

Подсекция:
НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Сопредседатели
профессор В.И.Трухин, профессор В.Е.Куницын,
профессор К.В.Показеев

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ВНУТРЕННИХ ВОЛН
НА МЕЛКОВОДЬЕГл. научн. сотр. *Шелковников Н.К.*

Известно, что длинные волны ($\lambda \gg H$) любого происхождения, в том числе и ветровые, при выходе на континентальный шельф трансформируются: их длина λ уменьшается, а высота h увеличивается с уменьшением глубины H . В итоге происходит их обрушение, и заплеск на берег. При этом процесс трансформации зависит от нескольких параметров, в том числе от величины угла берегового откоса. Высота волн на пологих откосах растет быстрее, чем на крутых. При увеличении угла λ до 90° происходит их отражение от вертикальной стенки и формирование стоячих волн.

В принципе возможен и другой вариант формирования мелкого моря $\lambda \gg H$, не за счет уменьшения глубины, а за счет увеличения со временем длины волны при постоянной глубине. Такой процесс имеет место при развитии ветровых волн в кольцевом аэрогидроканале. Именно этот вариант нами использовался при исследовании трансформации ветровых волн. При этом в канале под действием ветра и при постоянной глубине жидкости последовательно проходили все стадии волн от капиллярных до уединенных. [1]

Формирование уединенных волн на начальной стадии сопровождается увеличением их длины и фазовой скорости. Особенно важным является, увеличение их высоты, которая в придельной стадии может достигать значения 1,7 по сравнению с обычными ветровыми волнами при тех же условиях. Этот факт позволяет считать, что процесс развития метеоцунами в морских условиях является аналогичным ветровым уединенным волнам.

Следует отметить, что в последнее время обсуждаются вопросы, связанные с так называемыми волнами-убийцами. Под этим термином понимаются гигантские волны, неизвестного происхождения, приводящие к катастрофическим последствиям, в том числе к гибели судов. По описаниям очевидцев, волны-убийцы появляются внезапно, как бы ниоткуда. Трагическая статистика свидетельствует, что за период 1964-1994г было потеряно или существенно повреждено в Тихом и Атлантическом океанах 22 супертанкера и 12 подобных случаев произошло в Индийском океане у берегов Южной Африки [2]. Отметим, что здесь речь идет в основном о судах, длина которых сопоставима с длиной ветровых волн в океане. В этом случае не обязательно искать волну-убийцу для серьезной аварии, достаточно встретиться с обычной гигантской ветровой волной. В литературе приводятся разные гипотезы для объяснения возможных причин появления таких волн в том числе: изменение атмосферных условий, нелинейная модуляционная неустойчивость, взаимодействие солитонов. Анализируя описа-

ния трагедий в морских условиях, мы пришли к выводу, что одной из возможных причин подобных аварий в районах континентального шельфа могут быть ветровые уединенные волны.

Кроме того, было проведено исследование трансформации поверхностных и внутренних волн на мелководье, обусловленном наличием берегового откоса. Измерения проводились в прямолинейном канале, который заполнялся или однородной, или стратифицированной жидкостью. Волны в обоих случаях создавались волнопродукторами. Во время экспериментов угол наклона откоса изменялся. Измерения проводились как волнографами, так и с помощью видеокамеры. Было показано, что при накате длинных волн на береговой откос высота последних увеличивалась, а обрушение имело антициклонический характер. В случае внутренних волн, увеличение их высоты не наблюдалось, а обрушение происходило против часовой стрелки, что вызвано характером сгонно-нагонных течений, обусловленных внутренними волнами. Таким образом, выявлено, что трансформация на береговом откосе (при одном и том же угле) поверхностных и внутренних волн имеет свои особенности.

Литература

1. Шелковников Н. К. //Письма в ЖЭТФ том 82 вып. 10, 2005 г.
2. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. «Волны-убийцы: факты, теоремы и моделирование». – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. техн. ун-т 2004.

ЗОНДИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ: ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ И РОСТ СКОРОСТИ ВЕТРА С ВЫСОТОЙ

Ст.науч.сотр. *Юшков В.П.*, профессор *Каллистратова М.А.* (ИФА РАН),
вед.науч.сотр. *Кузнецова И.Н.* (Росгидрометеоцентр)

Введение. На физическом факультете МГУ уже в течении ряда лет проводятся дистанционные измерения скорости ветра над Москвой до высот на которых прямые контактные измерения трудны и недоступны [1,2]. В последний год эти измерения были дополнены дистанционными измерениями температуры с помощью СВЧ-профилирования атмосферного пограничного слоя [3], а также контактными высокочастотными измерениями атмосферной турбулентности с помощью акустического датчика скорости и температуры.

Длительные непрерывные наблюдения позволяют получить общую картину сезонной, суточной и синоптической изменчивости поля ветра и изучить связи скорости ветра в атмосферном пограничном слое (АПС) с

его температурной стратификацией. В АПС происходят процессы переноса тепла, импульса, а также загрязняющих компонент от поверхности в свободную атмосферу и особенности этих процессов необходимо изучать для лучшего понимания физики атмосферы.

Скорость ветра в АПС, ее сезонная и суточная изменчивость. Трехлетнее непрерывное измерение скорости ветра позволило получить не только общую картину "ветренности" в АПС над Москвой, но и проанализировать межгодовую изменчивость, изучить частоту повторяемости сильных и слабых ветров на разных высотах, исследовать как рост скорости ветра с высотой зависит от времени суток и синоптической ситуации.

Для измерения скорости ветра в АПС до высоты 500 метров используется принцип акустической локации – рассеяние акустического импульса на мелкомасштабных температурных неоднородностях, переносимых ветровым потоком. Измерение доплеровского сдвига частоты в рассеянном обратном сигнале на трех направлениях позволяет восстановить полный вектор скорости ветра. Такой моностатический трехкомпонентный акустический локатор – содар – был разработан в институте физики атмосферы им.А.М.Обухова и назван ЛАТАН-3 [2] и одновременные согласованные измерения ведутся и на Физическом факультете МГУ и в центре Москвы, в институте физики атмосферы им.А.М.Обухова. Кроме того этот содар зарекомендовал себя измерениями в Антарктиде и во множестве экспедиций и полевых испытаний.

Анализ средних профилей скорости ветра показывает, что в летний период над Москвой наблюдается наибольший суточный ход вариаций профилей скорости ветра, что связано с наибольшим изменением условий устойчивости – от конвективных условий жарким днем, когда обмен импульсом и теплом между подстилающей поверхностью и свободной атмосферой наиболее эффективен до сильно устойчивой стратификации в ночные часы и ранним утром, когда радиационное выхолаживание приводит к оседанию более холодных и плотных слоев атмосферы и разные слои как бы скользят друг по другу почти без взаимодействия и тихие условия у поверхности сопровождаются высокими скоростями ветра на высоте 200-300 метров.

В зимний сезон погода средних широт характеризуется частой слоистой и сплошной облачностью поэтому различия температурной стратификации в суточном ходе минимальны и определяются главным образом сменой синоптических процессов. Дополнительной особенностью городской среды является искусственный подогрев, который приводит к взаимодействию воздушных масс в нижней части АПС. Этому способствует и турбулентность в городской застройке. В результате, скорость ветра в зимний период вне зависимости от времени суток сильно

уменьшается у поверхности и быстро возрастает на верхней границе АПС.

Вариации скорости ветра в городском пограничном слое. Для каждого месяца, каждого сезона, различных высот и разного времени суток по результатам долговременных наблюдений были построены распределения скоростей ветра измеренных за получасовые периоды усреднения. Распределение скоростей ветра в АПС позволяет представить характерный «разброс» скоростей, синоптическую изменчивость скорости ветра. Это распределение для достаточно больших интервалов времени, охватывающих несколько синоптических периодов, вполне удовлетворительно аппроксимируется круговым нормальным распределением с параметром, зависящим от высоты над поверхностью и сезона.

Роза ветров в Москве характеризуется преобладанием западного переноса, при этом выделенного направления ветра, имеющего явное преимущество по отношению к остальным не наблюдается. Москва, в этом смысле, как город посреди Русской равнины не подвержена особенностям гористой или бризовой циркуляции.

