

РАЗРАБОТКА БЛОКА РЕСУРСОВ МАЛОЙ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ
ПРИ ПОДГОТОВКЕ ГИС «ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ
ЭНЕРГИИ РОССИИ»

Нефедова Л.В.

*Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова
научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии*

Малые реки с длиной до 100 км и площадью водосбора менее 2 тыс. км², и располагающиеся в одной физико-географической зоне, составляют около 95% протяженности гидрографической сети России. Они формируют около половины суммарного объема речного стока (Более 1000 км³), в их бассейнах проживает до 44% городского населения страны и 90% сельского. Эти реки обладают значительным гидроэнергетическим потенциалом. В России суммарный технический потенциал около 2,5 млн. малых рек оценивается различными исследователями величиной от 370 до 500 млрд кВт.ч в год, в том числе 50-100 млрд. кВт.ч. в Европейской части. При этом используется лишь около 2,5 млрд кВт.ч в год, то есть менее 1%.

Освоение гидроресурсов на МГЭС – в мире и в России. Несомненно гидроэнергия является возобновляемым источником энергии, однако к настоящему моменту все большее число научных публикаций и международных соглашений обосновывают, опираясь на различия в экологических последствиях, включение в современное понятие нетрадиционной возобновляемой энергетики или “Renewable Energy” лишь установки использующие потенциал малой гидроэнергетики (в России - ГЭС мощностью менее 30 МВт). Необходимо отметить, что это одно из самых эффективных направлений использования возобновляемых источников энергии. При удельной стоимости установленной мощности 1200-3000 долл./кВт, цена за электроэнергию находится в пределах 3-5 цент./кВт.ч [Бляшко, 2008].

Малая гидроэнергетика за последние десятилетия получила широкое развитие во многих странах мира. Большое количество малых ГЭС (МГЭС) построено в Западной Европе, Австралии, Азии, Северной и Южной Америке. Лидирующая роль в развитии малой гидроэнергетики принадлежит Китаю, где установленная мощность МГЭС на 2006 год составила около 45000 МВт, а к 2015 году прогнозируется ее увеличение до 56000 МВт. В ряде стран установленная мощность малых ГЭС превышает 1000 МВт (США, Канада, Швеция, Испания, Франция, Италия). Особое значение малая гидроэнергетика имеет для развивающихся стран, где около 2 млрд. человек вообще не пользуются электроэнергией. Достоинством малых ГЭС является низкая абсолютная капиталоемкость, короткий инвестиционный цикл. Они могут сооружаться практически на любых водных объектах, имеющих сколь-нибудь значимый гидроэнергетический потенциал: на малых реках и ручьях, водосборных сооружениях мелиоративных систем, водосбросах ТЭЦ, а также в питьевых водоводах, продуктопроводах предприятий, канализационных коллекторах и др. По прогнозам к 2015 году установленная мощность МГЭС в мире достигнет 175000 МВт.

Строительство малых ГЭС требует меньших начальных инвестиций, нежели крупных энергообъектов, поэтому более реально в современных экономических условиях России. Спроектированные с учетом современных экологических требований малые ГЭС, нанося минимальный ущерб окружающей среде, в большинстве случаев оказывают положительное влияние на водный режим малых рек. Использование этого ресурса возобновляемой энергетики имеет в нашей стране уже вековую историю.

О развитии гидроэнергетики и в России. В России 19 веке насчитывалось 65 тысяч водяных мельниц. В 1913 г. в эксплуатации находилось уже 78 малых ГЭС суммарной мощностью 8,4 МВт, к началу Великой Отечественной войны в стране работало 660 малых сельских ГЭС с общей мощностью 330 МВт. На 40-50-е годы прошлого века пришелся пик строительства МГЭС с ежегодным вводом в эксплуатацию до 1000 энергоблоков. К 1955 г. на территории европейской части России по различным оценкам насчитывалось более 6,5 тыс. МГЭС, однако из-за присоединения сельских потребителей к централизованной сети энергоснабжения и введения единого тарифа МГЭС оказались неэкономичными, и в эксплуатации в стране осталось к 1980 г. 100 МГЭС с суммарной мощностью 25 МВт, а к 1999 г. – лишь 55 станций. В России в настоящее время насчитывается около 300 малых ГЭС и порядка 50 микро ГЭС общей мощностью около 1,3 ГВт, которые производят около 2,5 млрд. кВтч электроэнергии (рис.1).

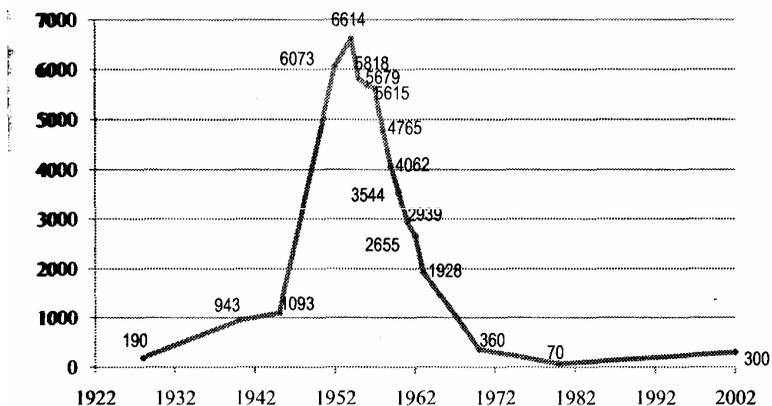


Рис.1. Изменение числа малых ГЭС в России за период 1932-2002гг. [Ресурсы и эффективность..., 2002]

Стоимость сооружения МГЭС. По оценкам специалистов-практиков удельная стоимость сооружения малых ГЭС зависит от типа сооружения и изменяется в следующих пределах [Васильев и др., 2009]:

Строительство МГЭС на существующих гидроузлах	- 1100-1800 долл.США
Восстановление не действующих МГЭС	- 1100-3500 долл.США
Новое строительство МГЭС (деривационная схема)	- 1200-2500 долл.США
Новое строительство МГЭС (кроме деривационной)	- 1700-2500 долл.США

Малая гидроэнергетика, как сформировавшееся в настоящее время вполне самостоятельное направление энергетики, может играть значительно более существенную роль при условии государственного подхода к вопросам обеспечения экономической, экологической и социальной безопасности внедрения энергетических технологий.

Экологические аспекты развития малой гидроэнергетики. Необходимо отметить, что при создании ГЭС на малых реках требуется знание не только морфологических особенностей реки, ее водного и других видов режима, но и ландшафтных особенностей территории, т.к. при массовом строительстве МГЭС возможны подъем уровней грунтовых вод и различные последствия, характерные для определенных видов ландшафтов. При планировании размещения МГЭС целесообразно воспользоваться картами ландшафтно-экологического районирования, которые создаются для многих регионов. Эти карты позволяют выявить территории со «слабыми», малоустойчивыми ландшафтами, требующими особой осторожности при осуществлении в их пределах хозяйственной деятельности, и, соответственно, территории, ландшафты которых способны выдержать значительно большую антропогенную нагрузку.

Нельзя забывать, что малые реки сами являются одним из элементов ландшафта и изменение их режима может оказать влияние на стабильность экосистем. Поэтому создаваемые водохранилища МГЭС должны способствовать сохранению жизнедеятельности малых рек. С этой целью предельный объем их регулирования не должен превышать 20 -30% объема среднего годового стока реки в ее устье. Должны соблюдаться также определенные критерии скорости течения и водности реки ниже плотин. Целесообразно в ряде случаев строительство каскада плотин, обязательны расчистка русел малых рек и многие другие мероприятия, помогающие контролировать их глубину, режим поемности, степень зарастания и отложения наносов.

Развитие энергетики, в первую очередь на малых реках, существенно тормозится из-за возможных потерь рыбного хозяйства. Далеко не на всех малых реках могут быть построены бесплотинные ГЭС, не препятствующие ходу рыбы на нерест. Существующие же в России и за рубежом типовые рыбопропускные сооружения (шлюзы, рыбоподъемники и т.д.) в большинстве случаев не выполняют своих функций и имеют очень небольшую рыбопропускную способность. Это связано с отсутствием знаний экологического характера и неудачным расположением рыбоходов в системе гидроузлов, что отпугивает, а не привлекает рыб [Малик, 2003, 2008]

В настоящее время, когда системы централизованного энергоснабжения покрывают лишь примерно 1/3 территории России и на 70% территории с населением около 20 млн человек энергоснабжение потребителей осуществляется преимущественно с помощью автономных энергоустановок, работающих на дорогом привозном жидком топливе или с использованием местных ресурсов (уголь, древесное топливо, торф и др.), необходимо привлечение возобновляемых источников энергии, создание объектов малой энергетики [Безруких, 2005]. Выбор регионов, где привлечение ресурсов малой гидроэнергетики с учетом всех экологических условий и ограничений, экономически обосновано представляется весьма важной и актуальной задачей. При этом необходимо отметить, что развитие малой энергетики

ки в настоящее время требует нового научного фундаментального подхода к оценке ресурсов, основанного на геоинформационных технологиях.

Анализ возможности использования установок возобновляемой энергетики на конкретной территории требует учета достаточно большого количества физико-географических и социально-экономических факторов. В этой связи в качестве продуктивного инструмента анализа может стать геоинформационная система. Представляется, что этот подход может быть особенно востребованным для рекреационных территорий, поскольку именно здесь при сооружении энергетических объектов следует тщательно учитывать комплекс интересов и ограничений: энергопотребности, экологические ограничения (в том числе сохранение ландшафта), плотность населения (в курортных зонах), наличие особо охраняемых территорий и т.п.

За рубежом накоплен значительный опыт использования ГИС для проектирования объектов на ВИЭ и оценки потенциала территорий с точки зрения возобновляемой энергетики. В НИЛ ВИЭ в настоящее время ведется разработка структуры ГИС «Возобновляемые источники энергии», выбор номенклатуры баз данных и анализ исходных источников необходимой информации.

Оценки и определения энергетического ресурса водотока.

