

МЕХАНИЗМЫ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ

Бананов Р.В.

МГУ им М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

В большинстве существующих реологических моделей горных пород накопление пластических деформаций рассматривается в концепции закона пластического течения, вводятся общие характеристики накопленных необратимых деформаций. Однако реально деформации отражаются в изменении внутренней структуры пород, образовании и развитии микротрещин, явным и описываемым образом влияющих на эффективные механические свойства. Построение модели, учитывающей эти эффекты, позволит более корректно по сравнению с существующими моделями описывать поведение горных пород при нагрузках, близких к критическим, что соответствует условиям, реально наблюдаемым в природе. [1],[3].

Трехосные испытания, позволяющие моделировать поведение горных пород при нагрузках, близких к критическим, проводятся на специальной сервогидравлической установке RTR-4500. Испытания образцов выполнялись по схеме многостадийного нагружения. Были получены данные кривых напряжение-деформация для ряда образцов. [2]

В рамках настоящей работы создано программное обеспечение на языке программирования Python для обработки результатов лабораторных экспериментов, с помощью которого рассчитываются параметры для упругого и неупругого участков деформирования. С учетом условия пластичности Кулона--Мора или Друккера--Прагера рассчитываются значения углов внутреннего трения и накопленной пластической деформации для образцов горных пород [1-2]. В работе представлены примеры выполнения расчетов с использованием разработанного программного обеспечения для набора образцов пород, проведен анализ полученных результатов.

- 1. И.А. Гарагаш, Н.В. Дубиня, О.А. Русина, С.А. Тихоцкий, И.В. Фокин. Определение прочностных свойств горных пород по данным трехосных испытаний // Геофизические исследования, 2018. 19(3). С.57—72.
- Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Баюк И.О., Белобородов Д.Е., Березина И.А., Гафурова Д.Р., Дубиня Н.В., Краснова М.А., Корост Д.В., Макарова А.А., Патонин А.В., Пономарев А.В., Хамидуллин Р.А., Цельмович В.А. Комплексные лабораторные исследования керна в ЦПГИ ИФЗ РАН // Наука и технологические разработки. 2017. Т. 96, № 2. С.17–32.
- 3. Смирнов. В.Б. Механика сплошной среды. Часть первая. Динамическая теория упругости // Москва, 1990.

ТРЕХМЕРНАЯ СТРУКТУРА ВОЛНОВЫХ АТТРАКТОРОВ, ПОРОЖДАЕМЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ВОЗМУЩЕНИЙ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

Ватутин К.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, ИСП РАН, Москва, Россия E-mail: vatutin.k@mail.ru

Внутренние гравитационные и инерционные волны дают существенный вклад в энергетический баланс мирового океана и могут оказывать воздействие на вертикальное перемешивание, влияя, таким образом, на глобальную циркуляцию и климатические изменения.

Отличительной особенностью внутренних гравитационных и инерционных волн является дисперсионное соотношение, из которого проистекает правило при отражении пучков волн от поверхности, по которому сохраняется угол не с нормалью к поверхности, а с направлением силы тяжести или вращения.

Математически это приводит к возможности фокусировки пучков волн при отражении от наклонных поверхностей и аккумуляции волновой энергии вдоль замкнутых геометрических структур [1–5]. В двумерном случае наиболее простой модельной геометрией, на которой можно увидеть разнообразие волновых аттракторов, является трапеция с параллельными основаниями. Двумерное моделирование взаимодействия реальной топографии дна океана со стратифицированной жидкостью привели к оценкам существования порядка десяти аттракторов на тысячу километров. С другой стороны, в приложениях источники возмущений чаще всего имеют конечные размеры и трехмерную структуру. Поэтому важно описать геометрические структуры, возникающие при распространении волн от локализованных источниках возмущений в трапецеидальных геометриях.

В настоящей работе исследуется влияние граничных условий на трехмерную структуру и распределение кинетической энергии в аттракторах внутренних волн.

Показана взаимосвязь распределения кинетической энергии, изменения фазы и корреляции скорости в трансверсальном направлении.



Рис. 1. Контуры вертикальной скорости при источнике возмущений, локализованным у дальней границы трапецеидальных каналов различной длины.

- 1. Maas LRM, BenielliD, Sommeria J, Lam FPA. Observations of an internal wave attractor in a confined stably stratified fluid. Nature 1997; 388:557–561.
- 2. Аттракторы внутренних и инерционных волн. И.Н. Сибгатуллин, Е.В. Ерманюк Прикладная механика и теоретическая физика, принято в печать, 2019.

- Sibgatullin, E. Ermanyuk, L. Maas, X. Xu and T. Dauxois, "Direct Numerical Simulation of Three-Dimensional Inertial Wave Attractors," 2017 Ivannikov ISPRAS Open Conference (ISPRAS), Moscow, 2017, pp. 137–143.doi: 10.1109/ISPRAS.2017.00029.
- 4. Brouzet, C., Sibgatullin, I., Scolan, H., Ermanyuk, E., & Dauxois, T. (2016). Internal wave attractors examined using laboratory experiments and 3D numerical simulations. Journal of Fluid Mechanics, 793, 109–131. doi:10.1017/jfm.2016.119.
- 5. G. Pillet, E. V. Ermanyuk, L. R.M. Maas, I. N. Sibgatullin, and T. Dauxois. Internal wave attractors in three-dimensional geometries: trapping by oblique reflection. Journal of Fluid Mechanics, 845:203–225, 2018.

ПАРОЖИДКОСТНОЕ РАВНОВЕСИЕ СМЕСЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ: ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАВНОВЕСИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ КУБИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ СМЕСИ

Грушников И.Ю.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

В настоящее время в нефтяной отрасли используется ряд программных комплексов (PVTSim, WinProp CMG, Aspen HYSYS и др.), моделирующих межфазный массообмен в природных нефтях, газоконденсатных смесях и т.д. [1]. Расчет парожидкостного равновесия многокомпонентных углеводородных систем проводят также при численном моделировании физических процессов в залежах (симуляторы Eclipse 300, CMG GEM и др.). Особое значение такие расчеты имеют, когда проект разработки залежи углеводородных газ, воздух и др.) в целях повышения нефтеотдачи [1–4].

Существующие программные продукты используют методы расчета парожидкостного равновесия, опирающиеся на различные кубические уравнения состояния смеси углеводородных компонентов. Наиболее часто применяют уравнения состояния Пенга–Робинсона и Соаве–Редлиха–Квонга [1–4].

Настоящая работа является продолжением выполненных ранее исследований [5, 6]. В рамках работ [5, 6] был создан программный комплекс на языке Python, позволяющий проводить численное моделирование парожидкостного равновесия смеси углеводородов (рассматривался парафиновый ряд) с использованием трех различных кубических уравнений состояния: Пенга–Робинсона, Соаве–Редлиха–Квонга и Брусиловского. Разработка данного программного комплекса позволила сопоставлять значения параметров парожидкостного равновесия смесей, рассчитанных при использовании этих отличающихся друг от друга уравнений состояния [5, 6]. В настоящей работе с помощью разработанного программного комплекса было изучено влияние выбора конкретного уравнения состояния на результат моделирования массообменных процессов между жидкой и газовой фазой при фиксированных термобарических условиях. Выполненные расчеты позволили оценить, как выбор уравнения состояния скажется на результатах моделирования динамики процесса извлечения углеводородного сырья из залежи.

- 1. Тер-Саркисов Р.М. Разработка месторождений природных газов. М.: Недра, 1999.
- 2. Danesh A. PVT and phase behaviour of petroleum reservoir fluids. Edinburgh: Department of Petroleum Engineering of Heriot Watt University, 2003.
- 3. Брусиловский А. И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. М.: Грааль, 2002.
- 4. Tarek A. Equation of State and PVT Analysis. Texas: Gulf Publishing Company Hauston, 2007.
- 5. Грушников И.Ю. Моделирование парожидкостного равновесия многокомпонентных углеводородных смесей на базе уравнения Брусиловского // Материалы

Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2018». М.: МАКС Пресс, 2018.

 Isaeva A., Grushnikov I., Dobrozhanskiy V. Analysis of Vapor-Liquid Equilibrium Parameters of Multicomponent Hydrocarbon Mixtures Using Cubic Equations of State // SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia, 15–17 October 2018. SPE-191619-18RPTC-MS. https://doi.org/10.2118/191619-18RPTC-MS.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АРКТИЧЕСКОГО КЛИМАТА С ПОМОЩЬЮ ГЛОБАЛЬНОЙ И РЕГИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Зароченцев Г.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: xztv@mail.ru

Арктический регион играет важную роль в формировании процессов, оказывающих существенное влияние на климатическую систему Земли. По сравнению с более южными регионами, климат Арктики формируется в условиях значительного дефицита солнечного потока тепла, который отчасти восполняется климатической системой за счет внутренних термодинамических процессов и переноса тепла из более южных областей. Изменение глобальной температуры поверхности Земли, а также усиление механизма обратной связи температура-альбедо приводит к сокращению площади морского льда и уменьшению амплитуды его сезонных колебаний, что, однако, способствует увеличению продолжительности навигационного периода на Северном морском пути в долгосрочной перспективе [1].



Рис. 1. Область расчета эксперимента и карта метеостанций.

В настоящей работе были проанализированы данные совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана Института вычислительной математики РАН [2] с пространственным разрешением 4×5°, модели WRF-ARW [3] с пространственным разрешением 30 км как с учетом гидростатического приближения, так и без него, а также данные арктического реанализа Национального исследовательского центра США (разрешение 30 км). Область расчета — Арктика (юг Северного полярного круга и север-

ней). Произведено начальное сравнение модельных приземных характеристик воздуха (температура, скорость ветра, влажность, давление) с рядом данными наблюдений с метеостанций из области расчета (общее число станций — 645). Показано улучшение описания климатических характеристик арктического региона с помощью региональной климатической модели.

Литература

- Кибанова, О.В., Елисеев, А.В., Мохов, И.И., & Хон, В.Ч. Баесовы оценки изменений продолжительности навигационного периода северного морского пути в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей. //Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах. – 2018. – С. 167–168.
- 2. Дианский Н.А., Володин Е.М. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 6. С.824–840.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W., Powers J.G. A description of the advanced research WRF version 2. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado, USA. 2005. N NCAR/TN-468+STR. DOI: 10.5065/D68S4MVH.

СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ САМОПОДОБИЯ В АФТЕРШОКОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ

Карцева Т.И.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: ti.kartceva@physics.msu.ru

На понимании физики землетрясения основывается как оценка сейсмической опасности, так и возможность прогнозирования сейсмических событий. Статистически было доказано, что распределение землетрясений в пространстве и по энергии являются самоподобными. Интересно то, что они связаны напрямую — чем больше разлом, вызвавший землетрясение, тем больше сейсмическая энергия. Были попытки также проследить самоподобие и во времени, но значимые результаты получены не были.

Так обстоит ситуация с обычными землетрясениями, но есть особый класс землетрясений — афтершоки. Афтершоки — это серия землетрясений, следующая за основным крупным толчком. Несмотря на то, что афтершоки обычно имеют меньшую магнитуду по сравнению с главным событием, они могут приводить к не менее разрушительным последствиям и, так как это достаточно организованные структуры, локализованные в пространстве и времени, то предсказание афтершоков является сейчас более перспективным направлением. Но для успешного прогнозирования нужно хорошо понимать механизм этого явления.

Теоретической основой исследования этого механизма является работа [1]. В ней была предложена гипотеза, которая связывает все самоподобные распределения афтершоков через некоторые зависимости между их степенными показателями. Вид зависимости не единственный, но для двух крайних случаев существуют гипотезы, предлагающие физическое объяснение этих зависимостей.

В данной работе было проведено систематическое исследование зависимостей параметров самоподобия афтершоковых серий в районах с различными тектоническими режимами для прояснения характера и особенностей связи параметров самоподобия. Были исследованы зоны субдукции Тихоокеанского огненного кольца, трансформные разломы Калифорнии, Греции, Турции и Китая. Результатом работы станут объединенные по регионам p-b - диаграммы.

Эта проблема мало освещалась в литературе, в немногочисленных статьях ([2], [3]) были опубликованы результаты, но статистическая значимость их невелика. Наша же

работа основана на новых методиках [4], на раздельном изучении регионов с разной тектоникой, на более современных каталогах землетрясений.

Литература

- Scholz C. Microfractures, aftershocks, and seismicity // Bull. Seismol. Soc. Am. 1968. V. 58. P. 1117–1130.
- 2. Ávila-Barrientos L. et al. Variation of b and p values from aftershocks sequences along the Mexican subduction zone and their relation to plate characteristics //Journal of South American Earth Sciences. 2015. T. 63. C. 162–171.
- 3. Gasperini P., Lolli B. Correlation between the parameters of the aftershock rate equation: Implications for the forecasting of future sequences //Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2006. – T. 156. №. 1–2. C. 41–58.
- 4. Holschneider M. et al. Bayesian analysis of the modified Omori law //Journal of Geophys.Res: Solid Earth. – 2012. – T. 117. – №. B6.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ОХОТСКОМ МОРЕ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИЙ СКБ САМИ ДВО РАН)

Кокоулина М.В., Гиниятуллин А.Р., Рувинская Е.А.

Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева, Россия

В рамках настоящего исследования проведена обработка, оцифровка и анализ данных временного хода распределения температуры и солености морской воды, а также скорости суммарного течения внутренних волн, полученных во время экспедиций в период с 1983–1990 гг. в различных районах Охотского моря. Данные для исследования предоставлены СКБ САМИ ДВО РАН в рамках сотрудничества с НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Длительность измерений составляет не более 8 дней за весь период зондирования для одного района Охотского моря. На основании имеющихся данных о временном изменении температуры и солености (измерительный комплекс «Гидрозонд М-6000») с помощью нового уравнения состояния морской воды TEOS-10 было получено поле плотности морской воды. Стоит отметить, что предоставленные данные не обладают полнотой информации в контексте исследования внутренних волн для большинства точек, в которых проводились измерения, поэтому анализировались записи временных рядов плотности (промеры вблизи о. Итуруп) и скорости течения (пролив Фриза и мыс Евстафия) лишь для нескольких точек. Для поля плотности вблизи максимума первой теоретической моды, выделена изопикна смещения плотности, построен амплитудный спектр изопикны плотности. Сравнение с известной моделью Гаррета – Манка показывает существенные отличия наклонов спектров, из чего можно сделать вывод о нелинейной природе процессов, происходящих в анализируемой области акватории. Сравнение гистограммы распределения амплитуд смещения с нормальным законом по критерию χ^2 позволяет сделать вывод о том, что экспериментальные данные не удовлетворяют распределению Гаусса. По вычисленным значениям высот волн построена статистика редких событий (превышение заданных высот волн за 10, 30, 60 и 90 дней). Построены и проанализированы спектры для каждой из компонент скорости для записей в районе пролива Фриза и мыса Евстафия. Наблюдаются резкие скачки скорости, которые могут быть обусловлены влиянием внешних периодических воздействий. Спектры скорости течения и плотности морской воды схожи и спрямляются на функциональной сетке экспоненциального закона. Построенные гистограммы плотности распределения компонент скорости течения не удовлетворяют распределению Гаусса. Так как наблюдается явная ассиметрия и отклонение от распределения Гаусса, можно предполагать, что в исследуемых районах наблюдаются течения, индуцированные нелинейными волновыми процессами.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований молодых российских ученых — кандидатов наук МК- 1124.2018.5.

ШУМЫ СЕЙСМОДАТЧИКОВ С ЦИФРОВЫМИ И АНАЛОГОВЫМИ ЦЕПЯМИ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

Крылов А.В., Марченков А.Ю.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: kralex96@mail.ru

Шумы измерительных устройств являются одной из важнейших их характеристик. В самом общем случае их уровень зависит от конструктивных особенностей прибора.

Для сейсмометров использование обратной связи (далее OC) в измерительной схеме позволяет задавать частотные характеристики (передаточную функцию) датчика. При этом применение сейсмометра для различных задач может требовать различных передаточных функций с точки зрения оптимизации измерений. Очевидно, что изменение передаточной функции в аналоговом варианте OC требует серьёзного вмешательства в электрические схемы прибора, тогда как в случае цифрового сигнала OC достаточно перепрограммирования алгоритма вычисления этого сигнала.

Для решения задачи измерения собственных шумов сейсмометров с различными в обсуждаемом смысле цепями ОС, в работе используются два практически идентичных сейсмодатчика, один с аналоговыми, другой с цифровыми схемами реализации цепей ОС. Параллельная одновременная регистрация сейсмического сигнала и его обработка позволит оценить искомое изменение уровня шумов датчиков.

Рассмотрение подобного рода проблемы в сейсмометрической практике нам не известно. Вполне возможно, работы в этом направлении ведутся на уровне производителей сейсмометрической аппаратуры, но их результаты не публикуются в открытой, в том числе научной печати.

Итогом работы будет являться численное сравнение шумов сейсмодатчиков при достижении максимально схожих частотных характеристик аналоговым и цифровым методом задания ОС.

Литература

- 1. А.В. Рыков. «Моделирование сейсмометра». ИФЗ РАН. Москва, 1996 г.
- 2. «Precision data acquisition applications seminar». Texas Instruments. 2004 г.
- В.Н. Некрасов, С.В. Сергеев. «Сравнение характеристик индукционного, емкостного и пьезоэлектрического преобразовательных элементов сейсмоприемников». – Сейсмология. Москва, 1990 г.
- 4. А. Дж. Пейтон, В. Волш. «Аналоговая электроника на операционных усилителях». Бином. Москва, 1994 г.

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ КРУГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ В МОРСКИХ УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Осипова П.С.

НГУ, Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия E-mail: OsipovaPS@ipgg.sbras.ru Электромагнитные зондирования арктического региона затруднены влиянием проводящего слоя морской воды. Для решения этой проблемы предлагается использовать технологию, основанную на возбуждении электромагнитного поля с помощью особого источника – кругового электрического диполя (КЭД) [2]. Предполагается, в рамках проекта РНФ, разместить питающую и приемную электроразведочную конфигурацию на дрейфующем льду, и выполнять зондирования, подразумевая перемещение всей установке по поверхности воды (рис. 1).



Рис. 1. Вид электрической питающей установки на дрейфующей льдине

КЭД является источником переменного ТМ-поляризованного поля. Ранее рассматривался одномерный подход, который показал высокую эффективность КЭД в морских условиях. Для реализации трехмерного моделирования существуют сложные алгоритмы, основанные на методе конечных элементов. Однако они требуют авторского сопровождения и плохо адаптированы для наших нестандартных условий. В данном случае необходим более гибкий математический аппарат, позволяющий быстро моделировать и интерпретировать сигналы. Упрощение представляется возможным при использовании приближения Борна [1], [3]. Цель этой работы — показать эффективность алгоритма борновского приближения для поля КЭД, расположенного на льдине, в морских условиях.

По программе, реализующей борновское приближение, был проведен большой объем расчетов. Для тестирования алгоритма борновского приближения (программа 3D_CED) использовалась программа GeoPrep [4] (метод конечных элементов). Условия численного эксперимента следующие: среда трехслойная: $\rho = 0.3$, 2, 1000 Ом·м, d = 2000, 3000 м; объект: $\rho = 100$ Ом·м, размер 2000×4000×100 м, кровля на глубине 4000 м; КЭД: радиус 5000 м, ток 1000 А; наблюдения: Ег и dBz/dt в 441 точке с шагом 500 м на поверхности моря.

На рис. 2а приведено сравнение кривых становления Er аномального поля (точнее, ЭДС с радиальной приемной линии 2000 м) для двух программ. Будем говорить о совпадении ввиду условности сравнения точного и приближенного подхода. Соответственно принципам борновского приближения, кривые лучше совпадают на поздних временах. Это говорит о работоспособности приближения Борна в режиме становления. Следовательно, далее для сравнениея Er аномального поля от погруженной на дно установки и поверхностной на льдине используется программа 3D_CED (рис. 26). Сигнал с донной установки имеет более сложный вид, поскольку поле погруженного КЭД является квадрупольным [5]. Однако уровень сигнала не падает при измерениях с поверхности. Так что есть все основания помещать установку на поверхности моря.



Рис. 2. Сравнение кривых становления Er аномальный сигнал в точке: а — для программ GeoPrep и 3D_CED, б — для системы на льдине и на дне.

Таким образом, математическое обеспечение, основанное на приближении Борна, в трехмерном случае дает результаты, не сильно отличающиеся от данных точного подхода, но имеет свои особенности. Расчеты показывают, что методика глубинных зондирований с использованием в качестве источника кругового электрического диполя чувствительна к аномальным объектам и не зависит от глубины моря. Это решает основную проблему метода морской электроразведки и даже при зондированиях с поверхности моря, в частности, с ледовой поверхности.