Сравнение измерений, проводимых в центре города и на Физическом факультете МГУ показали интересное свойство ветровых течений над Москвой: по распределению ветров видно, что Ленинские горы, как крупная возвышенность над рекой Москвой изменяет поле натекающего потока. С учетом высоты здания Физического факультета (40 м) по сравнению с измерениями в ИФА РАН (10 м), разница соответствующих уровней еще составляет около 50 метров, что близко к абсолютной разнице топографии точек наблюдения.

Содар ЛАТАН-3, обладая открытой архитектурой в отличие от большинства коммерческих приборов, позволяет легко настраивать и контролировать условия измерений. С помощью этого прибора оказывается возможным надежно измерять вариации радиальных (к акустическому импульсу) компонент скорости ветра и таким образом исследовать турбулентность АПС. По результатам длительных измерений были рассчитаны средние профили дисперсии вертикальной компоненты скорости, ее средний суточный ход на разных высотах, построены распределения дисперсий по получасовым измерениям в разное время суток и в разные сезоны. Эти измерения выявили слабую зависимость характеристик турбулентности от высоты, гораздо более ярко выраженный суточный ход и слабую зависимость от точки наблюдения.

Кроме того мы провели предварительные расчеты мезомасштабной изменчивости скорости ветра по «коротким» сериям измерений, которые показали достаточную надежность содарных измерений вариаций скорости (порывистости). Еще не решенной проблемой в этом направлении остается учет быстрого изменения скорости ветра при прохождении фронтальных

зон и верификация метода.

Связь вариаций скорости ветра и профилей температуры. В условиях устойчивой стратификации скорость ветра быстро растет с высотой и на уровне 200-300 метров достигает значений 15-20 м/с, при этом у самой поверхности наблюдаются условия близкие к штилевым. Устойчивость АПС оказывает сильное влияние на рассеяние акустического сигнала. В условиях сильной устойчивости на высоте 100-300 метров часто формируется так называемое струйное течение – формируется выраженный максимум скорости ветра. Характеристикой устойчивости служит вертикальный градиент потенциальной температуры. Наши долговременные наблюдения показали, что формирование инверсионного слоя в городской среде происходит совершенно иначе, чем в загородной местности. В городской среде изменяется распределение градиентов потенциальной температуры и в условиях радиационного выхолаживания часто формируется приподнятый максимум градиента потенциальной температуры. Сравнение результатов измерений в теплый и холодный сезон в центре Москвы показывает круглогодичное влияние городского подогрева, причем в зимний период часто вблизи поверхности наблюдаются условия конвекции из-за обогрева зданий и «уличной торговли». Из-за увеличенного перемешивания городского воздуха, в частности, атмосферное загрязнение формирует слой охватывающий весь городской воздушный бассейн. Изучение атмосферного перемешивания в городском АПС представляется, в этой связи, новым интересным направлением исследований.

Проведение исследований поддержано грантами РФФИ 05-05-64786, 07-05-13610 и 08-05-00984.

Литература

1. Юшков В.П., Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д., Курбатов Г.А., Крамар В.Ф. Опыт использования доплеровского акустического локатора для измерения профиля скорости ветра в городских условиях, Известия РАН, ФАО, 2007, 43(2), 193-205.

2. Кузнецов Р. Д. Акустический локатор ЛАТАН-3 для исследований атмосферного пограничного слоя. Оптика атмосферы и океана, 2007, т. 20, N 8, 749-753.

3. Кузнецова И.Н., Хайкин М.Н., Кадыгров Е.Н. Влияние городской среды на температуру в пограничном слое атмосферы по данным микроволновых измерений в Москве и окрестностях – Изв. РАН, ФАО, 2004, т. 40, № 5, с. 678-688

ОЦЕНКА МИКРОПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ПРИРОДНЫХ СТЕКЛОВАТЫХ СТРУКТУРАХ

Профессор *Петрунин Г.И.*, доцент *Попов В.Г.*

Среди геофизических материалов, входящих в состав вещества литосферы, особенно верхних ее частей, значительное место занимают породы стекловатой структуры. Они встречаются как в виде вулканических стекол (обсидианов), так и выполняют роль цемента в широко распространенных эффузивных породах (базальтах), достигая по содержанию 50% и более от объема породы и оказывая существенное влияние на ее теплопередающие свойства. Тем не менее, анализ литературных источников показал, что процесс теплопередачи в стекловатых (аморфных) породах, к настоящему времени, изучен явно недостаточно и, как правило, информация о нем базируется на отдельных измерениях и носит чисто феноменологический характер.

Особенности кондуктивного теплопереноса в твердых разупорядоченных средах обусловлены, прежде всего, отсутствием дальнего порядка в расположении ионов и атомов. С одной стороны, этот беспорядок препятствует формированию длинноволновых пакетов, а с другой – упругие волны смещений, переносящие тепловую энергию, более интенсивно рассеиваются на флуктуациях их масс и упругих модулей, плотность которых значительно выше в аморфных структурах по сравнению с кристаллами. Существует предположение, что средняя длина свободного пробега упругой волны смещений, для геофизических разупорядоченных сред, уже при комнатных температурах очень мала и сравнима с удвоенным межатомным расстоянием /плавленый кварц/, чем и объясняется их аномально низкие значения температуропроводности и теплопроводности. Что касается других физических параметров, определяющих величину теплопроводности твердых тел: теплоемкости и скорости звука /скорости распространения волн смещений между актами рассеяния/, то поскольку средние значения масс и упругих констант, определяющих эти величины, практически одинаковы при данных термодинамических условиях для аморфных структур и их кристаллических аналогов, указанные параметры должны отличаться незначительно. Таким образом, при исследовании процесса теплопередачи в аморфных структурах, как и в кристаллах, наиболее информативным параметром является средняя длина свободного пробега волн смещений (фононов), которая может быть рассчитана из экспериментальных определений температуропроводности и скорости звука. Ее величина и характер поведения от различных петрографических и термодинамических параметров несет информацию о процессе теплопередачи на кинетическом уровне, позволяет перейти в исследовании от феноменологическо-

го подхода к микроскопическому и дать ответы на вопросы, связанные с особенностями механизма кондуктивной теплопередачи в стекловатых, стекловато-кристаллических и скрытокристаллических средах.

В настоящем сообщении очень кратко обсуждаются результаты оценки средней длины свободного пробега фононов в образцах вулканических стекол (обсидианах), отобранных из различных регионов Евразийского континента (Малый Кавказ, Армения, Камчатка) и в искусственных стеклах: плавленом кварце (КВ) и ситалле СО 115.

Измерения температуропроводности (a) образцов проводилось в температурном интервале 350 – 750К в регулярном тепловом режиме III-го рода, позволяющем исключить искажающее влияние теплообмена излучением с поверхности образцов на результаты измерений, которое может быть весьма существенным для плохих проводников тепла уже при повышенных температурах. Методика и аппаратура реализации метода с бесконтактным световым источником создания температурных волн подробно описана в [1]. Для предотвращения прямого просвечивания, образцы покрывались тонким слоем сажи. Относительная ошибка определения a при комнатной температуре составляет 3-5%, при повышенных температурах – не превосходит ~7%.

Полученные экспериментальные результаты представлены на рис. 1. Они позволяют сформулировать две основные особенности поведения a аморфных структур, как природных, так и искусственных: очень низкие значения величин a обсидианов и ситалла $(4\div 5)\cdot 10^{-7}$ м²/с, даже по сравнению с кварцевым стеклом марки КВ $(8,3)\cdot 10^{-7}$ м²/с, и нетипичный для большинства минералов и поликристаллических горных пород характер поведения в исследованном температурном диапазоне температуропроводности. На кривых $a(T)$ стекол наблюдается неглубокий, но вполне ощутимый минимум, приходящийся на температуры начала свечения (500÷550К), который либо отсутствует в кристаллических породах, либо сдвинут в область более высоких температур (1000÷1200К) [2].

Температура 500К, в акустическом приближении теории теплопроводности твердых тел (кристаллов), близка к характеристической для изучаемых материалов и, согласно теории, температуропроводность a , следовательно, и средняя длина свободного пробега фононов должна уменьшаться с ростом температуры (при $T > 500$ К) по закону обратной пропорциональности ($\bar{l} \sim 1/T$). Однако эксперименты на аморфных структурах дают иную картину – рост температуропроводности при $T > 500$ К. Для оптического кварцевого стекла марки КВ эта особенность давно известна [3] и объясняется вкладом в температуропроводность (теплопроводность) радиационного переноса – переноса тепла фононами, который из-за низкого коэффициента поглощения начинает обнаруживать себя практически, начиная с температур свечения. Но следует также предположить, что конку-

рирующее влияние слабой фотонной составляющей возможно только тогда, когда средняя длина свободного пробега фононов близка к минимуму и фонон-фононное температурное рассеяние фактически уже не влияет на ее величину.