Определение энергетического ресурса (N) какой-либо реки может быть оценено на основе расчета величины необходимой работы, которая совершается при перемещении определенной водной массы ($Q \text{ м}^3/\text{сек}$) по речному руслу с высоты (H_1) речного истока до высотной отметки устья реки (H_2). В каждую секунду произведенная энергия при кпд равном единице равна:

$$1000 \cdot Q \cdot \Delta H \text{ кг/м.}$$

Если это перевести в киловатты, то мощность реки будет равна:

$$N = 1000 \cdot Q \cdot (H_1 - H_2) \cdot 0,00981.$$

Удельная километровая мощность реки может быть определена с учетом длины (L , км), исследуемого речного участка:

$$N_{\text{км}} = \frac{N}{L}.$$

Полная мощность реки может быть получена при суммировании удельной мощности на всем протяжении реки:

$$\sum N = \sum 9,81 \cdot Q_i \cdot \Delta H_i.$$

Удельная мощность бассейна реки может быть получена при учете площади бассейна:

$$n = \frac{\sum N}{F_{\text{бас}}}.$$

Гидроэнергетические ресурсы обычно оцениваются в виде гидроэнергетического потенциала (ГЭП). При этом потенциал поверхностного стока, включающего речной и склоновый, определяются как сумма потенциалов всех без исключения

рек, независимо от технических или экономических возможностей их освоения [Ресурсы и эффективность..., 2002]. При оценках гидроэнергопотенциала рек валовая мощность обычно определяется для трех характерных расходов:

Q 95% – расход обеспеченностью 95% времени;

Q 50% – расход обеспеченностью 50% времени;

Q – среднееголетний расход.

Таким образом для оценок энергопотенциала конкретной малой реки необходимо иметь сведения о среднем многолетнем расходе в створе и базируясь на кривой обеспеченности расходов, оценить перспективные валовые мощности по расхода 95% и 50% обеспеченности. Данных наблюдений на малых реках чрезвычайно мало, поэтому проектирование гидросооружений на них выдвигает задачу уточнения имеющихся или разработки новых гидрологических характеристик этих водотоков. Прекращение эксплуатации малых ГЭС сооружавшихся в большом количестве в 40-е - 50-е годы связано в ряде случаев со значительными ошибками в расчетах проектных значений стока. Специфической особенностью малых рек является исключительная зависимость водных ресурсов от местных ландшафтно-географических особенностей водосборов. По этой причине ограниченные водные ресурсы малых рек имеют большую изменчивость как во времени так и в пространстве. Различие удельного стока даже на соседних реках, типичное для них, объясняется индивидуальными особенностями водосборов.

Для использования энергии реки необходимо знать особенности ее водного режима, топографическое и геологические условия участков расположения сооружений и будущих водохранилищ, а также ряд экономических и энергетических сведений. Географически наиболее перспективными территориями для развития малой гидроэнергетики являются локальные участки с относительно более высокими уклонами рек, где обеспечивается достаточный напор и скорости течения [Карелин, Волианик, 1986].

Основными гидрологическими характеристиками для расчетов ГЭП различных уровней обобщения зависят от масштаба проведения исследований:

- Макроуровень – оценки потенциалов крупных регионов (первичные оценки)
- Мезоуровень – оценки и расчеты на уровне водосборных бассейнов рек 3-4 порядка (уточненные оценки)
- Микроуровень – оценка ГЭП малой реки и выбор вариантов размещения створов МГЭС (водноэнергетические расчеты)

В соответствии со стоящими задачами, определяющими необходимые расчетные параметры и встают требования к исходной физико-географической, гидрографической и гидрологической информации. Определение расчетных гидрологических характеристик при пространственном обобщении данных гидрометеорологических наблюдений в районе проектирования МГЭС рекомендуется основывать на гидрометеорологических наблюдениях, опубликованных в официальных документах Росгидромета, и неопубликованных данных последних лет наблюдений, а также на данных наблюдений, содержащихся в архивах Госгидрометфонда, изыскательских, проектных и других организаций, включая опросы местных жителей.

При отсутствии данных гидрометеорологических наблюдений в пункте проектирования необходимо проводить полевые гидрометеорологические изыскания.

Оценки гидроэнергетического потенциала малых рек и его распределения по территории затруднено ограниченностью объема данных о стоке по времени и в пространстве. Имеющиеся в стране гидрологические посты наблюдений сосредоточены в основном на больших и средних реках, что не позволяет определить энергопотенциал малых рек методом “линейного учета”.

Для общих оценок на макроуровне необходимо определение среднемноголетних значений расходов в замыкающих створах рек 2-3 порядка и средневзвешенного уклона русла рек. В этом случае необходимо создания слоев ГИС, содержащих карту гидрологического районирования (для оценок распределения стока в течении года), карту модулей стока, региональные коэффициенты редукции значений модуля стока в зависимости от площадей водосборов для малых рек, залесенности, заболоченности. Для оценок уклона при создании ГИС любого масштаба целесообразно привлечение цифровых моделей рельефа.

Оценки валового гидроэнергетического потенциала отдельных регионов целесообразно проводить путем расчетов потенциала по створам, ограниченным устьями притоков отдельных рек для условий 50% обеспеченности стока, выделяя водосборные бассейны на картах соответствующего масштаба и затем выполнять расчеты суммарного значения гидроэнергетического потенциала на территории региона. Масштаб оценок гидропотенциала малых рек небольшой территории (бассейн реки 3-4 порядка) позволяет проводить более уточненные расчеты, используя следующие гидрологические характеристики: гидрографические характеристики (длины водотоков, площади водосборов, средний уклон русла, озерность, лесистость, заболоченность водосбора), средний уклон русла наиболее крупных частей при больших градиентах уклона. Среднемноголетнее значения стока в устьевых и характерных участках рек, определенные с использованием региональных карт модуля стока. *Для вычисления требующихся показателей значения расходов воды 50% и 95 % обеспеченности необходимо построение региональных кривых обеспеченности стока, вид которых определяется значениями коэффициентов вариации и асимметрии.* Рекомендуется оценить также внутригодовое распределение стока, характерное для многоводных, средних и маловодных лет;

Более точные оценки необходимых значений стока, требуемых для гидроэнергетических расчетов конкретной малой реки, выбора перспективных створов МГЭС (микроуровень) могут быть получены путем подробных гидрологических расчетов и, в случае необходимости, наблюдений и изысканий на местности с ответственности с принятыми в инженерной гидрологии методиками [СП 33-101-2003, Методические рекомендации, 2009].

Важной составляющей гидроресурсов для создания МГЭС являются существующие перепады каналов и водохранилища неэнергетического назначения, на которых на попусках в нижний бьеф могут быть установлены турбины и электрогенераторы, т.е. освоение створов с готовым напорным фронтом. Режим работы таких малых ГЭС подчинен требованиям основного водопользователя. Для определения основных параметров МГЭС, пристраиваемых к водохозяйственным объектам, необходимы следующие основные исходные данные [Малая гидроэнергетика, 1989]:

- многолетний ряд наблюдений в нижнем бьефе или внутригодовое распределение попусков в расчетном маловодном году и году 50% обеспеченности;
- ровненный режим водохранилища;
- кривая связи расходов и уровней в нижнем бьефе.

Данные гидрологических наблюдений и их обобщения. Все данные наблюдений, измерений на гидрологических постах, необходимые для проведения гидрологических расчетов, регламентируются Государственным Водным Кадастром (ГВК), находящемся в ведении Росгидромета. ГВК – систематизированный, постоянно пополняемый свод сведений о водных объектах, составляющих единый государственный фонд водных ресурсов, о режиме, качестве и использовании вод, а также о водопользователях. Ведение ГВК осуществляется постоянно и по единой методике. Данные ГВК подразделяются на архивные материалы (книжки, таблицы и др.), данные на долговременных технических носителях и публикуемые материалы (каталоги, ежегодники, многолетние данные и др.). Данные ГВК систематизируются и издаются по жестко закрепленной территориальной схеме отдельными выпусками. Выпуски охватывают территории бассейнов крупных рек и озер, морей или территории деятельности региональных управлений Гидрометслужбы России.

В настоящее время держателем данных гидрологических наблюдений на реках России является ВНИГМИ (МЦД) Росгидромета в виде Режимно – справочного банка данных государственного водного кадастра (РСБД КВК) «Гидрология – реки и каналы». РСБД предназначен для накопления, хранения данных о гидрологическом режиме рек и централизованного обслуживания ими водохозяйственных, проектных, научно-исследовательских и других организаций страны, учреждений Росгидромета. Данные предоставляются заинтересованным сторонним организациям на коммерческой основе по запросу. Система ведения ГВК — научно обоснованный технологический комплекс, обеспечивающий сбор, накопление, обработку и выдачу потребителям гидрологической информации с использованием современных средств вычислительной техники.

При создании ГИС по ресурсам малой гидроэнергетики необходимы данные о строении рельефа, расположении водных объектов для проведения оценок уклонов русла и выбора местоположения энергообъектов. Наиболее доступной в настоящее время базой данных для цифровых моделей рельефа является база данных NASA SRTM.

Shuttle radar topographic mission (SRTM) - Радарная топографическая съемка большей части территории земного шара, за исключением самых северных (>60), самых южных широт (>54), а также океанов, произведенная за 11 дней в феврале 2000г с помощью специальной радарной системы. Двумя радиолокационными сенсорами SIR-C и X-SAR, было собрано более 12 терабайт данных. В течение этого времени с помощью метода называемого радарной интерферометрией (radar interferometry) было собрано огромное количество информации о рельефе Земли, ее обработка продолжается до сих пор. Но определенное количество информации уже доступно пользователям.

Изначально планировалось распространение данных Level-2 с максимальным разрешением - 30 метров (1 угловая секунда), но, в связи с недавними событиями и

угрозой терроризма было принято решение распространять генерализованные данные Level-1 с разрешением 90 метров (3 угловых секунды) на всю отснятую территорию, кроме территории США, на которую данные распространяются с максимальным разрешением. Разрешение данных по высоте - 1 метр. Исходные данные распространяются квадратами размером 1x1 градус, при максимальном доступном разрешении 3 арксекунды такой квадрат является матрицей размером 1201x1201 элементов (пикселей) [Jarvis, 2008].

Структура базы данных ГИС по малой гидроэнергетике.