Работа выполнена под руководством доктора технических наук Могилатова В. С.

Исследования выполняются при финансовой поддержке гранта РНФ № 18-17-00095.

Литература

- 1. Жданов М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный мир, 2007. 710с.
- 2. Могилатов В.С., Злобинский А.В. Геоэлектрический эксперимент в Арктике (проект) //Геофизика. 2016. № 1. С. 75–80.
- 3. Могилатов В.С., Эпов М.И. Томографический подход к интерпретации данных геоэлектромагнитных зондирований // Физика Земли. 2000. № 1. С. 78–86.
- 4. Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Тригубович Г.М. Компьютерное моделирование геоэлектромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Физика Земли. 2011. № 2. С. 3–14.
- Mogilatov V.S., Zlobinsky A.V., Balashov B.P. Transient electromagnetic surveys with unimodal transverse magnetic field: ideas and result // Geophysical Prospecting. – 2017. – T. 65. – № 5. Pp. 1380–1397.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭМИССИЙ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА

Пономарёв Н.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: na.ponomarev@physics.msu.ru

Одной из ключевых задач, которую необходимо решить для успешного прогнозирования изменений климата, образования экстремальных погодных ситуаций или случаев загрязнения воздуха токсичными веществами, опасными для людей и всей экосистемы в целом, является задача об определении причин и механизмов изменения состава нижней атмосферы. Крупные мегаполисы, в том числе и Москва, представляют собой большой интерес для изучения динамики и пространственной изменчивости состава атмосферы, ввиду наличия большого количества разнообразных источников, таких как автотранспорт, промышленные предприятия, очистные сооружения и теплоэлектростанции.

Данные измерений сети станций «Мосэкомониторинг» о содержании в атмосфере таких примесей, как CO, NO, NO₂, SO₂ и CH₄, позволяют производить оценку уже имеющихся методик анализа качества воздуха на густонаселенных территориях, адаптацию локальных и мезомасштабных транспортно-химических моделей атмосферы [2]. В данной работе нами была проведена серия численных экспериментов модели SILAM с целью корректировки пространственно-временного распределения городских источников и улучшения результатов прогноза состава воздуха в Московском мегаполисе, относительно результатов, получаемых при использовании данных европейской инвентаризации TNO(www.tno.nl/emissions) [1].

Полученное в результате проведенной работы оптимальное распределение эмиссий Московского мегаполиса, в целом правильно отражает состояние и изменение со временем городской инфраструктуры. С помощью модели SILAM были исследованы основные причины и механизмы изменения состава атмосферы в Московском мегаполисе за январь и июль 2014 года. Для последующей коррекции задания источников, понашему мнению, требуется более детальное рассмотрение работы химического блока модели, в частности, уточнение описания фотохимических процессов и корректировка задания неметановых углеводородов [3].

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 18-29-10080

Литература

- Denier van der Gon H.A.C., Kuenen J., Butler T. "A Base Year (2005) MEGAPOLI Global Gridded Emission Inventory", (1st Version), 20p, ISBN: 978–87–993898–5–8, 2010, http://megapoli.dmi.dk/publ/MEGAPOLI sr10–13.pdf
- 2. Elansky N. F., Ponomarev N. A., Verevkin Y. M. "Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014", Atmospheric Environment, V. 175, p. 54–64, 2018
- Stockwell W., Lawson C., Saunders E., Goliff W. "A Review of Tropospheric Atmospheric Chemistry and Gas-Phase Chemical Mechanisms for Air Quality Modeling", Atmosphere, 3, 1–32, 201; doi:10.3390/atmos3010001.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ДЖЕРКОВ ПО ДАННЫМ СРЕДНЕШИРОТНЫХ РОССИЙСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ

Рябова С.А.

Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия E-mail: ryabovasva@mail.ru

Геомагнитные джерки — это сравнительно резкие (*V*-образные) изменения в скорости вековых вариаций одной (как правило, восточной) или нескольких компонент магнитного поля Земли [1]. В настоящее время геомагнитные джерки часто используются для исследования явлений на границе нижней мантии и внешнего ядра Земли и их характеристик, в том числе определения проводимости нижней мантии [2] и оценки возможной боковой неоднородной проводимости [3]. В таких исследованиях требуется точное определение на каждой станции времени возникновения джерка.

Вопросы о физических процессах, обусловливающих джерки, о времени их появления (причинах их повторяемости), о пространственном распределении (временных задержках их регистрации на разных станциях) в настоящее время нельзя считать окончательно решенными [4–6]. Одной из проблем, связанных с выявлением геомагнитных джерков, является разработка математического аппарата для определения точки изменения наклона производной. В качестве такого аппарата можно использовать сегментированную линейную регрессию (линейная регрессия с точками переключения). В последнее время широко исследуются вопросы, сопряженные с сегментированной линейной регрессией, например, подбор модели сегментированной линейной регрессии [7], определение точек переключения [8] и их количества [9]. Применение двухсегментной регрессии позволило успешно и с высоким процентом точности определить время джерков 1969 г., 1978 г., 1991 г. и 1999 г. [10].

В последнее время развитие математических методов обработки и анализа данных, а также средств магнитометрии позволили при анализе вариаций компонент геомагнитного поля с небольшими расхождениями по времени идентифицировать джерки 2011 г. и 2014 г. в регионах: Южная Атлантика/Африка, Европа и Северо-Западная Атлантика, а также Австралазия [11, 12].

Настоящее исследование выполнено с использованием данных регистрации горизонтальных и вертикальной компонент геомагнитного поля со станции «Михнево» Института динамики геосфер Российской академии наук (54,96° с.ш., 37.77° в.д.) за период с 2008 г. по 2017 г. [13] и со среднеширотных станций российского сегмента сети INTERMAGNET [14]:

Станция	IAGA коды	Географические		Период записи
		координаты		
		Широта	Долгота	
Борок	BOX	58,1	38,2	с 2008 г. по 2016 г.
Иркутск	IRT	52,2	104,5	с 2008 г. по 2017 г.
Новосибирск	NVS	54,8	83,2	с 2008 г. по 2017 г.
Паратунка	PET	53,0	158,2	с 2008 г. по 2017 г.
Хабаровск	KHB	47,6	134,7	с 2012 г. по 2017 г.
Якутск	YAK	62,0	129,7	с 2009 г. по 2016 г.

С применением сегментированной линейной регрессии по данным среднеширотных станций удалось идентифицировать джерки 2011 г. и 2014 г. во всех компонентах магнитного поля Земли. Наличие разброса в значениях первой производной, вероятно, вызвано воздействием внешних источников, но это не влияет на морфологию поведения вековой вариации. Годы, близкие к солнечному максимуму, более загрязнены внешними эффектами по сравнению с годами солнечного минимума. Полученные данные можно рассматривать как дополнительное подтверждение глобальности джерков 2011 г. и 2014 г.

- Courtillot, V., Ducruix, J., Le Mouel, J.-L. Sur une acceleration recente de la variation seculaire du champ magnetique terrestre // Comptes rendus de l'Académie des Sciences. 1978, Vol. 287. p. 1095–1098.
- 2. Mandea Alexandrescu, M., Gibert, D., Le Mouel, J.-L., Hulot, G., Saracco, G. An estimate of average lower mantle conductivity by wavelet analysis of geomagnetic jerks // Journal of Geophysical Research. 1999, Vol. 104, № B8. p. 17735–17745.
- 3. Nagao, H., Iyemori, T., Higuchi, T., Araki, T. Lower mantle conductivity anomalies estimated from geomagnetic jerks // Journal of Geophysical Research. 2003, Vol. 108, № B5. doi: 0.1029/2002JB001786.
- 4. Bloxham, J., Zatman, S., Dumberry, M. The origin of geomagnetic jerks // Nature. 2002, Vol. 420. p. 65–68.
- Brown, W.J., Mound, J.E., Livermore, P.W. Jerks abound: An analysis of geomagnetic observatory data from 1957 to 2008 // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2013, Vol. 223. p. 62–76.

- Qamili, E., De Santis, A., Isac, A., Mandea, M., Duka, B., Simonyan, A. Geomagnetic jerks as chaotic fluctuations of the Earth's magnetic field // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2013, Vol. 14, № 4. p. 839–850.
- Chen, C.W.S., Chan, J.S.K., Gerlach, R., Hsieh, W.Y.L. A comparison of estimators for regression models with change points // Statistics and Computing. 2011, Vol. 21, № 3. p. 395–414.
- 8. Stasinopoulos, D.M., Rigby, R.A. Detecting break points in generalised linear models // Computational Statistics and Data Analysis. 1992, Vol. 13. p. 461–471.
- 9. Kim, H.-J., Yu, B., Feuer, E.J. Selecting the number of change-points in segmented line regression // Statistica Sinica. 2009, Vol. 19. p. 597–609.
- 10. Pinheiro, K.J., Jackson, A., Finlay, C.C. Measurements and uncertainties of the occurrence time of the 1969, 1978, 1991, and 1999 geomagnetic jerks // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2011, Vol. 12, № 10. doi:10.1029/2011GC003706.
- 11. Kotze, P.B., Korte, M. Morphology of the southern African geomagnetic field derived from observatory and repeat station survey observations: 2005–2014 // Earth Planets Space, 2016, Vol. 68, № 23. doi:10.1186/s40623–016–0403–7.
- 12. Kotze P.B. The 2014 geomagnetic jerk as observed by southern African magnetic observatories // Earth, Planets and Space. 2017, Vol. 69, № 17. doi: 10.1186/s40623-017-0605-7.
- 13. http://idg.chph.ras.ru/ (сайт Института динамики геосфер Российской академии наук).
- 14. www.intermagnet.org (сайт Международной сети Intermagnet).

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДНОЙ КОМПОНЕНТЫ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ С ГЛИНИСТО-АРГИЛЛИТОВЫМИ ПОРОДАМИ МЕТОДОМ ЯМР

Ускова Е.И.¹, Дорогиницкий М.М.¹, Скирда В.Д.¹, Фатхутдинов И.Х.²

Казанский (Приволжский) ФУ, институт физики, Казань, Россия ²ГК «Миррико», Казань, Россия E-mail: elen.uskova@mail.ru

В процессе бурения в результате контакта водной составляющей буровых растворов с глинисто-аргиллитовыми породами происходит осыпи и обвалы стенок скважин. Исследование на молекулярном уровне физико-химических процессов взаимодействия воды с аргиллитами представляет интерес для совершенствования состава буровых растворов и ингибиторных присадок.