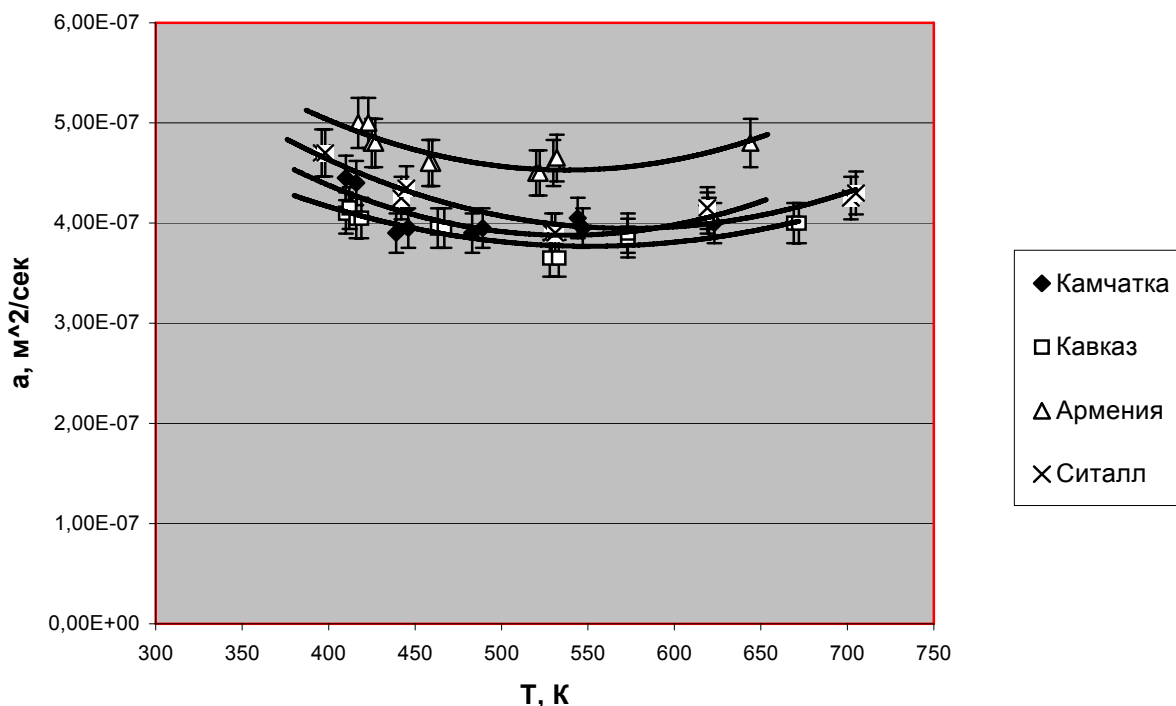


Рис.1. Температуропроводность обсидианов (Камчатка, Кавказ, Армения) и ситалла

Чтобы проверить это предположение, нами была измерена скорость продольных V_P и поперечных V_S акустических волн в исследуемых образцах, рассчитана средняя скорость \bar{V} движения фононов и, по известной формуле $a = \frac{1}{3}(\bar{l} \cdot \bar{V})$ из экспериментальных значений a оценена средняя длина свободного пробега фононов при температуре близкой к комнатной для обсидианов и ситалла. Полученные значения сравнивались с минимально возможными l_{min} , которые рассчитывались теоретически по способу, предложенному в [1] и основанному на том факте, что в твердом теле с дискретной структурой длина волны распространяющихся упругих колебаний не может быть меньше удвоенного расстояния между соседними атомами в веществе. Другими словами, согласно теории, l_{min} фононов определяется максимальной частотой – частотой обрезания дебаевского спектра ν_{max} и средней скоростью распространения волн смещений \bar{V} . Однако и при высоких температурах в дебаевском спектре частот будут присутствовать и длинноволновые колебания, определяя тем самым и несколько большее время жизни, а, следовательно, и длину свободного пробега в высоко энергетическом фононном газе. Можно попытаться учесть распределение фо-

нонов по спектру, используя обычное усреднение и ввести эффективную

частоту $\langle \nu \rangle = \int_0^{\nu_{\max}} \nu G(\nu) d\nu = \frac{3}{4} \nu_{\max}$, где $G(\nu)$ – функция плотности вероятности частот $\sim \nu^2$. Если l_{\min} связать с этой оценкой, то ее значение увеличится в 1,33 раза.

Таблица 1.

Образец	ρ , кг/м ³	$\bar{\nu}$, м/с	$a \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ при T=400K	$a \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ при T=550K	l_{400} , Å	l_{550} , Å	l_{\min} , Å	$\langle l \rangle$, Å
Обсидиан (Кавказ)	2200	2740	4,10	3,70	4,50	4,0	4,0	5,3
Обсидиан (Армения)	2300		4,85	4,60	5,30	5,0	4,0	5,3
Обсидиан (Камчатка)	2200		4,45	3,90	4,85	4,3	4,0	5,3
Ситалл	2440	3030	4,70	4,00	4,65	4,0	3,9	5,2

Как следует из таблицы 1, экспериментальные значения длины свободного пробега в аморфных структурах попадают в диапазон между l_{\min} и $\langle l \rangle$, оцененной из эффективной частоты $\langle \nu \rangle$. Тот факт, что температуропроводность оптического кварцевого стекла марки КВ, существенно превосходит полученные результаты по обсидианам и ситаллу, также находит свое объяснение. Проведенный химический анализ образцов показал, что природные вулканические стекла близки по составу и являются продуктами стеклования кислой магмы, содержащей около 75% окиси кремния (SiO_2). В ситалле ее несколько меньше (67%), но она компенсирована в нем повышенным содержанием окиси алюминия (21,5%) против 13,8% в обсидианах. Оставшийся состав представлен окислами K_2O , Na_2O , TiO_2 , CaO и FeO . Таким образом, в обсидианах и ситалле, по сравнению с КВ (~100% SiO_2), к позиционной разупорядоченности добавляется химическая разупорядоченность, связанная с присутствием в структуре атомов различной химической природы (К, Na, Al, Ti, Ca, Fe), существенно повышающих плотность флюктуаций масс и упругих констант, которые активно рассеивают фононы и снижают среднюю длину их свободного пробега до минимума уже при комнатных температурах.

Полученные результаты могут быть полезны для развития теоретических представлений об особенностях теплопередачи в сложных многоатомных аморфных структурах, оценки тепловых свойств вещества лаво-

вых потоков, магматических очагов и других локальных зон с повышенным содержанием аморфных фаз, необходимых при изучении их термических режимов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 08-05-00413

Литература

1. Петрунин Г.И., Попов В.Г., Нестеров А.Г. Установка для измерений температуропроводности и теплоемкости горных пород и минералов в интервале температур 300-1000К. Рукопись депонирована в ВИНТИ. № 4744-81 Деп. 9.10.81, 28 с.
2. Петрунин Г.И., Попов В.Г. Особенности температурного поведения решеточной теплопроводности минерального вещества Земли. Физика Земли, № 7-8., 1994, с. 35-41.
3. Сергеев О.А., Мень А.А. Теплофизические свойства полупрозрачных материалов. Изд. Стандартов, М., 1977, 288 с.
4. Петрунин Г.И., Попов В.Г. О фононной теплопроводности и ее поведении на границах раздела в верхней мантии. Изв. АН СССР, сер. Физ. Земли, № 6, 1983, с. 87-92.

О ПРИРОДЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ БАЗАЛЬТОВ КРАСНОГО МОРЯ

Профессор *Трухин В.И.*, профессор *Максимочкин В.И.*,
студентка *Хачко О.И.*

Исследование природы естественной остаточной намагниченности океанских базальтов имеет большое значение при изучении процессов формирования земной коры в океанских рифтовых зонах, при интерпретации палеомагнитных океанских аномалий и получения информации об эволюции главного геомагнитного поля.