Проведенный анализ зарубежных ГИС оценок ресурсов и расчетов в области малой гидроэнергетики показал, разрабатываемая ГИС должна обеспечивать выполнение следующих специфических для гидрологических задач, необходимых при проведении гидроэнергетических расчетов :

1. подготовка по данным ДДЗ и топографическим картам цифровых карт ландшафтной структуры местности (в том числе водоемы, почвы, растительность);
2. построение ЦМР и расчет по ней полей уклонов, экспозиций, отмывки рельефа;
3. определение по ЦМР водосборного деления, направлений стока, аккумуляции стока и дренажа (расчетной речной сети),
4. определение по ЦМР затопления территории при создании плотин ГЭС для различных фаз водного режима, а также возможных наводнений при их разрушениях,
5. расчеты, картирование основных гидрологических характеристик и их статистических параметров.

В настоящее время в отечественной гидрологии стоит задача и ведутся разработки по созданию предметно-ориентированных геоинформационных моделей для решения основных задач гидрологии. К ним относятся: создание реестра водных объектов, оценка стока вод, характеристик затопления местности паводками и волной прорыва при разрушении гидротехнических сооружений (ГТС), оценок гидроэнергетического потенциала, характеристик водопользования и водообеспеченности территорий в водохозяйственных расчетах.

Из анализа информационных ресурсов, потребностей гидроэнергетических оценок и расчетов нами была разработана структура базы данных (БД) по МГЭС. Было обосновано, что БД ГИС «Ресурсы малой гидроэнергетики» должна содержать картографическую, атрибутивную, текстовую и графическую информацию, архивы космических снимков.

Картографическая составляющая БГД должна содержать следующую векторную информацию различных масштабов:

- карту масштаба от 1:10 000 000 до 1:2 500 000, включающую все общегеографические и специализированные объекты территории Российской Федерации и прилегающих водосборных бассейнов сопредельных государств для оценок на федеральном уровне;
- карту масштаба от 1:1 000 000 до 1:200 000, включающую все общегеографические и специализированные объекты для работ на бассейновом и территориальном уровнях;
- карту масштаба менее 1:200 000, включающую все общегеографические и

специализированные объекты для расчетов на бассейновом уровне;

- карты масштабов от 1:50 000 до 1:1000 для гидрологических расчетов конкретных гидроэнергетических сооружений,

При этом, общегеографические слои содержат: федеральные округа, хозяйственные районы, территориальное деление (субъекты РФ), районы административного деления субъектов РФ, населенные пункты, отметки высот, изолинии, растительность, автомобильные дороги, ЛЭП. Виды векторных основ определяются масштабами проведения исследований. Картографическая информация о водных объектах включает: моря, озера, пруды, реки, водохранилища, бассейны морей, бассейны рек, посты гидрологических наблюдений, болота, ледники, дополнительную гидрографию (ключи, родники, гейзеры, источники), изобаты.

Гидрологические слои должны содержать информацию об основных зональных гидрологических характеристиках водотоков, об имеющихся расчетах статистических параметров характеристик стока и их распределении по территории, зоны синхронного стока, зоны сходных параметров внутригодового распределения стока. Важным гидрологическим слоем являются результаты и карты проведения гидрологического районирования разного уровня.

Слои, имеющие отношение к гидротехническим сооружениям, содержат: гидротехническое сооружение, мощность установленных гидроагрегатов (ГА), среднегодовая выработка, год сооружения и техническое состояние, тип энергообъекта (сетевой или автономный), владелец, особенности гидрологического режима водотока и приплотинного водоема.

Группа слоев окружающей среды (по отношению к водным объектам) содержит информацию о современно энергопотреблении на территории и перспективных энергопотребителях (строящиеся объекты). Слой по охраняемым территориям включает: территории ООПТ, с указанием их уровня охраны, земли водного фонда.

Атрибутивная информация должна содержать данные об общегеографических и специализированных объектах, современных и перспективных потребителях электроэнергии, важных с точки зрения с целей оптимизации и экономической обоснованности выбора мест сооружения объектов малой гидроэнергетики.

Графическая информация должна содержать растровые файлы в следующем составе: электронные копии карт, авиационные и космические снимки, содержащие необходимую информацию.

Текстовая информация должна содержать описательные сведения об объектах базы данных и методиках проведения оценок и расчетов БД.

Оценка валового гидроэнергетического потенциала МГЭС Тульской области

Разработанные подходы были применены нами при оценке гидроэнергетического потенциала МГЭС Тульской области. Определение гидрографических характеристик, выделение границ водосборных бассейнов рек, определение значений перепадов высоты русла по течению реки выполнялось в ГИС MapInfo Professional. Система MapInfo позволяет собирать, хранить, отображать, редактировать и обрабатывать картографические данные, хранящиеся в базе данных, с учетом пространственных отношений объектов.

Картографической основой являлась среднемасштабная топографическая карта Тульской области М 1:500000 с уточнениями по картам М 1:200000 и 1:100000 [Атлас Тульской области, 2009], поскольку на данном этапе проведения работ целью проведения расчетов являлась оценка валового гидроэнергетического потенциала в Тульской области. При дальнейшем проведении работ по выбранным конкретным водосборным бассейнам и створам, перспективным для расположения МГЭС, определение гидрографических характеристик в соответствии с СП 33-101-2003 необходимо выполнять по топографическим картам М 1:100000 и крупнее [СП 33-101-2003.]

Была выполнена оцифровка гидрографической сети области (реки, водоемы), выполнено выделение границ водосборных бассейнов рек; определены и внесены в созданную географическую информационную систему абсолютные высоты положения истоков рек, устьев и перегибов положения русла.

По монографии «Ресурсы поверхностных вод СССР » т. 7., Т.10 с дополнениями данными постов гидрологических наблюдений разной продолжительности [Государственный водный кадастр, 1986; Ресурсы поверхностных вод СССР, 1967, Материалы постов] построена карта модуля стока для территории Тульской области. Значения модуля стока территории изменяются от 4,4л/(с*км²) . в верховьях Дона до 5,3 л/(с*км²) в водосборных бассейнах правых притоков р.Оки на северо-западе области. Такие различия в стоковых характеристиках определяются различиями условий формирования стока, связанными с физико-географическими условиями на территориях расположения водосборных бассейнов. Для водосборных бассейнов были определены значения среднего многолетнего модуля стока путем определения средневзвешенного по площадям значения с учетом редукции модуля стока в зависимости от площади водосборного бассейна.

Значения среднего многолетнего расхода в устьевом створе притоков главных рек области (Оки, ее притоков: Упы, Жиздры, Осетра и Дона и его притока Красивой Мечи) с площади водосбора определялось по формуле:

$$Q_{\text{ср. многол.}} = M (\text{л/сек*км}^2) * F (\text{км}^2),$$

где $Q_{\text{ср. многол.}}$ (м³/сек) – значение среднего многолетнего расхода в устьевом створе притока; M (л/сек*км²) – средний модуль стока территории водосборного бассейна притока; F (км²) – площадь водосборного бассейна притока.

В том случае, если залесенность или заболоченность водосбора реки превышают 10%, то необходимо при расчете среднемноголетнего речного стока учитывать их влияния. В Тульской области такие поправки не вводились. Для определения F (км²) было использовано справочное издание «Гидрологическая изученность» [Ресурсы поверхностных вод. СССР, 1966], а в случае отсутствия данных - результаты измерения площадей в системе MapInfo.

Определение запасов гидроэнергетических ресурсов выполнялось исходя из бассейнового подхода. Данный подход, в отличие от расчетов изменения гидроэнергетического потенциала по руслу реки от истока к устью позволяет проводить расчеты распределения валового потенциала энергии малых рек по территории, необходимые для оценки ресурсов малой гидроэнергетики региона. Бассейновый подход дает возможность как оценить общий ресурс основной реки, так и выделить гидроэнергетические потенциалы отдельных ее притоков и может служить базой для дальнейших уточненных расчетов выбранных водотоков.

Таблица 1.

Значения среднегодовой мощности и валового гидроэнергопотенциала рек Тульской области.

Бассейновые элементы	Среднегодовая мощность рек, кВт	Валовой годовой энергопотенциал, млн. кВт*ч
1. Бассейн реки II порядка Оки	13363,0	117,06
2. Бассейн правого притока р. Оки – реки III порядка Упа	25562,9	223,93
3. Бассейн правого притока р. Оки - реки III порядка Зуши	3270,3	28,65
4. Бассейн правого притока р. Оки - реки III порядка Осетр	3132,6	27,44
5. Бассейн верхнего течения реки I порядка Дона	3387,3	29,67
6. Бассейн правого притока р.Дон – реки II порядка Красивой Мечи.	7570,4	66,32
Всего по Тульской области	56286,5	493,07

В соответствии со строением гидрографической сети области, нами были выделены следующие крупные бассейновые элементы:

1. Бассейн реки II порядка Оки,
2. Бассейн правого притока р. Оки – реки III порядка Упы
3. Бассейн правого притока р. Оки - реки III порядка Зуши,
4. Бассейн правого притока р. Оки - реки III порядка Осетр
5. Бассейн верхнего течения реки I порядка Дона
6. Бассейн правого притока р.Дон – реки II порядка Красивой Мечи.

Далее были выполнены расчеты среднегодовой кадастровой мощности и валового гидроэнергопотенциала рек Тульской области, с использованием данных о среднем многолетнем расходе в устьевом створе и перепада высот «исток-устье».

Для вычисления кадастровой мощности рек Тульской области была использована формула:

$$N = 9,8 * Q_{\text{ср.}} * \Delta H,$$

где $Q_{\text{ср.}}$ – осредненное по длине реке среднемноголетнее значение расхода воды, рассчитываемое как $Q_{\text{ср.многол. устья}}/2$.

ΔH – падение реки, равное H абс. истока – H абс. устья

При расчетах среднегодовой мощности р.Упа, р.Красивая Меча значение среднего модуля для вычислений $Q_{\text{ср.многол. устья}}$ были использованы данные многолетних гидрологических наблюдений на этих реках.

Результаты выполненных расчетов среднегодовой кадастровой мощности и валового гидроэнергопотенциала рек Тульской области по описанной методике представлены в таблице 1.