Одним из информативных методов исследования надмолекулярных структур и молекулярной подвижности является метод ЯМР-релаксометрии. На основе этого метода в настоящей работе предлагается ЯМР-методика оценки молекулярных характеристик взаимодействия водной компоненты буровых растворов с глинисто-аргиллитовыми породами. Следует отметить, что для исследования взаимодействия молекул воды с гидрофильными минеральными компонентами глинисто-аргиллитовых пород этот метод практически не применялся. В последнее время в ЯМР-исследованиях широко применяется новая методика получения 2D-карт совместных распределений времён ядерной магнитной релаксации [1, 2]. Необходимо отметить, что одномерные распределения времён спин-решёточной релаксации T₁ и спин-спиновой релаксации T₂, как и совместное двумерное распределение времён ядерной магнитной релаксации P(T₁,T₂) зависят от основной характеристики ЯМР-приборов – резонансной частоты. При сравнении результатов вычисления таких распределений по данным от различных ЯМР-приборов требуется дополнительная информация о дисперсионной зависимости времён T₁ и T₂.

На основе метода получения 2D-карт совместных распределений времён ядерной магнитной релаксации в настоящей работе предлагается новая ЯМР-методика оценки таких молекулярных характеристик взаимодействия как:

- спектр времён корреляции молекулярного движения, приводящего к флуктуациям потенциала взаимодействия молекул воды и гидрофильных минеральных компонент горной породы;
- спектр вторых моментов, который определяется магнитным окружением молекул воды;
- 2D-карты совместных распределений времён корреляции τ_c и вторых моментов Δω², позволяющие типизировать как состав, так и подвижность отдельных динамических фаз системы буровой раствор-аргиллит.

Методика основана на априорном предположении о механизме ядерной магнитной релаксации. Вычисляемое двумерное распределение $P(\tau_c, \Delta \omega^2)$ не зависит от характеристик ЯМР-релаксометров, что открывает возможность простого сопоставления данных ЯМР, полученных в различных лабораториях. Для анализа двумерных данных использовалось специально разработанное программное обеспечение, позволяющее вычислять 2D-карты $P(T_1,T_2)$ и $P(\tau_c,\Delta\omega^2)$, показанные на рисунке 1.

Время корреляции τ_c определяется динамическим состоянием молекул, зависящим от температуры и величины потенциала молекулярного взаимодействия. Для жидкого состояния эта величина имеет значения порядка 10^{-12} с, а для твердого тела — более 10^{-9} с. Значение второго момента $\Delta\omega^2$ определяется магнитным окружением атома водорода ¹Н в молекулах различных молекулярных структур и может быть оценено по известной формуле Ван-Флека [3]. Таким образом, распределение $P_2(\tau_c, \Delta\omega^2)$ содержит информацию о структурных и динамических молекулярных характеристиках и позволяет типизировать как состав, так и подвижность отдельных динамических фаз.



Рис. 1. 2D-карта $P(T_1,T_2)$ совместных распределений времён ядерной магнитной релаксации T_1 и T_2 (слева); 2D-карта $P(\tau_c,\Delta\omega^2)$ совместных распределений времён корреляции τ_c и вторых моментов $\Delta\omega^2$ (справа)

Предложенный метод применялся к исследованию сорбции воды на гидрофильных минеральных компонентах горной породы (аргиллит). Для исследования ядерной магнитной релаксации использовался ЯМР-релаксометр Хроматэк Протон-20М. Для измерений применялась импульсная последовательность «IR(t₁)CPMG(t₂)» [1].

Метод построения 2D-карты совместных распределений вторых моментов и времён корреляции для взаимодействия $P(\Delta \omega^2, \tau_c)$ позволяет:

- получить однозначную информацию о структуре окружения молекул воды и углеводородов в системе буровой раствор — глинисто-аргиллитовая порода;
- сравнить подвижность молекул воды и углеводородов в системе буровой раствор глинисто-аргиллитовая порода;

- увидеть последовательность изменения структуры окружения сорбированных на гидрофильных компонентах аргиллита молекул воды в процессе насыщения для разных видов буровых растворов;
- оценить влияние ингибирующих добавок в буровые растворы на молекулярном уровне.

Литература

- Gizatullin B. Investigation of molecular mobility and exchange of n-hexane and water in silicalite-1 by 2D 1H NMR relaxometry/ B. Gizatullin, A. Savinkov, T. Schipunov, D. Melnikova, M. M. Doroginitskii, V.D. Skirda // Magnetic Resonance in Solids, 2018. V. 20. I.1. P. 1–9.
- Song Y.-Q. T1–T2 Correlation Spectra Obtained Using a Fast Two-Dimensional Laplace Inversion/ Y.-Q. Song, L. Venkataramanan, M.D. Hürlimann, M. Flaum, P. Frulla, and C. Straley // Journal of Magnetic Resonance, 2002. N.154. P. 261–268.
- 3. Van Vleck J. H. The Dipolar Broadening of Magnetic Resonance Lines in Crystals // Physical Review, 1948. V.74. I.9. P. 1168–1183.

ПРОГНОЗ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ В РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБАХ

Чернышов С.П.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: chernyshov-serj1997@yandex.ru

В настоящее время изучение физических процессов в породах в различных масштабах (upscaling, downscaling) является активно развивающимся направлением в геофизике. Результаты данных исследований востребованы в физике нефтяного пласта при интерпретации результатов лабораторных и полевых экспериментов по изучению свойств пород-коллекторов.

В данной работе был произведен расчёт упругих свойств, а именно коэффициента объемной упругости и сдвигового коэффициента упругости в породе-коллекторе в разных масштабах. В качестве такой породы рассматривался кальцит (карбонатный коллетор). В первую очередь расчет осуществлялся в наименьшем масштабе, размер которого имеет порядок мкм. Далее с увеличением масштаба (задача upscaling) появлялись различные параметры, такие как пористость, трещиноватость и другие, они в свою очередь оказывают влияние на упругие свойства, поэтому модули упругости в разных масштабах различаются.

Кроме вышесказанного, поровое пространство в кальците может быть заполнено разными флюидами и газами. В настоящей работе были построены три модели, где в качестве заполнителя выступали воздух, нефть и вода. Реализован алгоритм расчета эффективных значений упругих параметров пород в разных масштабах пласта по данным о составе пород, свойствам их компонент, форме, ориентации, связности компонент, их взаимному расположению и др.

- 1. Т.Д. Шермергор «Теория упругости микронеоднородных сред» издательство «Наука» 1977.
- 2. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The rock physics handbook: Tools for seismic analysis of porous media. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.
- 3. В.С. Захаров, В.Б. Смирнов «Физика планет» издательство «ИНФРА-М» 2016.
- 4. Гасеми М.Ф., Баюк И.О. «Петроупругая модель оолитового известняка в масштабе керна» Экспозиция Нефть Газ. 2018. Т. 63. № 3. С. 36–40.

5. Гасеми М.Ф., Баюк И.О. «Петроупругое моделирование карбонатных породколлекторов с использованием модели двойной пористости» Экспозиция Нефть Газ. 2018. Т. 65. № 5. С. 21–25.

ВЛИЯНИЕ ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЯ ФЛЮИДА НА РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Бондаренко Н.Б.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия E-mail: nb.bondarenko@physics.msu.ru

Жидкости играют ключевую роль во многих процессах, протекающих в геологических средах. Например, фильтрация флюида и связанные с ней разрушения являются определяющими явлениями в таких сферах деятельности как геотермальная энергетика, гидроразрывы пластов для повышения отдачи углеводородов, захоронение жидких отходов и др. С другой стороны влияние флюида на геологическую среду – одна из причин наведенной сейсмичности. Это проявляется в регионах с крупными водохранилищами. В России это наблюдается, в частности, в районах Байкальско-Ангарского каскада и Чиркейской ГЭС, а классическим мировым примером является район водохранилищ Койна и Варна в западной Индии. Проведение анализа процесса подготовки и развития землетрясения с учетом влияния присутствующей в геологической среде жидкости в естественных условиях сейсмоактивного района затруднительно, поэтому лабораторное моделирование процесса значительный интерес.

Цель данной работы — выявление факторов влияния различных режимов изменения порового давления на развитие процесса разрушения и прояснение особенностей процесса разрушения, вызванного инжекциями флюида.

В результате было обнаружено:

- Эффект модуляции активности акустической эмиссии уровнем порового давления;
- Задержка максимума акустического отклика относительно момента подачи порового давления (задержка активизации процесса разрушения при флюидной инициации в случае распространении флюида в сухой среде в несколько раз больше, чем при распространении фронта диффузии порового давления в насыщенной среде);
- Изменение наклона графика повторяемости в результате инжекции флюида.

- Потанина М. Г. и др. "Особенности акустической эмиссии при флюидной инициации разрушения по данным лабораторного моделирования" // Физика Земли. -2015, -№2, с. 126-138
- 2. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Динамика разрушения моделей геологической среды при триггерном влиянии жидкости. Физика Земли. 2011. № 11. С. 48–63.
- D. A. Lockner "The role of acoustic emission in the study of rock fracture" // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Volume 30. –1993, Issue 7, Pages 883–899.
- 4. Serge A. Shapiro "Fluid-Induced Seismicity" // Cambridge university press 2015.
- 5. X. Li, X. Lei, Q. Li. Injection-induced fracturing process in a tight sandstone under different saturation condition. Environmental Earth Sciences. 2016. Vol. 75 (23).
- 6. W. Ying, P. M. Benson, R. P. Young. Laboratory simulation of fluid-driven seismic sequences in shallow crustal conditions. Geophysical research letters. 2009. Vol. 36.

МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СРЕДИЗЕМНОМОРСКОГО РЕГИОНА

Воскунов Д.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: denis.voskunov@yandex.ru

Разложение тензоров моментов на изотропный (ISO), двойной диполь (DC) и компенсированный линейный векторный диполь (CLVD) является инструментом для классификации и физической интерпретации сейсмических источников.

Тензор моментов описывает эквивалентные силы тела, действующие на сейсмический точечный источник, и является базовой величиной, оцениваемой для землетрясений всех масштабов от акустических эмиссий до крупных разрушительных землетрясений. Наиболее распространенным типом тензора моментов является источник двойного диполя (DC), представляющий собой силовой эквивалент сдвигового разлома в изотропных средах. Тем не менее, многие исследования показывают, что сейсмические источники достаточно часто отображают тензоры моментов со значительными компонентами без двойного диполя (non-DC).