Одной из молодых рифтовых систем, где по современным представлениям идет процесс формирования самой молодой океанской коры, является рифтовая система Красного моря.

Геомагнитными исследованиями [1] в северной части Красного моря была выявлена некоторая область, на которой распределение аномального геомагнитного поля (АГП) напоминает океанские линейные магнитные аномалии. Было также установлено, что образцы базальтов, поднятых со дна Красного моря, имеют очень высокие величины естественной остаточной намагниченности I_n и фактора Кенигсбергера $Q_n = I_n/kH = 500-1000$.

(здесь k – начальная магнитная восприимчивость, H – напряженность геомагнитного поля). В результате подробного изучения [2,3] магнитных и петрохимических свойств коллекции образцов базальтов, отобранных в рифтовой зоне аппаратом Пайсис, был выявлен сильный разброс естественных магнитных параметров I_n и k и магнитных параметров I_{rs} , H_c , T_c , отражающих структурное и фазовое состояние ферромагнитных зерен. Обнаружены образцы базальтов с низкими точками Кюри ($T_c=200-220$ °C), титаномагнетитовые зерна которых были затронуты процессами однофазного окисления, и образцы с $T_c=300-350$ °C и признаками гетерофазного окисления титаномагнетита. Последнее не характерно для молодых океанских базальтов возрастом менее 1 млн лет.

На образцах базальтов с низкой точкой Кюри (1-я группа образцов) в основном наблюдалась корреляция между величинами I_n (Q_n), и их коэрцитивностью. На образцах с повышенными точками Кюри и признаками гетерофазного окисления титаномагнетита такая корреляция отсутствовала, а величина фактора Кенигсбергера Q_n была выше, чем на образцах первой группы.

Насколько сохранилась первичная остаточная намагниченность этих базальтов и в чем причина столь высокой величины I_n и Q_n , особенно на образцах с признаками гетерофазного окисления? Ответы на эти вопросы мы попытались получить путем изучения природы I_n базальтов.

Так как подводные базальты образуются при излиянии лавы в воду и ее охлаждении, то их первичная остаточная намагниченность, должна быть термоостаточной природы. Для выяснения природы I_n нами было проведено моделирование образования термоостаточной наиченно-

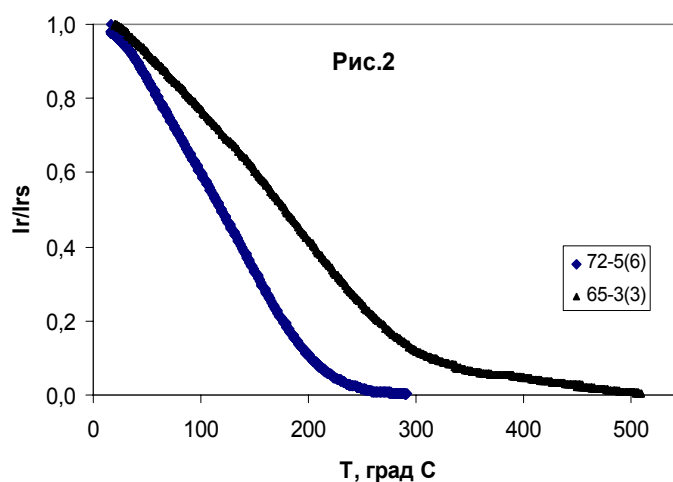


Рис.1

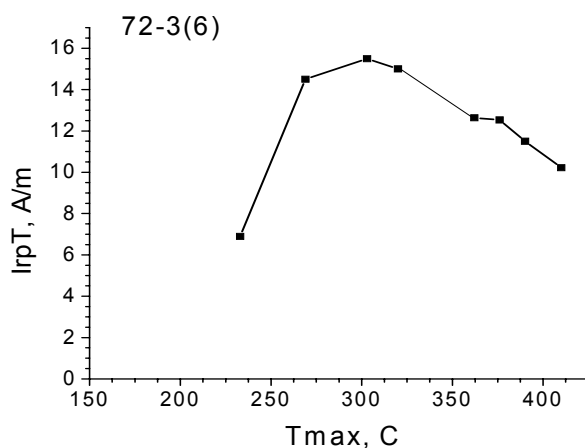


Рис. 2

сти в поле $H=27$ А/м (напряженность современного поля в районе Красного моря) и сравнения ее с I_n на образцах, которые имели одну ферримагнитную фазу с низкой точкой Кюри ($T_c=210-220$ °С) и двухфазные с $T_{c1}=210-355$ и $T_{c2}=520-535$ °С (рис. 1). При циклических нагревах и охлаждении в поле $H=27$ А/м образовывалась остаточная намагниченность, которую очевидно можно назвать парциальной термоостаточной намагниченностью ($I_{грТ}$). На образцах первой группы величина $I_{грТ}$ с ростом температуры растет, достигает максимума и далее убывает (Рис.2). Максимальное значение $I_{грТ}$ достигало при охлаждении образцов от температуры превышающей примерно на 100 °С точку Кюри основной фазы, определенную по зависимости намагниченности насыщения от температуры. Это свидетельствует о том, что большой вклад в I_n термоостаточной природы могут вносить магнитные зерна с точками Кюри большими, чем наиболее вероятная точка Кюри основной фазы.

Уменьшение $I_{грТ}$ с ростом температуры можно объяснить либо уменьшением спонтанной намагниченности с ростом однофазного окисления, либо уменьшением количества исходной фазы и образованием высокотемпературной фазы. Уменьшение величины $I_{грТ}$ также может быть связано с явлением самообращения намагниченности части магнитных зерен.

На образцах второй группы наблюдался рост величины $I_{грТ}$ с ростом температуры вплоть до $T=(500-540)$ °С. Анализ результатов показал, что $I_{грТ \max}$ оказались во всех случаях меньше величины естественной остаточной намагниченности (I_n) (Рис.3). На образцах с низкими точками Кюри $I_{грТ \max}=(0,65-0,7)*I_n$, на двухфазных образцах $I_{грТ \max}=(0,4-0,42)*I_n$. Терморазмагничивание I_n образцов базальтов с двухфазной ферримагнитной фракцией показало, что естественная остаточная намагниченность определяется более высокотемпературной фазой. Например, при нагреве образца №65-4 до 420 °С I_n разрушилась всего на 40%, полное разрушение наблюдалось только после $T=550$ °С (рис.4). Если эта фаза образовалась на более поздней стадии эволюции базальта при $T<550$ °С, то можно считать, что большая часть естественной остаточной намагниченности образцов с двухфазной ферримагнитной фракцией не термоостаточной, а химической природы. Как известно [4], химическая остаточная намагниченность при образовании однодоменных ферримагнитных зерен, как по величине, так и по стабильности может быть сравнима с термоостаточной намагниченностью. Таким образом, высокую величину I_n и Q_n базальтов Красного моря можно объяснить химической природой естественной остаточной намагниченности ансамбля однодоменных зерен, близких по фазовому составу к магнетиту. Наиболее ярко эти свойства проявляются на образцах, отобранных из области нетрансформного смещения, где породы могли подвергаться повышенным давлениям и деформациям сдвига. Таким образом, химическая природа остаточной намагниченности пород рифтовой