Для исследования пространственной дифференциации мощности водных потоков по территории области были выполнены расчеты удельной мощности рек с учетом длины водотока. Эти данные послужили информационной базой для создания карты, на которой отражены четыре типа рек, протекающих по территории Тульской области, с различными значениями удельной мощности по длине (рис.2).

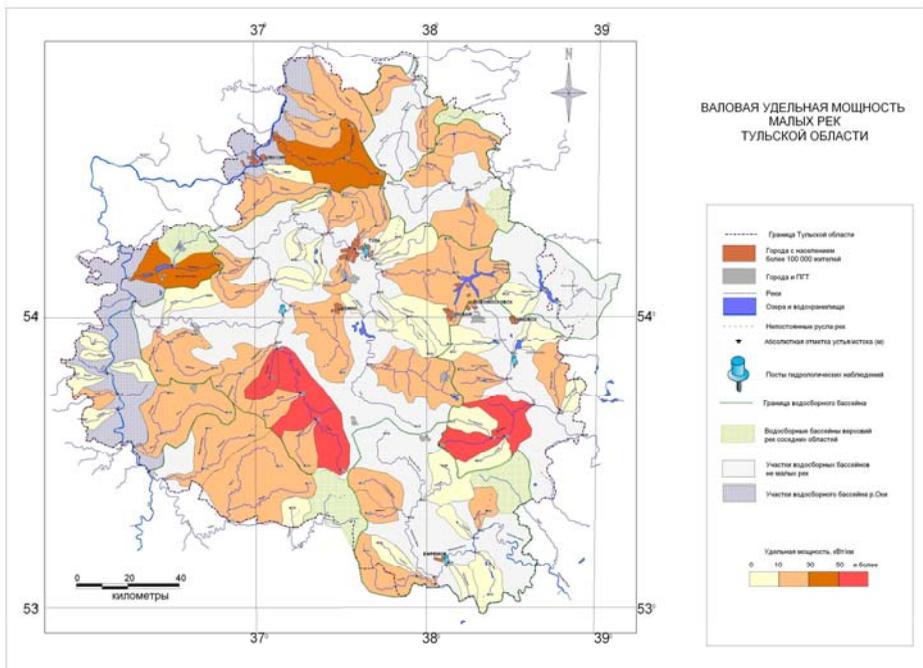


Рис.2. Карта оценки ГЭП.

Анализ карты позволяет выделить малые реки, обладающие наиболее высокой мощностью и более перспективные для создания объектов малой гидроэнергетики. Исходя из полученных расчетных данных, высокой удельной мощностью из малых рек данной региона обладают реки Плава, левый приток р.Упы и река Непрядва, правый приток р.Дон (59,2 кВт/км и 59,7 кВт/км), протекающие по наиболее возвышенной части области. Достаточно высокий потенциал имеют также правые притоки р.Оки – р.Беспута, р.Черепеть и р.Вашана (43,3 кВт/км, 30,7 кВт/км и 33,02 кВт/км соответственно) на северо-западе области. Большая часть малых рек Тульской области имеет незначительную удельную мощность - менее 30 кВт/км. Однако и на этих водотоках можно выделить участки в верховьях со значительными уклонами, обладающие относительно высоким гидроэнергетическим потенциалом. Данные реки при создании небольших водохранилищ для сбора вод весеннего половодья могут быть использованы для установки гидротурбин небольшой мощности в летнее время, поскольку в зимний период они переморазуют.

В заключении необходимо отметить, что равновесие составляющих элементов водообмена, определяющее водность и гидрологический режим рек, является относительным и может изменяться во времени в зависимости от климатических условий. Так в результате современного потепления климата происходит ускорение процесса водообмена и возрастают атмосферные осадки и одновременно возникает тенденция в увеличении гидроэнергетического потенциала водных ресурсов суши. При этом по данным много-

летних наблюдений за характеристиками стока происходит понижение объемов весеннего половодья за счет уменьшения зимних осадков в виде снега и повышение доли стока в летний период. Моделирование изменения гидрологических характеристик на Европейской равнине в условиях потепления, позволяет прогнозировать повышение летнего меженного стока, что особенно важно для развития малой гидроэнергетики [Кислов, Евстигнеев, 2008].

Исследования выполнялись при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России» на 2009-2013гг.

Литература

1. Бляшко Я.И. О некоторых аспектах развития малой гидроэнергетики/Малая энергетика, 2008, №3, стр.23-28.
2. Васильев Ю.С., Безруких П.П., Елистратов В.В., Сидоренко Г.И. Оценки ресурсов возобновляемых источников энергии в России.- СПб.:Изд-во Политехн. ун-та, 2009.-250с.
3. Кислов А.В., Евстигнеев В.М. и др. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века.М.: Макспресс, 2008, 290 с.
4. Малик Л.К. ГЭС на малых реках России: достоинства и недостатки//Природа, 2003, № , с.55-62.
5. Малик Л.К. Концептуальные подходы к строительству МГЭС в связи с выполнением обязательств России по Киотскому протоколу/ Малая энергетика, 2008, №3, стр.28-43.
6. Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. 264с.
7. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России // П.П.Безруких, Ю.Д.Арбузов, В.И.Виссарионов и др.– СПб.: Наука, 2002. 314 с.
8. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных гидрологических характеристик.
9. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений-ГГИ, СПб., Нестор-История,2009.
10. Малая гидроэнергетика / под.ред. Л.П.Михайлова. – М.:Энергоатомиздат, 1989. 184с.
11. Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2008, Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>
12. Атлас Тульской области. Картографическая основа М 1:100000.. Роскартография. Изд-во «Ультра ЭКСТЕНТ», 2009, 104 с.
13. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Выпуск 23. Бассейн Волги (Верхнее течение), Ленинград. Гидрометеиздат, 1986, 628 с.
14. Материалы постов гидрологических наблюдений – Государственный водный кадастр. Федеральная служба по гидрометеорологии и охране окружающей среды. 1990-2008.

15. Ресурсы поверхностных вод СССР. «Гидрологическая изученность» Том 10. Верхневолжский район. Ленинград, Гидрометеиздат, 1966. 528с.
16. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 7. Донской район. Ленинград, Гидрометеиздат, 1973, 459 с.
17. Ресурсы поверхностных вод. СССР «Основные гидрологические характеристики» Том 10. Верхневолжский район. Ленинград, Гидрометеиздат, 1967 528 с.

ФОТОДЕТЕКТИРОВАНИЕ МИКРОБИОПОДВИЖНОСТИ С МАГНИТНОЙ ФИКСАЦИЕЙ ОБЪЕКТА ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СКРИНИНГА И АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ ОТ НИЗШИХ ОРГАНИЗМОВ

С.Б.Норина¹, С.Ф.Растопов², Е.В.Норин³

¹*Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова,*

²*Институт Общей Физики РАН,*

³*Институт Физики Земли РАН им.О.Шмидта,*

Акустические сигналы подвижности низших организмов исследовались с помощью спектроскопии интенсивности флукутации, позволяющей регистрировать акустические ритмы беспозвоночных в жидкости. Используемый оптический портативный детектор регистрировал спектры Фурье и интенсивность флукутаций рассеянного света в реальном времени от микрообъекта объекта, находящегося в визуальном поле микроскопа. Были обнаружены синхронные акустические сигналы с определенными частотами для беспозвоночных и бактерий в нормальном состоянии и уширение полос и появление гармоник под действием экологических стресс-факторов, температурных изменений и магнитного поля. Магнитное градиентное поле предлагается использовать для магнитной фиксации рачков *Artemia Salina*, служащих экологическими индикаторами при мониторинге загрязнений среды.

Keywords – spectroscopy of fluctuation intensity, cilia beating, bacteria motility, motility photo-detection, *Artemia Salina* brine shrimp, twitching motility

Введение

Изучение воздействий среды на биологические системы очень актуально, особенно, на параметры биения ресничек, плавательное поведение, сократительные ритмы низших организмов и тканей животных [1]. Главной функцией ресничек является транспорт веществ и плавание в воде, каждая ресничка создает периодическое биение, реснички координированы во времени и пространстве и создают волну, такая координация называется метахронизмом; предлагались теории, описывающие влияние изменений условий окружающей среды на направление и частоту волны [2].

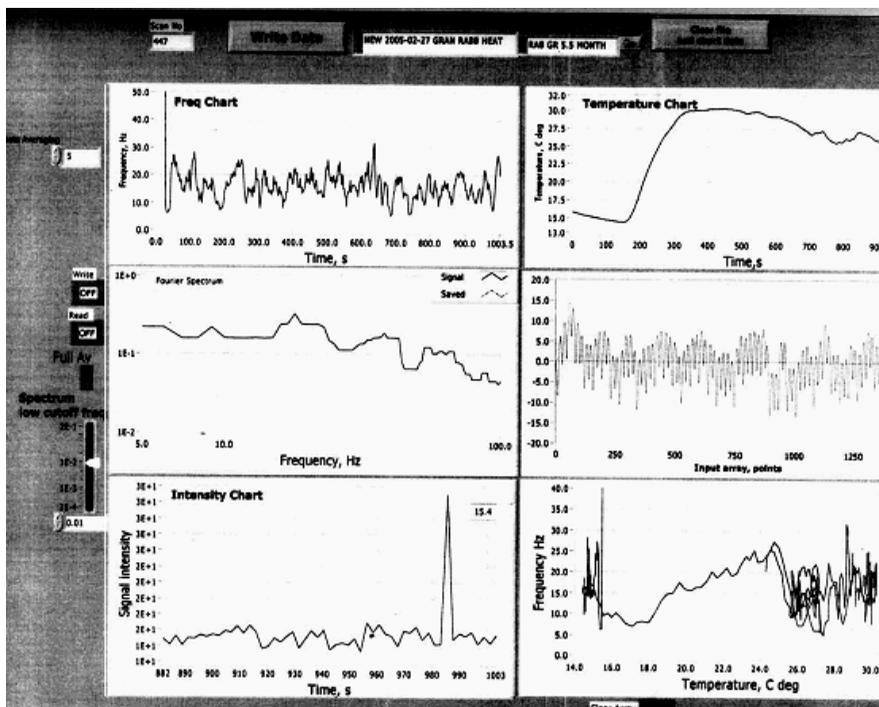


Рис.1. Фото Lab View 7.0 дизайна получаемых данных, сделанный с монитора, во время регистрации движения бактерий при температурном обратимом фазовом переходе в диапазоне 33-34 градусов.

