiev A. J. Structure prediction and reservoir properties of rocks of the borehole space based on the VSP data –
- Коваленко К. В., Дешененков И. С.* Расчет сжимаемости коллекторов нефти и газа при различном насыщении для упругого моделирования месторождений 55
Kovalenko K. V., Dshenenkov I. S. Determination of oil and gas reservoirs compressibility with different saturation for fields elastic modeling –
- Коваленко К. В., Дешененков И. С., Петров А. Н.* Применение модели капиллярного давления при геологическом моделировании коллекторов в концепции эффективного порового пространства 61
Kovalenko K. V., Dshenenkov I. S., Petrov A. N. Capillary pressure model application for geological modeling in effective pore space concept –
- Красинский Е. М.* Опыт использования крупномасштабных аэромагнитных съемок при создании геофизической основы (ГФО) масштаба 1:1 000 000 Государственной Геологической карты третьего поколения (ГГК-1000/3) на примере листа Q-41 66
Krasinskij E. M. Experience of using high resolution aeromagnetic data in creation actualized geophysical basis of sheet Q-41 in scale 1:1 000 000 as a part of government geological map third edition (GGM-1000/3) –
- Петрищев М.С.* Прогнозирование источников геотермальных вод в окрестности вулкана Невадо-дель-Руис (Колумбия) по геомагнитным данным 71
Petrishchev M. S. Forecast of geothermal sources in vicinity of volcano Nevado del Ruiz (Colombia) by geomagnetic data –
- Сметанина Л. В., Михайлов И. В.* Окаймляющая зона в коллекторах как прямой признак их нефтеносности 76
Smetanina L. V., Mikhaylov I. V. Low-resistivity zone in reservoirs as the direct oil indicator –
- Эзирбаев Т. Б.* Обоснование моделей каротажа пористости для альб-аптских отложений Терско-Сунженской нефтегазоносной области 83
Ezirbaev T. B. Validation of log porosity models of alb-aptian deposits of the Terek-Sunzha oil and gas area –

III. Морская и полярная геофизика

III. Sea and polar geophysics

- Буторин А. В.* Применение моделирования волновых полей для повышения достоверности результатов интерпретации сейсмической инверсии в сирачойских отложениях северной части Тимано-Печорской провинции 87
Butorin A. V. Using modeling of wave fields for confirmation of seismic inversion result on example of the siratchoyskiy horizon in the northern part of Timan-Pechora –

<i>Буторина М. А.</i> Оценка эффективности АВО-анализа сейсмических данных по опорному профилю 2-АР в Карском море.....	90
<i>Butorina M. A.</i> Estimation of efficiency of the avo-analysis of seismic data along the profile 2-ar in the Kara sea	–
<i>Половков В. В.</i> Структура Челюскинская – перспективный на нефть и газ объект в Восточно-Сибирском море	93
<i>Polovkov V. V.</i> Chelyuskinskaya structure – promising on oil and gas object in the East Siberian sea	–
IV. Инженерная и скважинная геофизика, геофизика в гидрогеологии и геоэкологии	
IV. Engineering and hole geophysics, geophysics in hydrogeology and geocology	
<i>Глушченко М. Н., Соболев А. Ю.</i> Совместная интерпретация каротажных данных ВИКИЗ и БКЗ с использованием фильтрационного моделирования	96
<i>Glushchenko M. N., Sobolev A. Yu.</i> Joint interpretation of VIKIZ and RLL logging data using filtration modeling.....	–
<i>Коньков А. И., Манаков С. А.</i> Оценка параметров грунта на основе анализа характеристик волны Рэлея.....	99
<i>Konkov A. I., Manakov S. A.</i> The soil parameters evaluation based on Rayleigh wave analysis	–
<i>Петлеваний Д. И., Киселев Е. Ю.</i> Георадарный мониторинг галоклина	103
<i>Petlevany D. I., Kiselev E. Yu.</i> GPR monitoring of halocline.....	–
<i>Рязанцев П. А.</i> Результаты использования 3D-электротомографии на месторождении облицовочного камня	110
<i>Ryazantsev P. A.</i> The 3D-electrical resistivity imaging results of use on the dimension stone deposit.....	–
Авторский указатель.....	115
Index of authors.....	–
Цветные иллюстрации	116

Научное издание

**ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ЕЕ НЕДР:
Материалы VIII Международной научно-практической
конкурс-конференции «Геофизика-2011»
3 – 7 октября 2011 г.**

Под редакцией С. В. Аплонова, В. П. Кальварской, В. Н. Трояна

Редактор *Л. М. Юхова*
Компьютерная верстка *Т. А. Кудрявцевой, В. А. Птицына*
Художник *Е. А. Соловьева*

**Отпечатано копировально-множительным участком отдела
обслуживания учебного процесса физического факультета СПбГУ.
Приказ № 571/1 от 14.05.03.**

**Подписано в печать 25.06.12 с оригинал-макета заказчика.
Ф-т 30×42/4, Усл. печ. л. 9. Тираж 100 экз., Заказ № 1605.
198504, СПб, Ст. Петергоф, ул. Ульяновская, д. 3, тел. 929-43-00.**