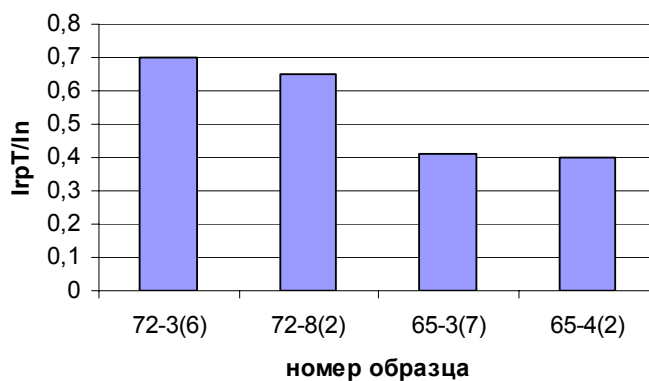


Рис.3

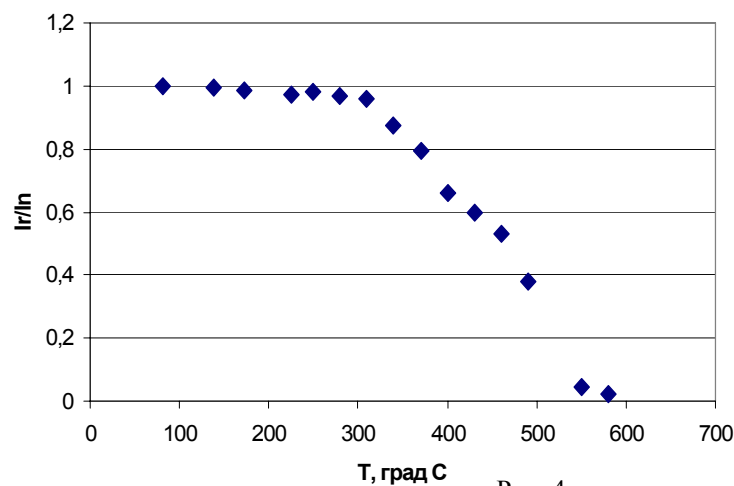


Рис. 4

зоны Красного моря свидетельствует о повышенных окислительных и термодинамических условиях, характерных для отдельных участков дна Красного моря, а нетрансформные смещения играют большую роль в формировании рифтовой зоны. Это говорит о сложном характере эволюции земной коры в этом регионе, отличающемся от эволюции других океанских рифтовых систем. Возможно, такие особенности характерны для образования океанской рифтовой системы на ранней стадии ее развития.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 07-05-00783а

Литература.

1. А.А. Шрейдер, В.И. Трухин и др. //Океанология, 1982, т.22, вып.3, с.439
2. В.И.Трухин, В.И.Максимочкин и др., //Физика Земли, 2006 , №11, с.70-83.
3. В.И.Трухин и др. //Вестник Моск. Ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2007. №5, с.46-54
4. В.И.Трухин и др. Ферромагнетизм минералов 1983, Изд-во Моск. Ун-та, 95 с.

РОЛЬ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ САМООБРАЩЕНИИ ТЕРМОНАМАГНИЧЕННОСТИ В ФЕРРИШПИНЕЛИДАХ

Ст. науч. сотр. *Жилыева В.А.*, профессор *Максимочкин В.И.*,
профессор *Трухин В.И.*, студентка *Минина Ю.А.*

Возможны два альтернативных механизма обратного намагничивания горных пород: 1) геомагнитное поле обратной полярности, возникающее в результате инверсии и 2) самообращение естественной остаточной намагниченности I_n в природе, изменяющие направление I_n . В практике палеомагнитных исследований используется естественная намагниченность I_n горных пород различного происхождения. В результате лабораторного моделирования термонамагниченности I_{rT} было установлено, что порода может приобретать I_{rT} обратного знака по отношению к направлению приложенного слабого магнитного поля во время ее охлаждения от $T > T_c$, т. е. имеет место эффект самообращения I_{rT} [1]. Интерес к таким работам понятен, т. к. породы, в которых оно обнаружено, не могут быть использованы при построении магнитохронологической шкалы.

В лаборатории геомагнетизма работы по исследованию самообращения ведутся давно. Задача состоит в том, чтобы не только выявить случаи самообращения I_{rT} , но и установить, какими особенностями магнитных свойств обладают эти породы. В данной работе представлены результаты исследования ферришпинелидов в породах различного происхождения. Совместно с кафедрой минералогии геологического факультета МГУ было установлено, что в ряде пород имеет место явление частичного самообращения I_{rT} [2-7]. Моделирование термонамагниченности проводилось путем нагрева горной породы до температур, превышающих точку Кюри T_c ферримагнетика, выдержки при этой температуре в условиях доступа воздуха и охлаждения в слабом магнитном поле (0,1-0,5 мТл). Максимум спада I_{rT} вместо ее роста при охлаждении породы от $T > T_c$ наблюдается при температуре, соответствующей расчетной точке компенсации T_k ферришпинелида. Как известно, при повышенных температурах может происходить изменение катионного распределения в подрешетках А и В ферришпинелида, в котором Fe^{2+} и Fe^{3+} частично замещены немагнитными катионами (Mg, Al, Cr, Ti). При $T = T_k$ (точка компенсации) в ферришпинелиде может выполняться условие $I_{SA} = I_{SB}$. Состав ферришпинелида определялся на основе данных электронно-зондового анализа ферримагнитных зерен породы. Результаты представлены в таблице 1.

Кроме того, явление полного и частичного самообращения I_{rT} нами выявлено в подводных базальтах Атлантического океана (трансформный разлом Романш в центральной Атлантике и хребет Шписс в южной Атлантике). Аномальная область $I_{rT}(T)$ соответствует области температур (200°-

300°)(рис.1). В этой области широко развит процесс однофазного окисления титаномагнетитов в подводных базальтах, при этом вакансии сначала образуются в подрешетке В и растет их количество. При этом увеличивается точка Кюри T_c . На определенной стадии окисления имеет место эффект самообращения I_{rT} [8, 9].

Таблица 1.

Горная порода	Место отбора	Формула ферришпинели	ΔT °C I_{rp}, I_{rpt}	T_k °C расч.	нач. T_{cmax} °C	T °C тер- мообр
Оливинит	Инtruзия Кугда (Красн.край)	$Fe_3O_4 - Fe_2TiO_4 - Mg_2TiO_4$ структура распада	250-300	300	580	625
Оливинит	М-ние Лесная сопка (Кольский п-ов)	$Fe_3O_4 - Fe_2TiO_4 - Mg_2TiO_4$ структура распада	200-250	He расч.	580	625
Милилитовые породы	М-ние Ковдор (Кольский п-ов)	$Fe_3O_4 - MgAl_2O_4$	400-450	443	550	650
Контактово-метосоматич. Ишкулит	Ильменский заповедник	$(Fe, Mg)Fe_2O_4 - FeCr_2O_4$	400	404	500	650
Траппы	Трубка Комсомольская (Якутия)	$Fe_3O_4 - (Mg, Fe)_2TiO_4 - FeCr_2O_4 - MgCr_2O_4$	350	He расч.	540	560
Кимберлитоподобные породы	Кепинская группа диатрем (Архангельская обл.)	Хромосодержащий титаномагнетит	200-250	He расч.	200, 450	450

Отличительной особенностью этих базальтов является их повышенная коэрцитивность (H_c и H_{cr}), которая понижается при лабораторном отжиге образцов, что свидетельствует об отжиге напряжений, которые испытали базальты в природе. Это подтверждено специальными экспериментами [10]. Из них следует, что базальт, обладающий эффектом самообращения I_{rT} , имеет высокую коэрцитивность H_{cr} , которая не меняется при наложении давления $P = 400$ МПа, а образец из того же района разлома Романш, имеющий более низкую коэрцитивность, не обладает эффектом самообращения I_{rT} . При наложении $P=400$ МПа его H_{cr} возрастает. Полное самообращение I_{rT} было обнаружено нами на лавах вулкана Лако (Чили) [11]. Температурная область, в которой оно наблюдалось, превышает точку Кюри магнетита ($T_c = 580^\circ C$) (рис.2). Это свидетельствует о том, что оно обу-

словлено членом ряда твердого раствора магнетит-маггемит, который образуется в условиях быстрого охлаждения в зонах окисления.