Чтобы определить, какой тип сейсмического источника представлен найденным тензором моментов, в 70-е годы прошлого века рядом ученых было предложено разложение тензора моментов на три элементарные части: изотропную (ISO), двойной диполь (DC) и компенсированный линейный векторный диполь (CLVD) (Формула 1).

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{\rm ISO} + \mathbf{M}_{\rm DC} + \mathbf{M}_{\rm CLVD} \tag{1}$$

В своей работе мной был применен данный механизм разложения момента тензора для изучения механизмов землетрясений средиземноморского региона с магнитудой М ≥ 5,5 за период с ноября 2000 года по ноябрь 2018 года. В данный период времени в регионе произошло 57 событий, каждое из них отмечено на карте ниже.



Рис.1. Карта исследуемого региона с нанесенными на нее эпицентрами землетрясений. Желтым выделены землетрясения с магнитудами 5,5–5,9; оранжевым — с магнитудами 6,0–6,4; красным — с магнитудами 6,5 и выше.

Литература

1. Václav Vavryčuk Moment tensor decompositions revisited, Journal of Seismology (2015) 19: 231–252.

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ДЕФОРМИРУЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ ОБЩЕЗЕМНОГО ЭЛЛИПСОИДА

Канушин В.Ф., Долин С.В.

Сибирский ГУ геосистем и технологий, Новосибирск, Россия, e-mail: v.f.kanushin@sgugit.ru

Атмосферные масс постоянно перераспределяются по земной поверхности, что даёт возможность изучать вариации напряжённости гравитационного поля. Эти переменные аномальные массы атмосферы влияют на измеряемое ускорение силы тяжести. Вопросу влияния изменения в распределении атмосферных масс на значения ускорения силы тяжести посвящены работы [1, 2, 3], в которых получены формулы влияния изменений состояния атмосферы на измеряемое ускорение силы тяжести. [4]

Стоит заметить, что при измерениях силы тяжести с ошибкой 1 мкГал следует учитывать как прямое притяжение переменных аномальных масс атмосферы, так и вызываемые ими деформации.

Переменные аномальные массы атмосферы занимают сравнительно небольшой объём т, пролегая до высоты в несколько десятков километров над земной поверхностью. Потенциал этих масс выглядит следующим образом (1):

$$\mathbf{U}^{\tau}(\mathbf{r},\boldsymbol{\varphi},\boldsymbol{\lambda}) = f \int \frac{\delta(\mathbf{r}^{\prime},\boldsymbol{\varphi}^{\prime},\boldsymbol{\lambda}^{\prime})}{l^{\prime}} d\tau, (1)$$

Влияние масс на силу тяжести выражается производной $-\frac{\partial \mathbf{u}^{\tau}}{\partial \mathbf{r}}$. Потенциал вычисляется в гравиметрическом пункте, расположенном предельно близко к слою, но всё же при условии, что значение радиус-вектора сфероида несколько превышают значения радиус-вектора гравиметрического пункта.

Изменение давления атмосферы воздействует по-разному на поверхность суши и моря, приводя к различным компенсирующим перемещениям масс. Рассмотрим их раздельно (2), (3):

$$\mathbf{U}^{m} = \frac{\mathbf{f}\rho^{2}}{g} \int \frac{\Delta \mathbf{P}}{l_{0}} d\omega - fR^{2} \int \frac{\delta_{0}h}{l} d\omega, (2)$$
$$\mathbf{U}^{\mathbf{S}} = \frac{\mathbf{f}\rho^{2}}{g} \int \frac{\Delta \mathbf{P}}{l_{0}} d\omega - \frac{\mathbf{f}R^{2}}{g} \int \frac{\Delta \mathbf{P}r}{l} d\omega, (3)$$

На суше переменное давление Δp атмосферы, кроме прямого эффекта, приводит к упругим деформациям Земли. Деформации вызывает и переменная часть давления воды на дно моря. Массы, создающие давление над сушей, расположены опять на высоте Н гравиметрического пункта над сферой, а на море — это массы воды на сфере радиуса R.

Имея современные метеорологические данные воспользуемся формулой (4), для вычисления приращения ускорения силы тяжести на метеорологическом пункте в городе Тикси, приведённой в работе [1]:

$$\Delta g = -0.427 \cdot \Delta P \cdot \left(1 - \sin\frac{\Psi}{2}\right) + 0.0679 \int \Delta P \cdot \csc\frac{\Psi}{2} d\omega .$$
(4)

Здесь Δg выражено в микроГалах, ΔP — разница между нормальным значением атмосферного давления и реального, в миллибарах. Ниже представлена таблица значений, полученных из вычислений приращения силы тяжести.

			Таблица 1
Год	∆Р суша,	ΔР море, млБар	Δ g, мкГал
	млБар		
2003	-2,853	-3,853	0,617771529
2004	-10,353	-11,353	2,117267777
2005	-10,153	-11,153	2,077281211
2006	-14,153	-15,153	2,877012543
2007	-0,053	-0,953	0,053219282
2008	-2,053	-3,053	0,457825262
2009	-6,853	-7,753	1,412762547
2010	-5,553	-6,453	1,152849864
2011	-12,253	-11,153	2,397593561
2012	-15,553	-16,553	3,15691851
2013	-14,853	-15,853	3,016965527
2014	-8,253	-9,253	1,697408828
2015	-3,453	-4,453	0,737731229
2016	-8,553	-9,553	1,757388678

График приращения силы тяжести показывает, что приращение силы тяжести ведёт себя волнообразно, по отношению к эллипсоиду, так же себя ведёт и угловая скорость вращения эллипсоида. Говорить о прямом влиянии изменении ротационного режима на атмосферное давление нельзя, но также нельзя и отрицать этой зависимости.



Рис. 1. Приращение силы тяжести

Для более детального исследования предлагается вычислять угловую скорость на конкретной широте, для конкретного пункта или материальной точки. В связи с тем, что Земля является изостатическим телом, стоит учитывать это изменение, если речь идёт о релятивистских точностях.

- 1. Бровар В.В. Влияние изменений атмосферного давления на силу тяжести // Повторные гравиметрические наблюдения. М.: 1980. С. 27–33.
- 2. Двулит П.Д. Влияние атмосферных масс на гравитационное поле Земли // Геодезия, картография и аэрофотосъёмка. 1966. Вып. 16. С. 35–38.
- Парийский Н.Н., Перцев Б.П., Крамер М.В. Влияние изменений в распределении атмосферных масс на значение ускорения силы тяжести // Повторные гравиметрические наблюдения. – М.: 1982. – С. 12–26.
- 4. Двулит П.Д. Об учёте переменных аномальных масс атмосферы при высокоточных измерениях силы тяжести // Повторные гравиметрические наблюдения. М.: 1982.

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ЛУНЫ С УЧЕТОМ РАДИОАКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

Безруков Л. Б., Карпиков И.С.

Институт Ядерных Исследований РАН E-mail: karpikov@inr.ru

Жидкое ядра Луны [3] может говорить о наличии радиоактивных источников тепла. В рамках гидридной [1,2] модели Земли мы предполагаем решение уравнения теплопроводности для остывания Луны с высокой теплопроводностью у ядра и мантией, но с низкой теплопроводностью у коры. Для получения необходимой температуры порядка 1000 К в центре Луны, мы вводим в уравнение теплопроводности источник радиоактивного тепла, который в данном случае является калий 40.

Литература

- Л. Б. Безруков, В. П. Заварзина, А. С. Курлович, Б. К. Лубсандоржиев, А. К. Межох, В. П. Моргалюк, В. В. Синёв. Об отрицательно заряженном слое электрического поля Земли. Доклады академии наук, 2018, том 480, No 2, с. 155–157.
- 2. Ларин В.Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М.: Агар, 2005. 248 с.
- Presnall DC (1995) Phase diagrams of Earth-forming minerals. In: Mineral Physics and Crystallography: A Handbook of Physical Constants (AGU reference shelf 2). Ahrens TJ (ed) American Geophysical Union, p 248–268

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОГЕННЫХ Fe-Mn КОРОК

Ким Н.В., Новиков Д.С.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: kim.nv15@physics.msu.ru

На дне Мирового океана на протяжении миллионов лет происходит процесс образования железомарганцевых структур на поверхностях подводных гор. Железомарганцевые образования являются источниками рудных, редких и редкоземельных элементов, востребованных в экономике, чем обусловлен интерес мирового сообщества к их месторождениям.

Железомарганцевые корки представляют собой слоистые структуры толщина которых меняется в зависимости от места их образования и максимально достигает 25 см, при этом скорость их роста по различным оценкам, проведённым с помощью U-Th и Ве изотопных методов, находится в диапазоне 2–4мм/млн лет. Такой тип строения позволяет последовательно проследить эволюцию процессов рудообразования. Образец, использованный в этой работе, состоит из пяти характерных слоёв — R, I–1, I–2, II и III.

Были сделаны снимки поверхностей срезов слоёв образца на цифровом оптическом микроскопе VHX5000 Keyence, а также на сканирующем электронном микроскопе Quanta 3D FEG с возможностью элементного анализа. Эксперименты по рентгеновской дифракции проводились на дифрактометре PANalytical Empyrean. Расчёт дифрактограмм проводился с помощью программы HighScore Plus. Мессбауэровские спектры образцов были получены на установке MS1104 с источником Co⁵⁷(Rh) и обработаны при помощи программы UNIVEM.

Оптическая и электронная микроскопия позволили проследить морфологические изменения в процессе образования железомарганцевых корок. Для оценочного фазового анализа использовалась рентгеновская дифракция, показавшая изменения основных компонент от слоя к слою. Для более тонкого и точного анализа железистых фаз использовалась мессбауэровская спектроскопия, показывающая изменения валентных и спиновых состояний атомов железа в слоях корок. Эти изменения свидетельствуют о превращениях, происходивших с окружающими условиями (течения, кислородный состав воды, температура) в течение миллионов лет.

Проведённое исследование доказывает биогенное происхождение железомарганцевых корок. Показано, что сильные изменения в составе корки и валентных состояниях атомов железа (в слое I–2) связаны с глобальными изменениями внешних условий.

Научный руководитель: д. ф.-м. н. проф. А.А. Новакова.