Первичной активностью ресничек определяется транспорт пищи и удаление чужеродных веществ. Такие исследования дали важную информацию о скоростях очищения под воздействием стимулов, таких как лекарства, стресс-факторы [3].

Большая часть информации о структуре и функции ресничек поступает из результатов по изучению ресничек беспозвоночных, водорослей *Chlamidomonads flagella* и Sperm flagella [4]. Движение ресничек регистрировалось также оптически в тканевых культурах эпителия трахеи млекопитающих, как функция внеклеточного АТФ в концентрации 10^{-7} - 10^{-3} M; при этом частота биения ресничек увеличивалась в 3 раза из-за химического воздействия на метаболизм.

В данной работе спектроскопия интенсивности флуктуаций применялась для реализации количественного прогноза воздействия внешних факторов на частотный спектр подвижности рачков и бактерий.

II. МЕТОДЫ

Спектроскопия интенсивности флуктуаций

Портативный оптический детектор [8, 9], комбинированный с микроскопом, регистрировал флуктуации рассеянного света в поле зрения оптического микроскопа Olympus BX-51. Постоянная составляющая сигнала на двух фотодиодах, включенных в разностную схему, удалялась, оставляя переменный сигнал от движущегося микрообъекта. Анализ спектров Фурье и динамические процессы регистрировались в низкочастотном диапазоне от 1 Гц до 1 кГц.

Два фотодиода позволяли измерять корреляционные функции $G(f, r_{12}) = \langle \delta d(r_1) \delta d(r_2) \rangle_f$ и регистрировать интенсивность флуктуаций в двух точках микрообъекта. На рис.1 показаны графики, получаемые в ходе эксперимента, ось X на втором справа графе показывает время регистрации ("input array" для 5000 points соответствует 1 сек). Если трансляционная интенсивность движения велика, можно детектировать пик в диапазоне 3-10 Гц спектра Фурье.

Применение детектора для движущихся периодически макрообъектов также возможно.

Приготовление образцов

Беспозвоночные, исследуемые в данной работе, молодые рачки *Artemia Salina*, размером 50-100 мкм, развивались из яиц в 9% растворе NaCl и подвергались магнитной сепарации в градиентном магнитном поле, используемом также для их фиксации. Также использовались особи *Rotifera Brochionus*.

Принцип магнитной фиксации

Величина магнитной восприимчивости микрообъекта в жидкости может быть оценена из равенства магнитной пондеромоторной силы и силы сопротивления Стокса [9]:

$$6\pi\eta R_{eff}\vec{v} = 1/2(\chi_p - \chi_f) \cdot V \cdot \nabla(\vec{H} \cdot \vec{H})$$

, где H_0 - интенсивность приложенного магнитного поля, χ_p и χ_f - магнитные восприимчивости частицы и жидкости, соответственно, R_{eff} - эффективный гидродинамический радиус объекта, η - коэффициент вязкости, v - скорость движения частицы, величина, характеризующая градиент составляла $\vec{H} \cdot \text{grad} \vec{H} = 5 \cdot 10^6 \text{ A}^2/\text{m}^3$.

Использовались программы Image Assistant 7.0 Software и Lab View 7.0.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Контрольные измерения на однодневных рачках *Artemia Salina* показали воспроизводимые результаты. При помещении микрообъекта *Artemia* в фокус детектора наблюдался спектр со стандартным пиком (рис.3) вблизи частот 16-17 Гц. При использовании малой апертуры диаметром 10 мкм была возможна регистрация биения в реальном времени от отдельной реснички. При этом регистрировались три фазы биения: удар, восстановление, расслабление (рис.4).

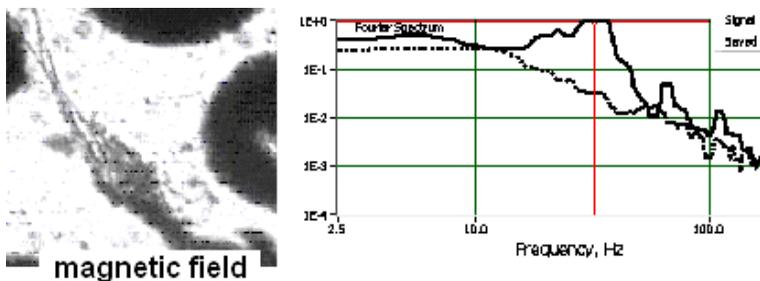


Рис.2. Влияние градиентного магнитного поля, создаваемого вблизи намагниченного цилиндра, на спектр Фурье биений рачка, появились пики гармоник в добавление к одиночному пику вблизи 16.5 Гц в контроле.

а

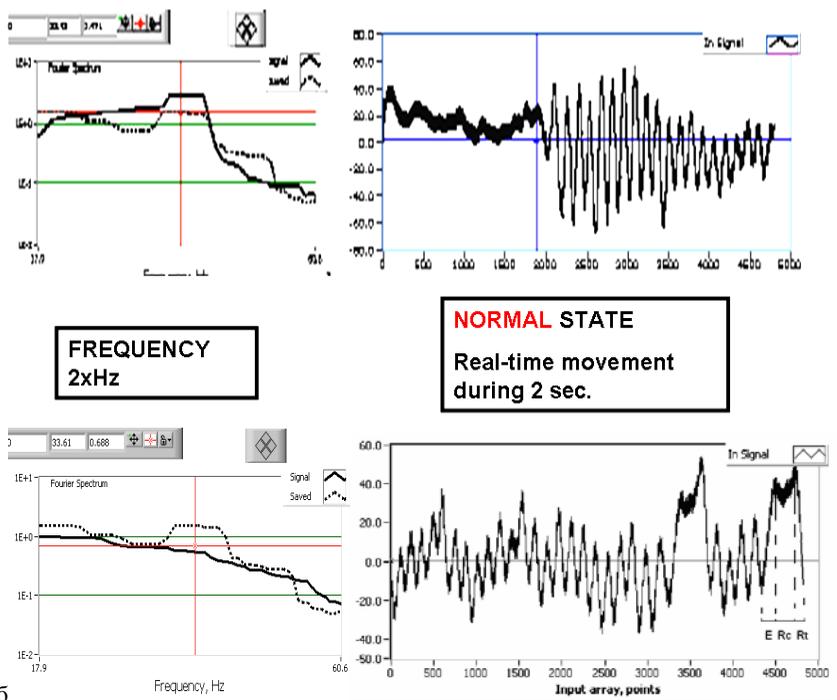


Рис.3. Спектр Фурье и амплитуда интенсивности флуктуаций рассеянного света от движущегося в поле зрения микроскопа рачка *Artemia Salina*: а) - в контроле, б) - в контроле от отдельного биения реснички (E-effective, R_c - recovery and R_t - rest phases of beating cycle; time scale: 1000 points = 0.2s).

Измерения, выполненные на рачках *Artemia Salina*, показали стабильные спектры Фурье и амплитуду интенсивности флуктуаций (real-time). Активные вылупившиеся (hatching) рачки (nauplii) демонстрировали узкие частотные полосы спектров Фурье со средним значением 16.7 ± 1.1 (Гц), сохранявшимся при взрослении рачков в течение 2 суток.

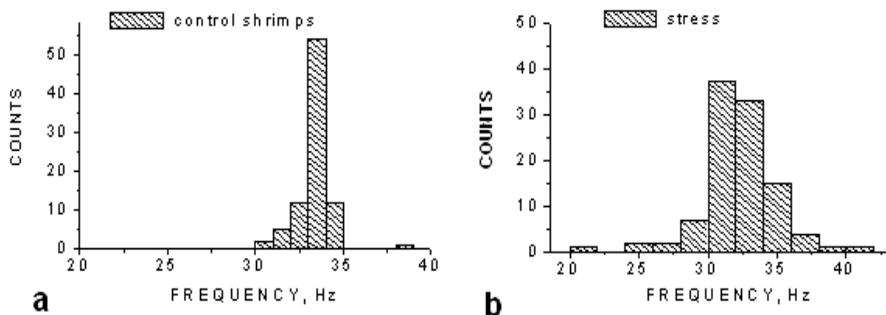


Рис. 4. Гистограмма частоты (удвоенной) биения рачков *Artemia Salina* brine shrimps (300 особей) в контроле (a) и при стрессах (b).

EFFECTS ON LOW-FREQUENCY SPECTRA OF NAUPLII SHRIMPS AS BIOINFORMATION SIGNALS OF STRESS

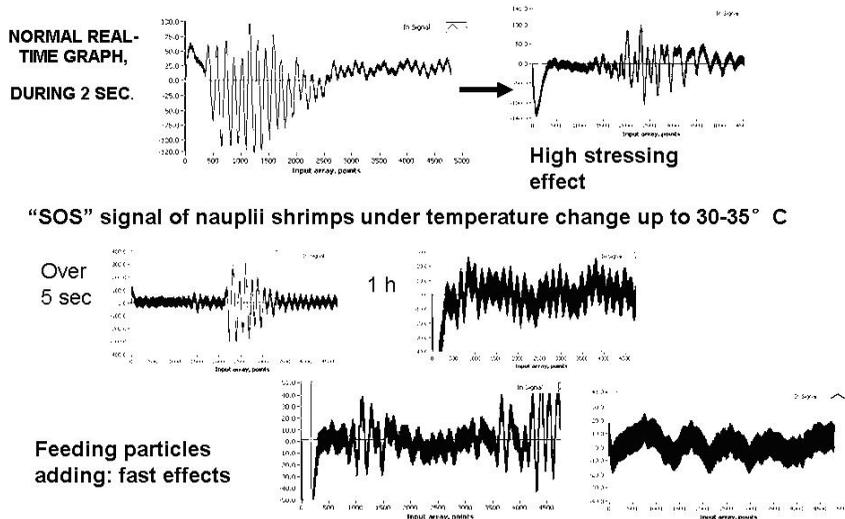


Рис. 5. Общая иллюстрация полученных изменений при стрессах.