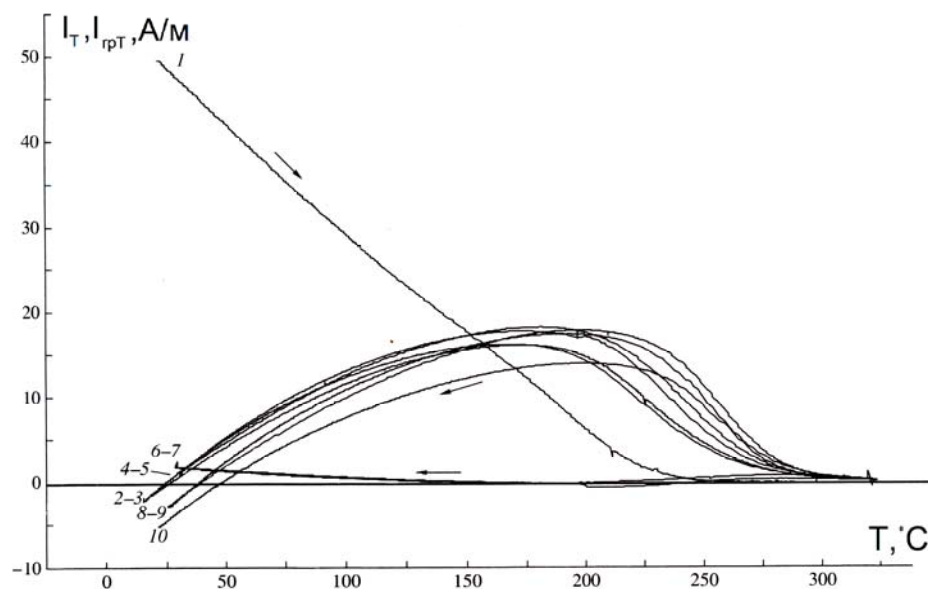


Рис 1. 1-Терморазмагничивание образца 21/6(1) с I_{rT} , полученной в поле 0.1 мТл; 2-охлаждение в поле 0.1 мТл; 10- получение I_{gpT} в поле 0.1 мТл в интервале от 300°C до 260°C

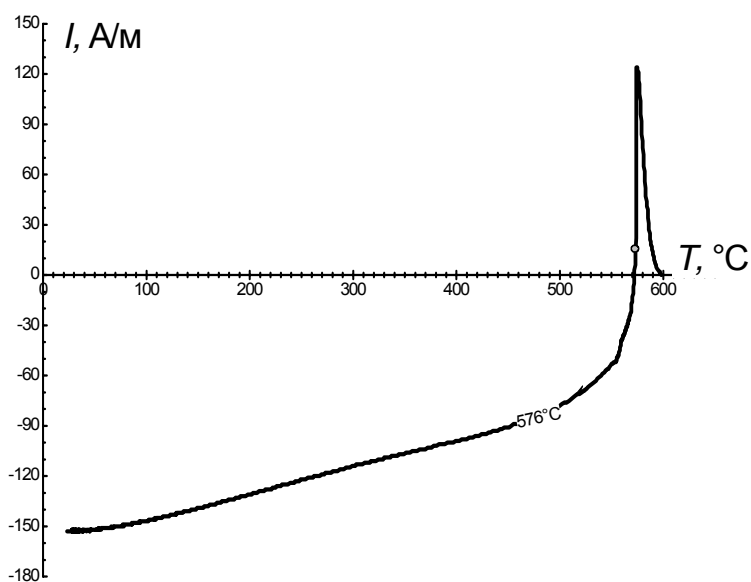


Рис.2. Кривая термонамагничивания образца в поле $H = 0.05$ мТл в интервале 600°C — 575°C.

Единого мнения о физической природе эффекта самообращения термонамагниченности I_{rT} до сих пор нет. Теоретическая модель была предложена Л. Неелем [12]. При исследовании синтезированных гемоильмени-

тов [13] было показано, что наиболее вероятным механизмом самообращения намагниченности является механизм N-типа Л. Нееля. По нашему мнению, полученные результаты на ферришпинелях не противоречат предложенной Л. Неелем концепции о различном температурном ходе намагниченностей I_{SA} и I_{SB} подрешеток ферришпинелида. Температурная область, в которой имеет место эффект самообращения I_{rT} , вероятно, соответствует области точки компенсации T_k данного ферришпинелида. По видимому, эффект самообращения намагниченности может привести к изменению направления I_n породы на обратное лишь в случае, если ферришпинелид с наличием точки компенсации полностью, либо большей частью определяет величину и направление I_n .

Итак, эффектом самообращения термонамагниченности обладают горные породы разного происхождения. Подводные базальты, обладающие эффектом самообращения, характеризуются повышенной коэрцитивностью (H_c , H_{cr}). Температурные области, в которых проявляется эффект самообращения термонамагниченности, определяется составом ферришпинелида и степенью его окисления

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант №08-05-00623-а.

Литература

1. *Нагата Т.* Магнетизм горных пород М. Мир. 1965. 346 с.
2. *Жиляева В.А., Колесников Л.В., Петрова Г.Н.* // Физика Земли 1970. №10 с. 59-70.
3. *Жиляева В.А., Колесников Л.В., Петрова Г.Н.* // Физика Земли 1971 №6 с. 48-56.
4. *Жиляева В.А., Кудрявцева Г.П.* // Геомagnetизм и аэрономия 1974 тXIV. №4 с. 715-720.
5. *Барсанов Т.П., Жиляева В.А., Кудрявцева Г.П.* // Изв.АН СССР, сер.Геол. 1974 №11 с.99.
6. *Трухин В.И., Жиляева В.А., Саврасов Д.И. и др.* // Физика Земли. 1984 №11 с. 78-89.
7. *Трухин В.И., Веричев В.К. и др.* // Физика Земли 1991 №7 с. 39-51.
8. *Трухин В.И., Жиляева В.А., Курочкина Е.С.* // Физика Земли 2004 №6. с. 42-53.
9. *Verhoogen I.* // J geophys. Res. 1956 r.61 №2 p. 201-210.
10. *Трухин В.И., Шрейдер А.А., Багин В.И. и др.* // Физика Земли. 2001. №6 с. 86-94.
11. *Трухин В.И., Максимочкин В.И. и др.* // Вест МГУ, Физ, Астр. 2007 №1. с. 51-58.
12. *Neel L.* // Adv. Phys. 1955 v.4 №14 p. 191-243.
13. *Трухин В.И., Жиляева В.А., Томилин Е.Ф. и др.* // Физика Земли. 1997 №2 с. 52-59.

ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА НАМАГНИЧЕННОСТЬ ПОДВОДНЫХ БАЗАЛЬТОВ

Профессор *Максимочкин В.И.*, аспирантка *Максимочкина А.В.*

В рифтовых зонах и зонах трансформных разломов при формировании океанской коры горные породы подвергаются воздействию повышенных давлений. При этом возможны деформации растяжения, сжатия, а также сдвиговые деформации. При напряжениях, достигающих критической величины, возможно разрушение пород в определенной области и подвижки отдельных частей земной коры. Об этом красноречиво свидетельствуют трансформные и нетрансформные смещения, наблюдаемые в различных частях на дне океанов в областях срединно-океанических хребтов, а также наблюдаемые в настоящее время землетрясения. Намагниченность пород в результате такого воздействия может существенно изменяться, что приведет к соответствующему изменению аномального геомагнитного поля (АГП). Зная закономерности влияния давления на магнитные свойства пород и стабильность остаточной намагниченности можно оценивать степень сохранности палеомагнитной информации пород тектоноактивных областей, по особенностям магнитных свойств судить о тектонических воздействиях, испытанных породой в течение геологической истории, рассчитывать распределение намагниченности в земной коре с учетом воздействия на породы давления и температуры, оценивать изменения напряженного состояния пород земной коры по изменению АГП.

В работах [1,2] было показано, что воздействие квазивсестороннего давления приводящего к разрушению базальта существенно увеличивает скорость окисления входящего в его состав титаномагнетита, а высокая степень окисления титаномагнетита океанских базальтов молодого возраста может быть индикатором тектонического воздействия на них.

В данной работе с целью установления особенностей влияния тектонических напряжений, развиваемых в океанской коре, на магнитные свойства базальтов исследовалось влияние давления квазивсестороннего и гидростатического характера на изменение их остаточной намагниченности. Эксперименты проводились на образцах базальтов, отобранных аппаратом Пайсис в рифтовой зоне южной части Красного моря. Образцы подвергались сжатию в пиррофиллите (квазивсестороннее сжатие) и в масле (гидростатическое сжатие) в камере типа цилиндр-поршень. Согласно величинам коэрцитивной и остаточно-коэрцитивной силы - $H_c=(9,5\div 36,5)$ мТл, $H_{cs}=(14,4\div 48,6)$ и отношению остаточной намагниченности насыщения (I_{rs}) к намагниченности насыщения (I_s) – $I_{rs}/I_s=0,15\div 0,32$ ферритмагнитные зерна, исследованных базальтов, находились в псевдооднодоменном (ПСД) и однодоменном (ОД) состоянии [3].