ОСОБЕННОСТИ СТРАТИФИКАЦИИ ОЗЕР КИСЛО-СЛАДКОЕ И ТРЕХЦВЕТНОЕ

Комарова А.П., Иванова И.Н.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия e-mail: a ivair@yandex.ru,

Известно, что берега Белого моря в районе Кандалакшского залива поднимаются со скоростью около 4 мм в год. Часть морских заливов при этом постепенно превращается в «отделившиеся» озера, которые называют меромиктическими. Исследование отделившихся водоемов представляет интерес, как пример одновременного существования различных экосистем, важно для прогнозирования экологических катастроф, моделирования последствий при строительстве больших плотин и гидроэлектростанций. В данной работе исследовались вертикальные профили параметров озер Кисло-Сладкое и Трехцветное, находящихся на разных стадиях отделения от Белого моря.

15, 16 и 20 августа 2018 года проводились натурные измерения в районе Беломорской Биологической станции МГУ на озерах Кисло-Сладкое и Трехцветное. Измерения проводились многопараметрическими зондами RCM 9 LW (Aanderaa Instruments) и YSI 600OMS (YSI Incorporated). На выбранных станциях зондирований с шагом 0,25 м по глубине измерялись температура воды, концентрация растворенного кислорода, электропроводность и мутность воды. Точность измерений *T*, O_2 , C и S составляли 0,02°C, 0,25 мг/л, 0,02 мСм/см и 0,4 NTU.

Кисло-Сладкое озеро

Озеро Кисло-Сладкое — 60 м в ширину и 100 м в длину — соленое озеро с максимальной глубиной около 5 м, расположенное на берегу Ругозерской губы Кандалакшского залива Белого моря (66°32′54″ N; 33°08′05″ E), соединяется с морем небольшим протоком, вследствие чего морская вода может попадать в озеро во время высоких приливов. На этом озере проводились измерения на 6 станциях.

На глубине около 1,6 м достигается максимальная температура 20 градусов, далее она плавно убывает с увеличением глубины до 9,4 градусов. Верхний приповерхностный слой оказывается холоднее. В слое до 2 м от поверхности озера уровень кислорода возрастает. На глубине 2 м наблюдается наиболее насыщенный кислородом слой. Далее на глубине от 2 до 4 м концентрация газа уменьшается. После 4 м и до самого дна кислород полностью отсутствует, вместо него там в больших количествах появляется сероводород. Максимальное значение температуры находится примерно на одной глубине с максимальным значением кислорода.

В поверхностном слое (до 1 м) наблюдается резкий градиент солености, в целом соленость меняется от 14 г/л до 20–22 г/л ниже приповерхностного слоя и в придонном слое. Вертикальное распределение частоты Вяйсяля-Брента N показывает устойчивость системы, происходящих процессов, отсутствие выраженных резких скачков градиента плотности. Т.к. N²< 0, стратификация около поверхности водоёма и у берегов оказывается неустойчивой из-за притока пресных вод.

Трехцветное озеро

Трехцветное озеро расположено в Пеккелинской губе Белого моря, 66°35.53' с.ш., 32°59.97' в.д. Размеры водоема: 340×150 м, наибольшая глубина — 7.5 м. Приливные явления отсутствуют.

Озеро обладает ярко выраженной устойчивой стратификацией и состоит из 3 слоёв: верхний слой (до 2 м) гуминовый бледно-желтый, далее прослойка (около 10 см) темно-зеленого цвета из-за присутствия в нем зелёных фототрофных бактерий, третий слой (от 2 м до дна) бледно-зеленого цвета имеет плавное изменение оттенка от темнозеленого до светлого, мутноватый из-за кристаллов серы. [2]

Всего на озере проводились измерения на 7 станциях. Верхний слой водоёма (до 1,5 м) практически полностью опреснился (0,3‰). На глубине от 2 до 3 м значение солености резко увеличивается (примерно до 20‰), далее плавное возрастает до самого дна, причем нижний придонный слои имеет высокую соленость 23 ‰.

В поверхностном слое содержание кислорода достигает примерно 7мг/л. Ниже 2 м от поверхности озера кислород практически отсутствует, зато в больших количествах наблюдается сероводород. Бактериальная зеленая прослойка и нижние слои озера обладают характерным запахом сероводорода, усиливающимся ко дну.

На поверхности температура воды 17 градусов. В верхнем слое убывает достаточно плавно до 15 градусов. Во втором слое резко падает до 10 градусов. После зеленой прослойки до самого дна медленно спадает до 6 градусов. Для Трёхцветного озера квадрат частоты Вяйсяля-Брента имеет положительные значения на всей глубине, что говорит об устойчивой стратификации озера. Вертикальное распределение частоты Вяйсяля-Брента имеет максимум, который находится на глубине 2 м и имеет значение 9,9. Следует отметить, что устойчивая стратификация Трехцветного озеро обладает сезонной постоянностью [2].

До глубины 1,5 м значение мутности менее 1 NTU, мы наблюдаем практически прозрачную воду. На глубине 2 м мутность резко возрастает (до 30 NTU) благодаря наличию слоя зеленоокрашенных зеленых серных бактерий толщиной порядка 10 см. Этот бактериальный слой сохраняет свою толщину и глубину залегания по всей площади озера. В нижних слоях мутность возрастает от 17 до 40 NTU по направлению ко дну.

Заключение

- На глубине 2 м наблюдается максимум кислорода, температуры и солености. Такое распределение происходит на протяжении нескольких лет, исходя из измерений других авторов. Из этого следует, что данные характеристики являются особенностью озера. Однако в верхнем слое ещё происходят некоторые изменения из-за связи с морем.
- Трёхцветное озеро обладает ярко выраженной стратификацией: соленая морская вода осела на дно, а поверхностные слои опреснились. Наблюдается устойчивость положения бактериальных слоёв.

Работа выполнена во время учебной практики кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ.

- 1. Столяров А.П. Макробентос лагунной экосистемы Ермолинской губы (Кандалакшский залив, Белое море): особенности структуры, разнообразие и тенденция изменений. Вестник Тверского государственного университета. 2016 г. Серия: Биология и экология. Из-во. Тверь, №4, стр. 130–150.
- 2. Ю.К. Васильчук, Н.Л. Фролова, Е.Д. Краснова, Н.А. Буданцева, А.К. Васильчук, Л.В. Добрыднева, Л.Е. Ефимова, Е.В. Терская, Ю.Н. Чижова. Изотопногеохимический состав воды в меромиктическом озере Трехцветном на Беломорском побережье. 2016 г. Водные ресурсы, том 43, № 5, с. 555–566

ОЦЕНКА ДЛИНЫ СТАЦИОНАРНОЙ ВОЛНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ПАВОДКОВОГО ПОТОКА ПО СФОРМИРОВАННОМУ РЕЛЬЕФУ ДНА

Мартыненко Д. С.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: dmartynenko64@gmail.com

На основе физической модели, связывающей образование донных форм на дне рек с воздействием стационарных волн с неподвижными гребнями, существующих на поверхности потоков даже при малых значениях продольного градиента скорости, предлагается простой метод прогноза параметров донных форм максимальной длины, формирующихся пиковыми расходами воды, по заданному числу Фруда. Предлагается метод расчета параметров потока, соответствующих пиковому расходу воды, на основе измерения после спада воды продольных размеров донных форм, образованных при пиковом расходе. Метод проверяется на данных лабораторных и натурных исследований.

После проведения исследований были получены следующие результаты:

- Предложен простой метод определения продольных размеров донных форм, имеющих вид гребней, расположенных в шахматном порядке, образующихся в реках в паводок, если число Фруда Fr = 0.73. Размер донных форм определяется только числом Фруда, что позволяет использовать соотношения, полученные в лаборатории, для натурных условий.
- Число Фруда должно включать величины максимальной скорости и минимальной глубины над гребнем гряды при паводковом расходе воды. При выходе реки на пойму для определения числа Фруда можно использовать глубину, определенную по высоте береговых бровок.
- Найденные соотношения позволяют определить глубину и максимальную скорость паводкового потока, если после спада воды измерить продольные размеры трехмерных гряд в русле.
- Наибольшие ошибки в определении параметров донных гряд, при одинаковых погрешностях в определении чисел Фруда, соответствуют числам Фруда *Fr* > 0.7.

Литература

- Melnikhova O.N., Rykounov L.N. // Advances in Water Resources. 1998. V. 21. № 3. P. 193.
- 2. Лайтхилл Дж. Волны в жидкости. М.: Мир. 1981. 600 с.
- 3. Волков П.Ю., Достовалова К.В., Мельникова О.Н. и др. // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т 37. № 6. С. 834.
- 4. Бутов С.А., Волков П.Ю., Мельникова О.Н. и др. // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 1. С. 109.
- 5. Степанянц Ю.А., Фабрикант А.Л. Распространение волн в сдвиговых потоках. М.:Наука. 1996. С. 40.
- 6. Knight D.W., Brown F.A. // Journal of Hydraulic Research. 2001. V. 39. № 3. P. 283.
- 7. Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Попов И.В. и др. Русловой процесс. Л.: Гидрометеоиздат, 1959. С. 216.
- 8. Chanson H. // www.uq.edu.au/~e2hchans

КОНТРОЛЬ ФИЛЬТРАЦИИ МНОГОФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ В ГОРНОЙ ПОРОДЕ С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКОЙ РАДИОГРАФИИ

Плисс А.О.¹², Плетнева В.А.², Варфоломеев И.А.², Коробков Д.А.², Якимчук И.В.²

¹МФТИ (НИУ), ²Московский НИЦ «Шлюмберже», Москва, Россия E-mail: apliss@slb.com

Рентгеновская радиография стремительно развивается в последние десятилетия, в том числе и задача рентгеновского контроля фильтрационных процессов в образце гор-

ной породы. В первых экспериментах в этом направлении сьемка проводилась только до и после фильтрации, а процесс моделировали и сравнивали с полученными результатами [1]. Сейчас возможность динамической сьемки позволяет наблюдать сам процесс фильтрации в 2D или даже в 3D [2].

В докладе продемонстрирован подход к контролю многофазной насыщенности в образцах горной породы методом 2D рентгенографии с целью определения параметров насыщенности, скорости потока, а также непосредственного наблюдения фильтрационных процессов на поровом масштабе.

Для выполнения данных работ была собрана установка с возможностью получения рентгеновских проекционных изображений многофазных фильтрационных процессов в керне при давлениях, имитирующих пластовые (рис.1). Предельно достижимое пространственное разрешение снимков составляет около 2 мкм. Экспериментальная система основана на микротомографе SkyScan 1172 (Bruker MicroCT) с подключенным прецизионным насосом Quizix QX020 (Ametek), а также набором разделительных емкостей для подачи различных флюидов. Исследуемый образец помещается в томограф в специальном кернодержателе, выдерживающим всестороннее обжимное давление до 40 МПа. Давление порового флюида также может соответствовать реальному пластовому давлению, при этом его разница с обжимным должна составлять не менее 2 МПа.