Популяция свежих особей была однородна по частотному спектру (рис.4а), а при разнообразных стрессовых воздействиях (нагревание, химические воздействия, старение, магнитное поле) наблюдался сдвиг спектров и уширение гистограммы (рис.4б).

На рис. .5 показана схема наблюдаемых изменений, воспроизводившихся при однотипных воздействиях.

На рис. 6 представлен спектр Фурье, полученный с помощью лазерного микроскопа, наблюдались гармонические частоты биения при 16,5, 33,0, 49,5... Гц [9].

Предварительные данные, полученные на *Proteobacteria*, при температурных изменениях показали обратимый фазовый переход при 33 градусах (рис.1), 6 зависимостей для частоты, амплитуды, температуры и интенсивности сигнала с детектора регистрировались от популяции клеток.

Таблица дает представление о частотах из спектров Фурье для *Artemia Shrimps* и *Myxobacteria*.

ТАБЛИЦА. Основные частоты *Artemia Shrimps* и *Myxobacteria*.

<i>Artemia Salina</i>	16-17 Hz;	32-33 Hz	62-64Hz;	
<i>Myxobacteria</i>	7-9 Hz;	14-15 Hz;	23-29Hz	52-54Hz

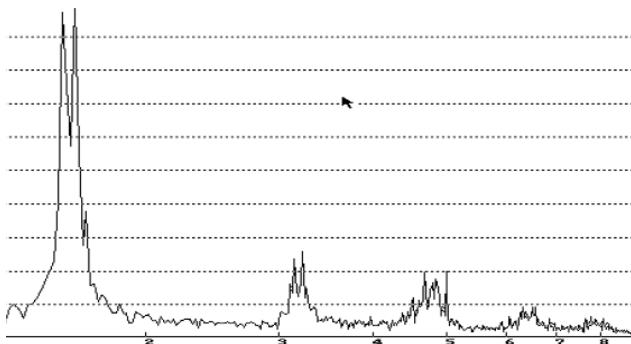


Рис.6. Типичный спектр Фурье *Rotifera Brochionus*, полученный с помощью лазерного микроскопа.

Заключение

Рачки *Artemia Salina* на ранних стадиях развития было предложено использовать, как экологический индикатор: проверено подтвердившееся предположение о том, что физические и химические факторы сдвигают и уширяют стандартный спектр Фурье, полученный в нормальных условиях, появляются гармонические частоты.

Литература

1. S. Abernethy, A.Bobra, W. Shiu, P. Wells, D. Mackay, "Acute Lethal Toxicity of Hydrocarbons and Chlorinated Hydrocarbons to Two Planktonic Crustaceans: The

- Key Role of Organism-Water Partitioning", *Aquat Toxicol.* Vol. 8(3): 1986, pp.163-174.
2. L. Gheber, Z. Priel, "On metachronism in ciliary systems; a model describing the dependence of the metachronal wave properties on the intrinsic ciliary parameters", *Cell. Mot. Cyt.*, vol.16, 1990, pp. 167-181
 3. Silverberg, "Functional activity of ciliated outgrowths from cultured human nasal and tracheal epithelia. *Biorheology*", vol. 27, 1990, pp.559-565.
 4. E. Holwill, G. Foster Biophysical aspects and modelling of ciliary motility. *Cell. Mot. Cyt.*, vol. 32, 1995 , pp. 114-120.
 5. D. Ovadyahy, D. Eshel, Z. Priel, "Intensification of ciliary motility by extracellular ATP", *Biorheology*, vol. 25, 1988, pp.489-501.
 6. M. Barahona, S. Sanchez-Fortun, Toxicity of Carbamates to the Brine Shrimp *Artemia salina* and the Effect of Atropine, BW284c51, iso-OMPA and 2-PAM on Carbaryl Toxicity. *Environ.Pollut.* vol.104(3), 1999, pp.469-476.
 7. R. Kayumov, A. Yeskov, "The toxicological estimation of individual chemical compounds and complex mixures by means the motile cellular cell tested objects", *Bul Exp Biol Med.*, vol. 105,1988, pp. 48-50 (in Russian).
 8. D.A.Zimnyakov and V.V.Tuchin, "Speckle Correlometry," in: *Biomedical Photonics Handbook*, Ed. Tuan Vo-Dinh, SPIE Press, Bellingham, WA, USA, pp.14-1 -14-20, (2003).
 9. S.B.Norina, V.N.Ageev , S.F.Rastopov, "Motility and Ciliary Beating Frequency for Biomonitoring", *Proc. of SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 3196, pp.218- 223, 1998.
 10. Norina S. B., Rastopov SF, Domogatskii SP. Concentration-dependent effects of magnetic accumulation of ligand-binding microparticles and ferritin aggregates. *Biophysics (Biofizika)*, 49(1), pp.19-21, 2004.

РЕВЕРСИЯ КОНВЕКЦИИ В ВОДЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОКРЕСТНОСТИ 4 °С

С.М. Першин

Научный центр волновых исследований института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Вавилова, 38, 119991 Москва, Россия, pershin@kapella.gpi.ru

Известно, что вода является наиболее интересным веществом на Земле, обладающим наибольшим числом аномальных свойств в окрестности особых температурных точек, физические природа которых остается до конца не установленной (Martin Chaplin, www.waterproperties.com). Одной из таких точек является 4 °С. В ее окрестности происходит переупаковка молекул до максимальной плотности при нормальных условиях. Неясно, почему 4, а не 2 или 9 °С? Ранее (S.Pershin, *Phys. of Wave Phenomena*, 16(1), 15, 2008) предпринималась попытка обоснования с привлечением орто/пара конверсии спин-изомеров H₂O.

Недавно изменение плотности воды при 4 °С позволило нам наблюдать интересное гидродинамическое явление: реверсию конвекции [1], причем изменение направления циркуляции потока происходит в одной ячейке, ограниченной стенками объема емкости, в отличие от ячеек Бенара (Ю.Л.Климонтович, *Физика открытых систем*, УФН, 168, 25, 1966). Ранее [2], на основании наблюдения «скачка» температуры в слое воды у поверхности и ее стабилизация в придонном слое, со-

общалось об обнаружении неравновесных фазовых переходов с выделением/поглощением энергии в надмолекулярных структурах, которые образуются/расплавляются в воде при ее медленном охлаждении/нагреве в окрестности 4 °С. Однако оставалось неясным, как без калориметрических измерений и визуализации потоков был сделан этот вывод о выделении/поглощении энергии в открытой системе с непрерывным теплообменом, а также о формировании/расплаве надмолекулярных структур без спектроскопии рассеяния квантов или частиц. Так рассеяние X-пучков в воде убедительно показало наличие в ней льдоподобных структур, а также мономеров H₂O при температурах до 90 °С (A. Nilsson et al. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **106**(36), 15214 (2009); www.pnas.org). Лазерная спектроскопия комбинационного рассеяния (КР) также выявила компоненту 3220 см⁻¹, наблюдаемую в ОН полосе воды вплоть до 99 °С [3], которая является характеристической для массивного льда.

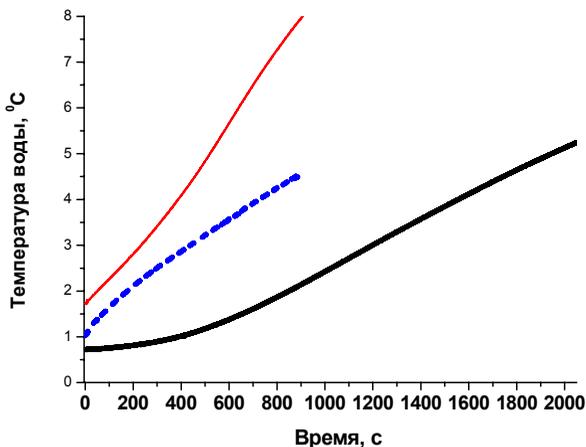


Рис.1.

Мы повторили опыты, описанные в работе [2], в различном диапазоне величин и форм объема воды: от 30 мл в кварцевой кювете размером 2x3x5 см³ до цилиндрических - диаметром 5-6 см и высотой (2-8) см. При этом скорость нагрева изменялась от 0.05 °С с⁻¹ до 0.001 °С с⁻¹ при температуре комнаты 22°С. Все емкости при измерениях стояли на теплоизолирующей поверхности (картон, полиуретан, пенопласт) и были открыты сверху. Температура воды измерялась термопарой хромель-алюмель, опорный спай которой находился в термостате с тающим льдом. Термоздс регистрировалась цифровым микровольтметром Agilent 34401A, который обеспечивал частоту опроса данных 10 Гц. Во всех опытах устойчиво наблюдались и скачок температуры у поверхности и ее стабилизации у дна на оси симметрии объема. Иногда, для ускорения предварительного охлаждения, мы смешивали дистиллированную воду с атмосферным снегом. При этом появление взвешенных в воде видимых твердых включений атмосферных аэрозолей (как центров «кристаллизации») не влияло на характер температурных зависимостей.

Мы также не выявили доминирование льдоподобной компоненты в ОН полосе КР [3] в период ожидаемой «кристаллизации» в придонном слое в интерпретации [2].

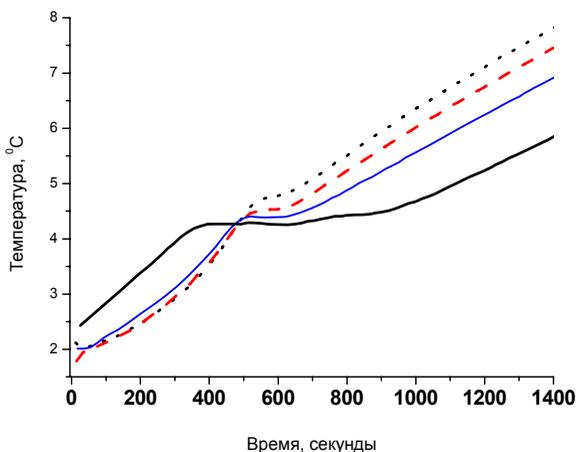


Рис.2.