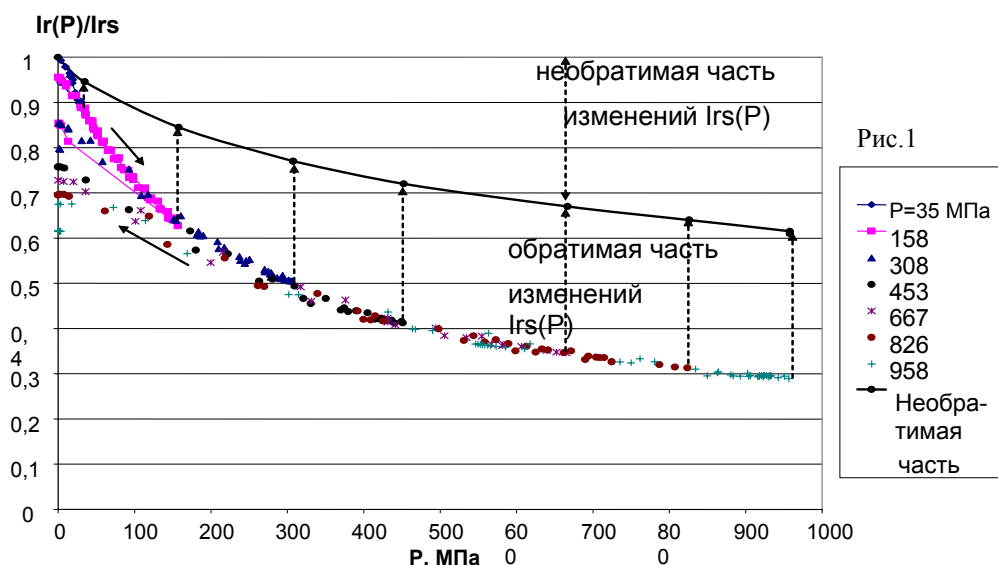


Рис.1

Эксперименты показали, что как при квазивсестороннем, так и при гидростатическом сжатии с ростом давления наблюдается уменьшение остаточной намагниченности насыщения базальтов, при снятии давления намагниченность частично восстанавливается (Рис.1). В случае квазивсестороннего сжатия величина полных изменений I_{rs} , измеренная под давлением, примерно в 1,8 раза больше, чем при всестороннем сжатии, в то время как, необратимая часть изменений отличается всего на 5%. Установлено, что при гидростатическом сжатии с ростом давления остаточная намагниченность насыщения изменяется практически необратимо.

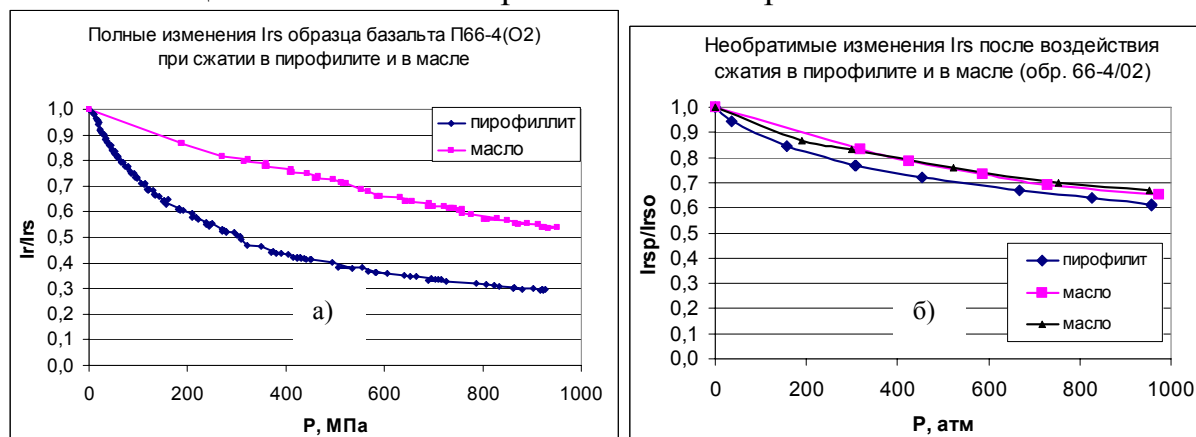


Рис.2.

Стабильность I_{rs} к воздействию квазивсестороннего сжатия растет с ростом магнитной жесткости ферромагнитных зерен: если после $P=700$ МПа на образцах с $H_{cr}=14,4$ мТл I_{rs} разрушалась на 70%, то на образцах с $H_{cr}=40-70$ мТл – всего на 30%. Вклад необратимых изменений в полные изменения остаточной намагниченности убывает с 80% до 50% с ростом магнитной жесткости ферромагнитных зерен в отмеченном выше диапазоне.

При квазигидростатическом сжатии, когда намагниченность параллельна преимущественной оси сжатия, полные изменения $I_{rs}(P)$ и необра-

тимая часть изменений, достаточно хорошо описывались гиперболической функцией вида $I_{rs}(P)=I_{rso}/(1+bP)$. По этим данным были рассчитаны коэффициенты полной пьезочувствительности (b) и пьезочувствительности необратимых изменений (br). Установлено, что b и br убывают с ростом магнитной жесткости ферромагнитной фракции образцов (Рис.4): коэффициент b изменяется с $8,3 \text{ ГПа}^{-1}$ до $1,8 \text{ ГПа}^{-1}$ при увеличении коэрцитивной силы (H_c) с $9,5 \text{ мТл}$ до $36,5 \text{ мТл}$, а br изменяется с $3,4 \text{ ГПа}^{-1}$ до $0,6 \text{ ГПа}^{-1}$ при увеличении остаточно-коэрцитивной силы (H_{cr}) с $14,4 \text{ мТл}$ до $48,6 \text{ мТл}$.

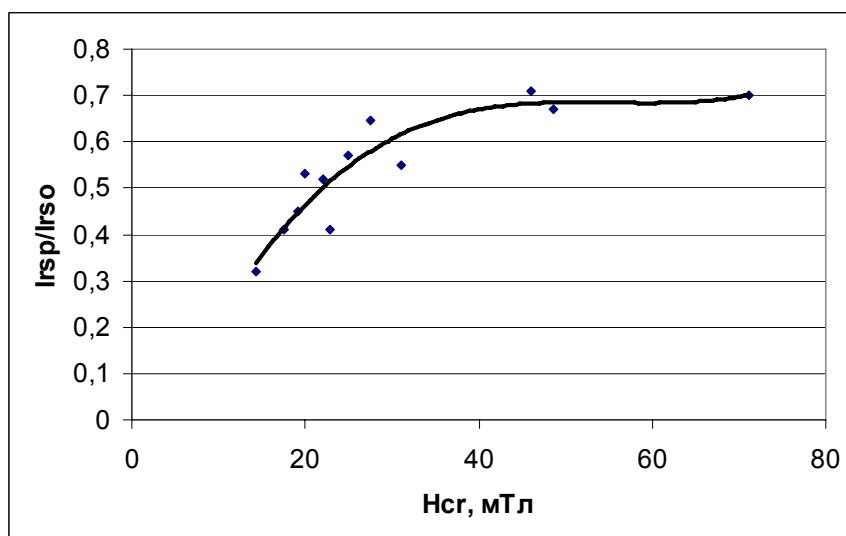


Рис. 3

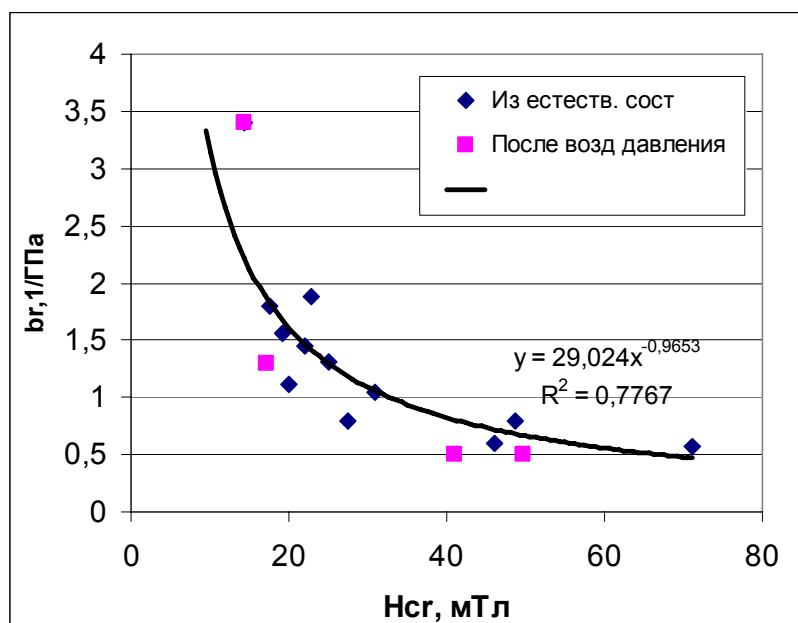


Рис. 4

Зависимость пьезочувствительности от магнитной жесткости была подтверждена на образцах, коэрцитивная сила которых изменялась искусственно под действием давления, приводящего к разрушению породы. Например, после $P=2000 \text{ МПа}$ H_c и H_{cr} выросли в 2,8 и 3,5 раза, соответ-