Рис. 1. Фотография экспериментальной установки: кернодержатель с емкостью для отвода жидкости, микротомограф SkyScan 1172 (Bruker MicroCT), насос Quizix QX020 (Ametek), разделительные емкости.



Рис. 2. Поршневое насыщение образца горной породы водой. Изображения отнормированы на сухой образец, поэтому виден лишь насыщающий флюид.

Нами были успешно проведены несколько серий экспериментов на песчаниках с близкими значениями пористости (~25%), но существенно отличающейся структурой пустотного пространства. В экспериментах в образец последовательно закачивалась вода (рис. 2) и модельная нефть до равновесного распределения флюидов.

По теневым рентгеновским изображениям было получено распределение флюидонасыщенности в керне с временным разрешением до нескольких секунд. Как и ожидалось, профили насыщенностей существенно отличались для образцов с разными характерными размерами пор. Крупнопористая структура характеризуется быстрым появлением доминирующего канала фильтрации по центру и последующим медленным вытеснением нефти из переферийных зон, в то время как в мелкопористом образце наблюдается более однородное вытеснение, близкое к поршневому, с охватом по всей ширине образца (рис. 2).

Литература

- M.E. Coles a, R.D. Hazlett a, P. Spanne b, W.E. Soll c , E.L. Muegge a, K.W. Jones d. Pore level imaging of fluid transport using synchrotron X-ray microtomography. 1998. Journal of Petroleum Science and Engineering. Volume 19, Issues 1–2, January 1998, Pages 55-63.
- Kamaljit Singh, Hannah Menke, Matthew Andrew, Christoph Rau, Branko Bijeljic1 & Martin J. Blunt. Data Descriptor: Time-resolved synchrotron X-ray microtomography datasets of drainage and imbibition in carbonate rocks. 2018. Scientific data| 5:180265 | DOI: 10.1038/sdata.2018.265.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ПУЗРЬКОВЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ НА МЕЛКОВОДЬЕ

Прядун В.В.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: pryadun.vv15@physics.msu.ru

Исследования струйных выходов природного газа из морского дна имеют важное экологическое (оценка вклада в природные источники парниковых газов в процессы глобального потепления) и практическое (альтернативный источник топлива) значение. Для обнаружения струйных выходов природного газа используются, в основном, гидролокаторы. Детектирование и анализ акустических сигналов пассивным методом, является, на сегодняшний день, актуальным направлением исследования [1–2].

Целью данной работы было изучение применимости гидрофона в прибрежной мелководной зоне Черного моря. Исследование в нашем случае осложняется наличием большого количества разнородных шумов, отсутствующих на больших глубинах, на которых выполнялись исследования [1–2]. Однако небольшая глубина дает возможность параллельно использовать данные с подводной видеокамеры. Первой задачей работы являлось экспериментальное определение основной частоты звукового сигнала, производимого выделяющимися пузырьками газа и определение возможности выделения этой частоты на аудиограммах, полученных в реальных условиях.

В ходе исследования были проведены два эксперимента, первый — в лабораторных условиях на кафедре физики моря и вод суши МГУ имени М.В. Ломоносова, второй — в реальных условия на шельфе Черного моря (бухта Ласпи) в непосредственной близости от действующего сипа.

В лабораторном эксперименте сип моделировался следующим образом: вблизи дна резервуара с соленой водой через иглу диаметром 0,6 мм при помощи аквариумного компрессора выдувались пузырьки (рис. 1). Частота выхода пузырьков могла при этом регулироваться. Диаметр иглы был подобран так, чтобы размер пузырьков был максимально приближен к размеру пузырьков, наблюдаемых в бухте Ласпи (3 мм.). Глубина жидкости в контейнере составляла 0,5 м. Размер пузырьков определялся визуально при помощи градуировочной линейки, расположенной рядом с местом выхода пузырьков. Аудиосигнал записывался при помощи погруженного в воду широкополосного микрофона.

Анализ аудиозаписи показал, что в частотном спектре при отрыве пузырька наблюдается два основных пика: первый на частоте приблизительно 700 Гц, второй на частоте около 2800 Гц. Так же, при использовании иглы диаметром 0,8 мм были получены пузырьки диаметром 4 мм. В частотном спектре аудиозаписи этих пузырьков так же наблюдалось два основных пика: первый на частоте приблизительно 500 Гц, второй на частоте около 2000 Гц.



Рис. 1. Фотография лабораторного эксперимента

Рис. 2. Фотография натурного эксперимента

В работах [1–2] для оценки размеров пузырьков метана используется формула Минаерта, связывающая резонансную частоту пузырька газа с его радиусом [3]. Значение резонансной частоты пузырька, рассчитанное по данной формуле для лабораторного эксперимента, составило приблизительно 2400 Гц и 1800 Гц. На основе этих оценок, за основной пик был выбран пик частотой 2800 Гц и 2000 Гц.

Натурный эксперимент проводился в бухте Ласпи (Южный берег Крыма) на глубине 2 м в непосредственной близости от действующего метанового сипа. Запись аудиосигнала осуществлялась при помощи автономного гидрофона. Одновременно проводилась подводная видеосъемка с дублирующей микрофонной записью. Параметры окружающей среды измерялись и записывались мультипараметрическим зондом RCM 9 LW (Aanderaa) с датчиками давления, температуры, электропроводности, мутности и концентрации в непрерывном режиме [4] (рис. 2). Стрелкой на рис. 2 обозначено место выхода пузырьков метана. Размер пузырьков в месте выхода был определен при помощи видеозаписи и составил порядка 3 мм. Анализ аудиозаписей (основной и дублирующей) показал наличие пика частотой около 2700 Гц в момент выхода пузырьков, качественно совпадающего с пиком 2800 Гц, полученного в лабораторном эксперименте. При этом непосредственно перед моментом выхода на аудиозаписях наблюдается характерный шум, по наличию которого можно прогнозировать просачивание партии пузырьков.

Обработка звуковых сигналов была проведена при помощи программы Audacity, позволившей зачистить шумы и построить спектры частот выхода пузырьков газа.

Таким образом, в работе показана принципиальная возможность детектирования высачивающихся пузырьков газа на мелководье.

Также, хочу выразить благодарность моей научной руководительнице Ивановой И.Н. и к.ф.-м.н. Будникову А.А. за неоценимую помощь в проведении экспериментов.

- Johnson, H.P., Miller, U.K., Salmi, M.S., Solomon, E.A. Analysis of bubble plume distributions to evaluate methane hydrate decomposition on the continental slope. / Geochem. Geophys. Geosyst. 2015.16, 3825–3839. http://dx.doi.org/10.1002/
- Schneider von Demling et al. Acoustic imaging of natural gas seepage in the North Sea: sensing bubbles controlled by variable currents. / Limnol. Oceanogr. Methods, 8 (2010), pp. 155-171 https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.02.011

- 3. Minneart, M. On musical air-bubbles and the sound of running water. // Philos. Mag 16 (104), 1933, 235–248. https://doi.org/10.1080/14786443309462277.
- 4. Иванова И.Н., Будников А.А., Малахова Т.В. Влияние сезонной стратификации в Севастопольской бухте на содержание метана в воде. // Ученые записки физического факультета Московского Университета, № 5, 2018.

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД КАМЧАТКИ

Слепцова Ю.В.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия E-mail: syv18@mail.ru

Для понимания особенностей эволюции геомагнитного поля необходимо иметь представления о том, каким было магнитное поле Земли в разные времена. Для этого используют палеомагнитный метод, основанный на том, что естественная остаточная намагниченность (NRM) горных пород содержит информацию о направлении и величине древнего геомагнитного поля той геологической эпохи, в которой она образовалась.

В данной работе, с целью оценки палеомагнитной информативности лавовых пород и определения палеонапряженности геомагнитного поля, были исследованы магнитные свойства образцов лав вулканов Камчатки: Авачинский и Толбачик. Палеомагнитные исследования вулканических пород позволяют уточнить возраст лавовых потоков и получить данные для определения палеовековых вариаций геомагнитного поля для Камчатского региона.

Измеренные естественные характеристики образцов: естественная остаточная намагниченность In = $(3\div70)$ A/м, начальная магнитная восприимчивость ko = $(6\div32)\cdot10^{-3}$, фактор Кёнигсбергера Qn = $(3\div128)$. По критерию Дэя [1] доменная структура ферримагнитных зерен образцов является псевдооднодоменной: Irs/Isф= $0.09\div0.26$, Hcr/Hc= $2.0\div3.3$. По результатам размагничивания NRM образцов переменным магнитным полем и терморазмагничивания был сделан вывод, что NRM исследованных лавовых пород имеют достаточно высокую степень палеоинформативности. Микрозондовый анализ показал, что в образцах с вулкана Авачинский содержание магнетита Fe₃O₄ ($0.54\div0.76$) выше, а содержание ульвешпинели Fe₂TiO₄ ($0.14\div0.30$) ниже, чем в образце с вулкана Толбачик (Fe₃O₄ — 0.42, Fe₂TiO₄ — 0.34), что согласуется с результатами термомагнитного анализа: температура Кюри образцов с Авачинского вулкана составляет ($540\div580$) °C, с Толбачика — 310°C. На изображениях ферримагнитных зерен образца, характерные для высокотемпературного окисления.

Для определения палеонапряжённости геомагнитного поля использовался метод Телье-Кое [2]. Погрешность определения составляла порядка 8%. Величина палеонапряженности Hдр= 56 ± 3 мкTл при коэффициенте качества q = 15, определенная по NRM образца с вулкана Толбачик, оказалась довольно близка к значению современного магнитного поля в районе этого вулкана по модели IGRF-12 (H_{IGRF} = 53 мкTл). Полученные величины древнего геомагнитного поля Hдр = ($48 \div 58$) мкTл по образцам K17-3, K17-6 и K17-10 свидетельствует о том, что они принадлежат историческим лавовым потокам, относящимся к извержениям, произошедшим не позже 1827 года по данным [3]. Палеонапряженность (Hдр = 55 ± 3 мкT), полученная по образцам K17-8 и K17-9, отобранным с отметки 2130 м, также в пределах погрешности равна современному полю H_{IGRF} = 52 мкTл. Однако минеральный состав ферримагнитных зерен по данным микрозондового анализа довольно существенно отличается от магнитных зерен образцов K17-3 и K17-10. Это свидетельствует о том, что образцы K17-8 и K17-9 принадлежат другому лавовому потоку. По данным палеовековых вариаций [4] было установлено, что эти образцы относятся к излиянию лавы, которое произошло около 4500–5000 лет назад. Эта оценка возраста образца К17-9 оказывается несколько выше данных Базановой Л.И. (3800 лет) [3].