Предполагая, что обнаруженные в [2] особенности обусловлены конвекцией, мы провели опыты в условиях ее «ограничения». В достаточно тонких слоях (толщина ≤ 1 см при диаметре 6 см) приращение температуры на глубине 0.5 см происходило линейно (рис.1, тонкая линия) и с большей скоростью, т.е. стабилизации температуры или «плавления надмолекулярных структур» [2] не наблюдалось. Далее, мы увеличили высоту столба воды до 6 см, но поместили в объем скомканную марлю, которая препятствовала развитию конвекции. В этом опыте ни скачок температуры [2], ни ее стабилизация также не наблюдались (рис.1, толстая линия). Наконец, постоянное перемешивание воды, которое разрушает градиент плотности и условия развития конвекции, обеспечивало в том же объеме (высота и диаметр 6 см) линейную зависимость температуры, без особенностей в окрестности 4°C (рис.1, пунктирная линия).

Кроме этого, была зарегистрирована временная эволюция температуры на разных глубинах вблизи (~ 5 мм) стенки сосуда. Термопара перемещалась в пошаговом режиме по вертикали автоматизированной позиционирующей системой Velmex BiSlide с точностью позиционирования ± 3 мкм. Измерения проводились в цилиндрическом стакане из стекла Рутех, заполненном водой до 60 мм по высоте. Первая точка находилась на глубине 5 мм, последняя в 5 мм выше дна, шаг перемещения составлял 10 мм. Результаты измерений представлены на рис. 2. Заметим, что, как и в [2], вертикальный градиент плотности отчетливо проявлялся в инвертировании градиента температуры при переходе через точку 4°C : верхние слои (с меньшей плотностью) были холоднее/теплее нижних, но эволюция температуры заметно отличается от приосевой области в верхней половине объема в окрестности 4°C (см. рис.2 в [2]). Так на глубине 5 мм (точки) и 10 мм (пунктир) нет скачка, но скорость нагрева нелинейно увеличивается (сравни с зависимостью у дна

(толстая линия)), затем переходит в линейную зависимость после короткой (~40-50 с) стабилизации на отметке 4.6 °С. Такая нелинейность нагрева может быть следствием уменьшения доли холодной воды в верхних слоях. Тогда, согласно уравнению теплового баланса $\Delta T = Q/(c\Delta m)^{-1}$, приращение температуры ΔT будет нелинейно увеличиваться с уменьшением массы Δm при постоянном поступлении количества тепла Q и неизменной теплоемкости c . Далее из рис.2 видно, что с опозданием на ~100 с (по сравнению с придонным слоем) у поверхности достигается ~4 °С и, соответственно, максимальная плотность воды. При этом в отличие от придонной (толстая линия) и средней (тонкая линия) части объема, вода у стенки сверху продолжает нагреваться и становится менее плотной быстрее, чем в приосевой области. Обнаруженные детали удовлетворяют предложенному конвекционному механизму, описанному ниже, которому соответствуют и особенности, наблюдавшиеся в [2].

Визуализация конвекционных потоков проводилась с помощью измельченного перманганата калия, который стряхивался на поверхность воды по линии диаметра в две точки симметрично от центра. Одновременно термопарой измерялась температура воды на глубине 15 мм по оси (рис.3а, ход температуры на экране монитора). Видно, что крупные кристаллики KMnO_4 опустились на дно, не оставляя следа в воде. Мелкие кристаллики удерживались на поверхности поверхностным натяжением и медленно диффундировали под поверхность на 3-4 мм. Затем захватывались потоком от оси к стенке и опускались вдоль стенки на расстоянии 3-5 мм от нее. Через некоторое время частицы KMnO_4 отклонялись конвекционным потоком от стенки к центру придонного слоя (рис.3б), который поднимался вверх по оси, а частицы KMnO_4 с большей плотностью достигали дна. Иногда слабоокрашенный след описывал замкнутую траекторию, которая охватывала объем в виде тора, размер которого уменьшался со временем. Прогрев этого резервуара холодной воды внутри тора определяет длительность стабилизации температуры (плато) в нижней части объема при наличии устойчивой циркуляции потока. Когда толщина придонного слоя становится сравнимой с глубиной сосуда циркуляция замедляется. Далее, как следует из рис. 2, достигается момент, когда пристеночная область вверху прогревается выше 4°С и плотность воды в ней становится меньше, чем в приосевой области. Происходит инверсия начальной стадии: теперь теплая, менее плотная вода находится у стенок, а плотная вода на оси начинает погружаться, увлекая теплую воду от периферии к центру: наблюдается реверсия конвекции. Об этом свидетельствует изгиб вертикальных следов KMnO_4 от стенки к оси под поверхностью на рис.3в и, напротив, их смещение от оси к стенкам в нижнем слое. Причем появление изгиба следов вблизи рабочего конца термопары сопровождается началом скачка температуры (см. кривую температуры на мониторе рис. 3в), что свидетельствует о переносе теплой воды от стенки к оси объема, где находится термопара. Заметим, что перемещение теплой воды от стенок к центру у поверхности и скачок температуры на оси объема сопровождается короткой (равной длительности скачка) стабилизацией в верхнем слое у стенки (рис.2, точки), который до этого нагревался нелинейно быстро.

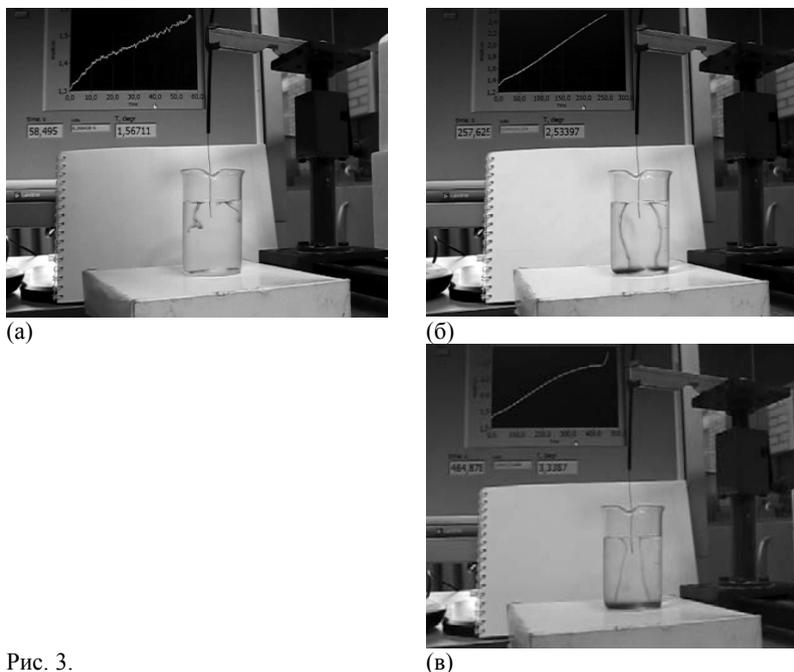


Рис. 3.

Таким образом, полученная нами и опубликованная совокупность экспериментальных данных дает основание утверждать, что температурные особенности в воде при медленном переходе через температуру максимальной плотности являются следствием закона плавания тел Архимеда, обеспечивающего развитие конвекции, спонтанная реверсия которой наблюдалась, насколько нам известно, впервые. Существенно, что управляющим параметром конвекции является градиент температуры (также как при развитии ячеек Бенара), что накладывает ограничения на скорость нагрева воды [2]. Однако, в отличие от ячеек Бенара, развитие конвекционной ячейки с доминирующим теплообменом через боковые стенки происходит во всем объеме воды. При этом реверсия конвекции начинается при незначительном, ~ 0.5 °С, превышении температуры у стенки верхнего слоя (см. рис.2), что соответствует уменьшению плотности на $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ г/см³ в окрестности 4 °С. Запуск конвекционного движения в обратном направлении в таких условиях требует отдельного изучения с учетом развития неустойчивости Рэлея-Тейлора с «мягкой» границей, уменьшения сдвиговой вязкости в окрестности 4 °С [4] и конверсии орто-пара спин-изомеров H₂O в окрестности особых точек.

Работа выполнялась при частичной поддержке грантов РФФИ 09-02-01173, 08-02-00008, 10-02-90301-Вьет_a, 11-02-00034-a, 11-05-00448-a. .

Литература

1. С.М. Першин, Л.М. Крутянский, В.А. Лукьянченко, Письма в ЖЭТФ, **94(2)**, 125-129 (2011).
2. Л.Н. Батуров, И.Н. Говор, А.С. Обухов, В.Г. Плотниченко, Е.М. Дианов, Письма в ЖЭТФ **93**, вып.2, 92-94 (2011)
3. С.М. Першин, А.Ф. Бункин, В.А. Лукьянченко, Квантовая электроника, **43(12)**, 1142 (2010)
4. С.В. Стебновский, Ж. Техн. Физ., **74(1)**, 21-23 (2004).

**ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ЛИТОСФЕРЫ СТАБИЛЬНЫХ
КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ /ЩИТЫ, ПЛАТФОРМЫ/.**

Г.И. Петрунин, В.Г. Попов

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Известно, что термическая эволюция Земли – источник большинства геолого-геофизических процессов в ее недрах и на поверхности. Интенсивность и направленность этих процессов связана с перераспределением тепловой энергии Земли, в котором механизм кондуктивной теплопередачи для твердой оболочки Земли играет существенную роль, особенно для горизонтов коры и верхней мантии. В свою очередь, интенсивность кондуктивной теплопередачи при заданной функции распределения источников определяется тепловыми свойствами вещества, такими как теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость.