венно. Причем, как видно из Рис.4, зависимость b_r от остаточнокоэрцитивной силы, которая изменялась после воздействия давления $P > 1000$ МПа, довольно хорошо коррелируют с данными, полученными на образцах, которые в естественном состоянии имели высокую магнитную жесткость. Таким образом, можно предположить, что породы испытывавшие в естественных условиях тектонические воздействия, будут обладать большей стабильностью к воздействию квазивсестороннего сжатия в лаборатории, чем не испытывавшие такого воздействия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №07-05-00783.

Литература.

1. Трухин В.И., Максимочкин В.И. // Физические проблемы экологии (Экологическая физика). Сборник научных трудов / Под ред В.И.Трухина, Ю.А.Пирогова, К.В.Показеева. – М.: МАКС Пресс, 2007. № 14. С. 371-378.
2. Трухин В. И., Максимочкин В. И. Научная конференция Ломоносовские чтения, секция физики, Сб. тезисов докладов. М., Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова. 2007. С. 170-173.
3. Day R, Fuller M, and Schmidt // Physics Earth Planetary Interiors, 1977, v.13, N4, p.260-267.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ГЕОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ, АТМОСФЕРЫ

Зав. лаб. механики жидкостей *Чашечкин Ю.Д.*
(Институт проблем механики РАН)

Поля физических переменных в среде обитания человека – в атмосфере, гидросфере, геосфере – обладают “тонкой структурой”, образованной повторяющимися однородными слоями, разделенными высокоградиентными прослойками. Сам факт существования повторяющихся протяженных элементов (ячеек), контрастность их границ, явная зависимость параметров от внешних условий в физически различных средах указывает на действие универсальных механизмов ее формирования. Их поиск ведется в континуальном приближении на основе фундаментальных систем уравнений.

Картины течений зависят от свойств среды и внешних силы, как стационарных, формирующих базовые распределения плотности, так и переменных (например, приливных), которые образуют течения и волны. Все природные среды диссипативны, неоднородны по составу и температуре, то есть стратифицированы. Плотности компонент геосфер, как правило,

распределены гидростатически устойчиво. Все сферы Земли активно взаимодействуют между собой на контактных поверхностях, обмениваются веществом, импульсом и энергией. Перечисленные свойства позволяют сделать некоторые выводы о природе происходящих процессов исходя из анализа общих свойств системы фундаментальных уравнений [1], учитывающих и молекулярный и макроскопический перенос энергии и вещества. Важно подчеркнуть, что не всех этапах проводимого анализа контролируются условия эквивалентности преобразований и совместности анализируемых систем уравнений.

Существующие распределения температуры и вещества формируют неоднородные по пространству молекулярные потоки, которые в свою очередь, порождают в поле силы тяжести течения и волны даже в отсутствие нестационарных дестабилизирующих факторов. Так называемые течения, индуцированные диффузией, включают как тонкоструктурные пограничные слои, так и протяженные вихревые ячейки, формирующие протяженную тонкую структуру покоящейся среды. Они играют важную роль и в физике геосфер и макроскопической гидродинамике, формируя фоновое динамическое состояние окружающей среды. Расчет и визуализация картины течений, индуцированных диффузией на сфере, выполнены в [1].

Малые возмущения в неоднородных средах изучаются в предположении о возможности линеаризации определяющих уравнений. Дальнейший анализ показывает, что в диссипативных средах инфинитезимальные периодические течения включают как регулярные по малым диссипативным факторам волны (инерциальные, внутренние, поверхностные, акустические и гибридные), так и сингулярно возмущенные компоненты [2]. Толщины сингулярно возмущенных компонент определяются значением диссипативных коэффициентов (кинематической вязкости, температуропроводности, диффузии) и характерными частотами задачи $\delta_i = \sqrt{\nu/\omega_i}$ (где ω_i есть частота вращения Ω в случае инерциальных волн, частота плавучести N для внутренних волн, собственно частота поверхностных или акустических волн). Одна их часть не зависит от геометрии течения, другая – зависит от локального наклона поверхности. Сингулярно возмущенные компоненты формируют семейство пограничных слоев на контактных поверхностях и тонкоструктурные элементы течений в толще жидкости, в которых сосредоточена завихренность и достигает максимальных значений скорость диссипации механической энергии [3].

Анализ решений [3] показывает, что для визуализации их тонкоструктурных элементов необходимо использовать высокоразрешающие и высокочувствительные инструменты. Наиболее удобным среди них оказался теневой прибор, разработанный для аэрофизических экспериментов, действие которого основано на регистрации вариаций углового положения луча света в прозрачной неоднородной среде [4]. С его помощью удастся

проследить формирование высокоградиентных оболочек и их постепенную трансформацию в вихри и протяженные автокумулятивные струи при увеличении амплитуды осцилляций диска или сферы – источников пучков трехмерных внутренних волн [5].

Формирование висящих разрывов наблюдается и в поле установившихся присоединенных внутренних волн позади двумерного препятствия (цилиндра, вертикальной или наклонной пластины). Они наблюдаются при малых скоростях, но при этом обладают свойствами ударных волн: нормальная компонента скорости принимает разные значения на различных сторонах разрыва. В опытах определен диапазон условий, при которых в поле течений наблюдаются уединенные разрывы, прослежен процесс формирования на них вихрей и вихревых систем.

Висящие разрывы существенно влияют на перенос и перераспределение вещества, обеспечивают его сверхдиффузионный и анизотропный перенос. В силу свойств динамики жидкостей пассивные примеси концентрируются на высокоградиентных прослойках и энергично распространяются вдоль них на большие расстояния.

Наблюдения последствий природных и техногенных катастроф указывает на подобие картин течений, наблюдаемых в природных и лабораторных условиях. Так нефть, изливающаяся из пробоин в корпусе танкеров, распространяется по поверхности океана в виде тонких протяженных рукавов, наносящих большой экологический ущерб в районах их контакта с сушей. Пылевые факелы вулканов могут распространяться в одних направлениях и переноситься как целое в других, что не согласуется с традиционной гипотезой о пассивности примеси. Дальнейшее объединение результатов лабораторных и теоретических исследований, учитывающих действие универсальных механизмов формирования тонкой структуры сред, с накапливающимися данными наблюдений природных систем, позволит существенно улучшить точность описания их динамики, позволит более надежно прогнозировать условия формирования катастрофических состояний и разрабатывать меры по уменьшению их негативных последствий.

Литература

1. Байдулов В.Г., Матюшин П.В., Чашечкин Ю.Д. Эволюция течения, индуцированного диффузией на сфере, погруженной в непрерывно стратифицированную жидкость // *Механика жидкости и газа*. 2006. № 2. С. 119-132.
1. Чашечкин Ю.Д., Кистович А.В. Классификация трехмерных периодических течений в жидкости // *Доклады АН*. 2004. Т. 395. № 1. С. 55-58.
2. Бардаков Р.Н., Васильев А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Расчет и измерения конических пучков трехмерных периодических внутренних волн, воз-

- буждаемых вертикально осциллирующим поршнем // *Механика жидкости и газа*. 2007. № 4. С. 117-133.
3. Chashechkin Yu.D. Visualization of singular components of periodic motions in a continuously stratified fluid (Review report) // *Journal of Visualization* 2007. V. 10(1). P. 17-20.
 4. Чашечкин Ю.Д., Приходько Ю.В. Регулярные и сингулярные компоненты течений при вынужденных и свободных колебаниях сферы в непрерывно стратифицированной жидкости // *Доклады АН*. 2007. Т. 414. № 1. С. 44-48.