Направления NRM ориентированных образцов с вулкана Авачинский $(D_{NRM} = -(13 \div 37)^\circ, J_{NRM} = 57 \div 78^\circ)$ близки к направлению современного геомагнитного поля для района отбора (D = $-6.5^\circ, J = 65^\circ$).

Литература

- Day R., Fuller M., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1977. V. 13. P. 260–266.
- Coe R.S., Gromme C.S., Mankinen E.A. Geomagnetic paleointensitis from radiocarbondated lava fiows on Hawaii and the questions of the Pacific nondiple low. // J.Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 1740
- 3. Брайцева О.А., Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Крупнейшие голоценовые извержения вулкана Авачинский на Камчатке (этап 7250–3700 14С лет назад) // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 3–24.
- 4. McElhinny, M.V., and Senanayake, W.E. (1982). Variations in the geomagnetic dipole 1: The past 50000 years. // Geomag. Geoelect., 34, 39–51.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ПЕСЧАНЫХ НЕКОНСОЛИДИРОВАННЫХ ОБРАЗЦАХ, СОДЕРЖАЩИХ ГИДРАТ МЕТАНА

Фокин М.И.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, НГУ, Новосибирск, Россия E-mail: FokinMI@ipgg.sbras.ru

Газовые гидраты являются кристаллическими соединениями, образованными включением молекул газа в полости кристаллического каркаса из молекул воды. В природе такое соединение стабильно только при определенных Р-Т условиях. В настоящее время проявляется устойчивый интерес к разведке и оценке потенциальных запасов скоплений газовых гидратов. Интерес обусловлен энергетическим потенциалом гидратообразующего газа, который в большинстве скоплений состоит на 98 % из метана, являющегося одним из основных энергетических мировых ресурсов.

Одним из направлений в изучении гидратосодержащих пород является лабораторное изучение их акустических свойств. Данные исследования направлены на построение и калибровку зависимостей (эффективных моделей) между скоростями упругих волн и физическими свойствами образцов, а в особенности их гидратонасыщением. Наличие эффективных моделей позволит развивать сейсмические методы разведки и оценки потенциальных запасов природных газогидратных скоплений.

В настоящее время в качестве эффективной акустической модели гидратосодержащих сред широко применяется теоретическая модель Дворкина [1]. Сопоставление данной модели с экспериментальными данными приведено в работе [2]. По своим акустическим свойствам газовый гидрат метана близок ко льду, поэтому параллельно проводятся работы по изучению акустических свойств мерзлых образцов. В работе [3] исследуются акустические свойства песчаных образцов, содержащих лед. Авторы работы экспериментально показали зависимость скоростей упругих волн от температуры для образцов, содержащих лед, а также падение скоростей упругих волн при длительном выдерживании образцов при постоянных значениях температуры и давления. Данные эффекты не учитываются в модели Дворкина. Целью данной работы было экспериментальное выявление эффектов температурной зависимости и временного падения скоростей упругих волн в гидратосодержащих образцах.

В данной работе гидрат метана был сформирован в образце, состоящем из кварцевого песка и воды в массовом соотношении 10:1. В ходе эксперимента измерялись скорости распространения продольных (Р) и поперечных (S) волн. Гидратонасыщение образца было оценено в конце эксперимента по объему выделившегося газа при разложении гидрата. Наличие температурной зависимости определялось путем цикличного изменения температуры в пределах от – 18 до 9°С при постоянном газовом давлении в 100 атм. Данный температурный диапазон не выходит за границу стабильности гидрата метана. Наличие падения скоростей упругих волн в гидратосодержащих образцах определялось выдерживанием образца в стабильных Р-Т условиях в течении 450 ч.

В результате экспериментов было показано, что циклическое изменение температуры приводит к изменению скоростей Р- и S-волн, что подтверждает наличие температурной зависимости для гидратосодержащих образцов (рис. 1). Также было экспериментально подтверждено падение скоростей упругих волн при длительном выдерживании гидратосодержащего образца при постоянных Р-Т условиях (рис. 2).



Рис 1. Изменение скоростей Р- и S-волн при изменении температуры.



Рис 2. Падение скоростей Р- и S- волн при длительном выдерживании в стабильных Р-Т условиях.

Работа выполнена под руководством кандидата физико-математических наук Дугарова Г.А.

Исследования выполняются в рамках интеграционного проекта СО РАН № II.1.18.

Литература

- 1. Dvorkin J., Nur A. Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea data sets //Geophysics. 1996. Vol. 61. №. 5. P. 1363–1370.
- Dugarov G. A. et al. Laboratory validation of effective acoustic velocity models for samples bearing hydrates of different type //Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2019. – Vol. 63. – P. 38–46.
- Dugarov G.A., Duchkov A.A., Fokin M.I. Laboratory study of the acoustic properties of sand samples containing ice // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 193. – P. 012020–012020.

РАЗМЫВ ДНА КАНАЛА КОРОТКИМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ВИХРЯМИ, ОБРАЗОВАННЫМИ В ВЯЗКОМ СЛОЕ ПОТОКА ЖИДКОСТИ

Шабаев Э.В.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия Email: schabaev.ev15@physics.msu.ru

Получены результаты экспериментального исследования взаимодействия коротких цилиндрических вихрей, которые формируются в вязком слое неоднородных потоков жидкости, с песчаной подстилающей поверхностью. Для длинных вихрей свойственен захват песка во время образования вихрей, и дальнейший перенос песка, двигаясь вдоль циклоидальной траектории и совершая процесс нескольких перелетов. Новый тип размыва дна наблюдается в случае, если длина вихря лишь в несколько раз превышает толщину вязкого слоя. Из-за силы Кутта-Жуковского центральная часть начального цилиндрического вихря движется вверх, а концы вихря, находящиеся в песке, через торцы захватывают песок. В этой области отчетливо видны углубления (рис.1). Если для моделирования вихря использовать цилиндрический вихрь конечного диаметра, которые вращается как твердое тело (вихрь Рэнкина), то для давления внутри вихря на его оси можно записать:

$$p_{\min} = p_{\infty} - \rho \frac{\gamma^2}{\pi^2 d^2} \tag{1}$$

где p_{∞} — давление на границе вихря, ρ — плотность жидкости. Давление имеет минимум на оси вихря, глубина которого резко возрастает при уменьшении диаметра ядра вихря. В экспериментальном исследовании было установлено, что диаметр опор вихря быстро уменьшается у песчаной поверхности, что способствует резкому уменьшению давления и интенсивному захвату частиц грунта.



Рис. 1. Размыв дна торцами цилиндрического вихря. и — скорость потока жидкости Стрелками показаны углубления в песке, сформированные торцами вихря.

При разрушении вихрей на дно канала выпадает захваченный торцами опор песок. В случае, когда короткие вихри формируют кольцевые вихри при сближении вертикальных опор, песок выпадает в зоне разрушения кольцевых вихрей. Выпадение происходит на первом, втором перелете начального цилиндрического вихря. При увеличении длины начального цилиндрического вихря зона разрушения вихря смещается вдоль по потоку.

- 1. Мельникова О.Н. 2005. Формирование гряд на дне прямого канала потоком со свободной поверхностью. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 41. №5. С. 682–690. Translation: Mel'nikova O.N. 2005. Ridge Formation on the Bottom of a Straight Channel by a Stationary Flow with a Flat Free Surface. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. V. 41. № 5. Р. 620–627.
- 2. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН. 2003. 504 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОФИЗИКА

Механизмы неупругого деформирования пород-коллекторов Бананов Р.В.	193
Трехмерная структура волновых аттракторов, порождаемых локализованными источниками возмущен в стратифицированной жидкости Ватутин К.А.	ий 194
Парожидкостное равновесие смесей углеводородов: оценка параметров равновесия при использовании различных кубических уравнений состояния смеси Грушников И.Ю.	a 195
Предварительный анализ восстановления арктического климата с помощью глобальной и регионально модели Зароченцев Г.А.	ой 196
Связь параметров самоподобия в афтершоковых последовательностях Карцева Т.И.	197
Исследование статистических характеристик поля внутренних волн в Охотском море (по результатам экспедиций СКБ САМИ ДВО РАН) Кокоулина М.В., Гиниятуллин А.Р., Рувинская Е.А.	198
Шумы сейсмодатчиков с цифровыми и аналоговыми цепями обратных связей Крылов А.В., Марченков А.Ю.	199
Трехмерное моделирование поля кругового электрического диполя при зондировании в морских условиях Арктики Осипова П.С.	199
Моделирование и оценка эмиссий малых газовых составляющих в приземном слое атмосферы Московского мегаполиса	201
Идентификация геомагнитных джерков по данным среднеширотных российских обсерваторий Рябова С.А.	202
Исследование молекулярного взаимодействия водной компоненты буровых растворов с глинисто- аргиллитовыми породами методом ЯМР Ускова Е.И., Дорогиницкий М.М., Скирда В.Д., Фатхутдинов И.Х.	204
Прогноз физических свойств пород-коллекторов в различных масштабах 2 Чернышов С.П.	206
Влияние порового давления флюида на разрушение образцов горных пород 2 Бондаренко Н.Б.	207
Механизмы очагов землетрясений средиземноморского региона	208
Влияние атмосферного давления на деформирующий потенциал общеземного эллипсоида 2 Канушин В.Ф., Долин С.В.	209
Решение уравнения теплопроводности для Луны с учетом радиоактивных источников тепла	211
Исследование биогенных Fe-Mn корок	211
Особенности стратификации озер Кисло-Сладкое и Трехцветное 2 Комарова А.П., Иванова И.Н.	212
Оценка длины стационарной волны на поверхности паводкового потока по сформированному рельефу дна	214
Контроль фильтрации многофазной жидкости в горной породе с помощью рентгеновской радиографии	214
Применение пассивного акустического метода для пузрьковых газовыделений на мелководье	216

Палеомагнетизм вулканических пород Камчатки Слепцова Ю.В.	. 218
Экспериментальные акустические измерения на песчаных неконсолидированных образцах, содержал гидрат метана Фокин М.И.	цих . 219
Размыв дна канала короткими цилиндрическими вихрями, образованными в вязком слое потока жидкостиШабаев Э.В.	. 221