Проблема прогнозирования тепловых свойств вещества оболочки Земли и интенсивности теплопереноса в ее недрах является одной из центральных проблем геотермии. Изучение кондуктивной теплопередачи в горных породах и минералах – традиционная научная тематика лаборатории геотермии физического факультета МГУ. В лаборатории за последние 30 – 35 лет были разработаны методики и созданы экспериментальные установки, позволяющие проводить надежные, точные измерения тепловых свойств горных пород и минералов в интервале температур от комнатных до плавления [1-4]. На этой базе успешно изучается влияние структуры, состава и температуры на интенсивность теплопередачи в различных геофизических материалах. В результате теплофизических исследований накоплен богатый экспериментальный материал, как по минералам (карбонаты, полевые шпаты, оливины, гранаты, пироксены и др.), так и по горным породам (граниты, диориты, диабазы, эклогиты, гарцбургиты, метаморфические и осадочные породы) [5-15] и получен ряд важнейших результатов в этой области и, в частности, установлен факт достижения средней длиной свободного пробега фонона своего минимально-

го значения ($\sim 3,5 \text{ \AA}$) уже при $\sim 1000\text{K}$ для большинства природных минералов и горных пород [16], что послужило основой для разработки методики прогнозирования тепловых свойств глубинного вещества Земли и первой надежно обоснованной модели распределения тепловых свойств мантии вплоть до границы с ядром [17, 18]. Был осуществлен также и первый опыт построения моделей распреде-

ления тепловых свойств в литосфере (коре и верхней мантии континентов и океанов) [19]. Этот первый опыт с принятым основным базальтовым слоем коры океанов и с базальтовым (габбровым) слоем нижней коры континентов – лишь один из возможных вариантов и требует значительного пересмотра с учетом современных гипотез о составе континентальной коры.

По современным данным, основанным на изучении эволюции минеральных ассоциаций базальтового состава с изменением давления и температуры в отсутствии воды, ни базальтов, ни габбро в нижнем слое континентальной коры быть не может. Стабильными ассоциациями в Р-Т условиях этого слоя должны быть гранатовые гранулиты и эклогиты. Но скорость сейсмических волн в них значительно превышает наблюдаемую и, чтобы удовлетворить ее, требуется существенное разбавление гранатовых гранулитов некими модификациями гранитов и диоритов, которые, как предполагают, могут образовываться при высоких давлениях, характерных для нижнего слоя континентальной коры.

Однако существует и другая возможность удовлетворить наблюдаемым сейсмическим скоростям, если предположить, что нижняя кора содержит воду, а это вполне вероятно. В этом случае породы основного (базальтового) состава, согласно экспериментам, должны быть представлены амфиболитами, состоящими из плагиоклаза и роговой обманки, в решетке которой присутствует гидроксильная группа (ОН), если температура не превышает 800К.

Настоящее сообщение и посвящено краткому изложению результатов построения модели распределения тепловых свойств в континентальной литосфере, как раз с «влажным» амфиболосодержащим нижним слоем земной коры.

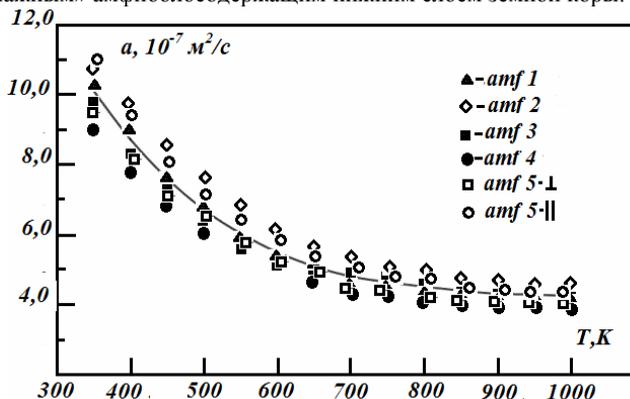


Рис. 1. Температурное поведение температуропроводности амфиболитов

На рис. 1 показана температурная зависимость температуропроводности 4-х образцов амфиболитов (amf 1-4) и роговой обманки (amf 5) вдоль и поперек слоистости. В таблице 1 представлены экспериментальные данные по измерению всех трех теплофизических характеристик этих же образцов: температуропроводности (a), удельной теплоемкости (C_p) и теплопроводности (λ) амфиболитов в интервале температур $350 \div 1000\text{K}$, полученные в лаборатории геотермии методом «температурных волн» (РТР-III рода) на установке с оптическим бесконтактным источни-

ком тепловой энергии. Всего было изучено 8 образцов амфиболитов из различных регионов России, в том числе и из Кольской сверхглубокой скважины и скважин-спутников в районе Печенгского комплекса пород Балтийского Щита.

Как оказалось, средние значения тепловых характеристик при низких температурах (табл. 1) довольно хорошо согласуются со средними значениями большого массива данных по тепловым свойствам амфиболитов, полученных коллективом авторов при 300К [20].

Как видно из рис. 1 и таблицы 1, температуропроводность и теплопроводность амфиболитов уменьшаются с ростом температуры в исследованном диапазоне температур, что соответствует теоретическим представлениям. В целом, температурное поведение тепловых свойств амфиболитов мало отличается от температурного поведения этих же свойств для интрузивных пород, таких как гранаты, диориты, габбро, дуниты, гарцбургиты и другие [19].

Различия наблюдаются лишь в тонкостях, связанных, например, с выходом кристаллической воды, а также в величине значений тепловых свойств при фиксированной температуре.

Таблица 1. Средние значения тепловых свойств амфиболитов ($\bar{\rho} = 2965 \text{ кг/м}^3$, $\bar{v} = 4,2 \text{ км/с}$)

T, К	350	400	500	600	700	800	900	1000
$a \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{с}$	10,2	9,6	7,7	6,8	5,5	5,0	4,6	4,4
$C_p, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	950	1000	1100	1185	1225	1250	1270	1280
$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	2,95	2,85	2,50	2,35	2,0	1,85	1,75	1,7
$\bar{l}, \text{ \AA}$	7,3	6,87	5,51	4,87	3,94	3,58	3,30	3,15

В таблице 1 представлена также средняя длина свободного пробега фононов \bar{l} , рассчитанная по данным о температуропроводности и средней скорости звука в амфиболитах ($\bar{v} \cong 4,2 \text{ км/с}$), согласно формуле $a = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{l}$. Средняя скорость звука \bar{v} в образцах амфиболитов принята постоянной и вычислена по средним значениям v_p и v_s для этой группы пород заимствованные из монографии [21], согласно известному соотношению:

$$\bar{v}^3 = 3 \frac{v_p^3 v_s^3}{v_s^2 + 2v_p^2} \quad (1)$$

Построение модели распределения тепловых свойств в литосфере стабильных континентальных областей (щиты, платформы), выполнено путем прямого сопоставления результатов лабораторного исследования веществ с минералогической моделью литосферы и с использованием экспериментальных данных об особенностях кондуктивного (фононного) теплопереноса в сложных многоатомных кристаллических твердых телах, которыми являются основные породообразующие минералы [16]. Подробности методического подхода к построению таких моделей изложены в [19]. В настоящей публикации отметим только основные исходные

данные. Как и в [19], литосфера стабильных континентальных областей состоит из трех слоев: верхнего слоя земной коры толщиной 20 км, имеющего диоритовый состав; нижнего слоя (20 км), имеющего, в отличие от [19], не базальтовый, а амфиболитовый состав и верхов мантии до глубин ~ (100 – 120) км ультрабазитового состава. Необходимые теплофизические параметры вещества диоритового слоя коры и верхов мантии, полученные нами ранее и использовавшиеся в [19] при построении модели распределения тепловых свойств в континентальной литосфере с базальтовым слоем коры приведены в таблице 2.

Таблица 2. Средние значения теплофизических свойств диоритов и ультрабазитов [19].

Параметры	Т, К					
	300	400	500	600	800	1000
Диориты						
$a \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{с}$	10,1	8,3	7,1	6,0	4,3	3,8
$C_p, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	920	1030	1120	1150	1210	1235
$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	2,5	2,3	2,1	1,9	1,4	1,25
Ультрабазиты						
$a \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{с}$	17,3	12,4	10,0	7,8	6,3	5,9
$C_p, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	860	1010	1140	1170	1210	1230
$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	4,3	4,0	3,8	3,6	3,1	2,7

Температура в континентальной литосфере взята по геотерме Стейси, обоснованной самой различной геофизической информаций [22].

Полученные профили распределения тепловых свойств в континентальной литосфере с амфиболитовым нижним слоем коры, показаны на рис. 2. При построении этих моделей учтено также «залечивающее» влияние давления, которое, согласно данным различных авторов, обеспечивает относительный прирост a и λ основных породообразующих минералов и горных пород при соответствующих термодинамических условиях в (0,4÷0,6)%/кбар [18].

Пунктирными линиями на рис. 1 нанесены минимально возможные значения кондуктивной теплопроводности λ_{\min} и температуропроводности a_{\min} глубже границы Мохоровичича. Они рассчитаны по методике, описанной нами в [18, 19] для случая, когда средняя длина свободного пробега фононов достигает минимума, и известные соотношения для a и λ могут быть записаны следующим образом:

$$a_{\min} = \frac{1}{3} \bar{v} l_{\min} = \frac{1}{3} \bar{v} \left(\frac{4\pi \bar{M}}{3N_a \rho} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$\lambda_{\min} = \rho C_p a_{\min} = \frac{1}{3} \rho C_p \bar{v} \left(\frac{4\pi \bar{M}}{3N_a \rho} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

где \bar{M} - средний атомный вес вещества литосферы, а $l_{\min} = \bar{v} \tau_{\min}$ - легко находятся по частоте обрезания дебаевского спектра.

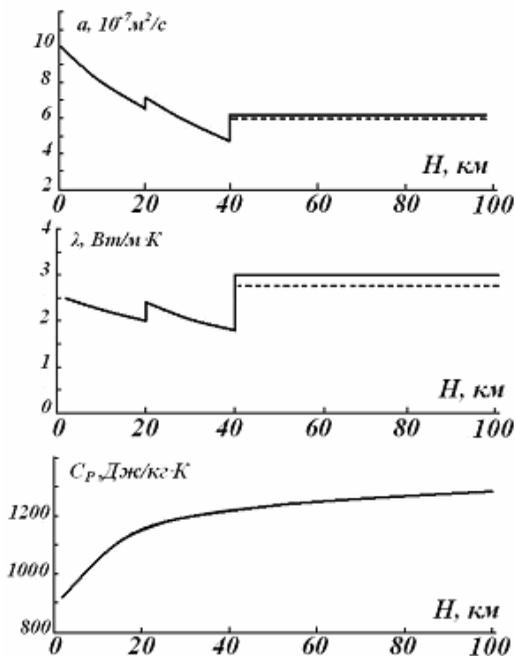


Рис.2. Профили распределения теплофизических свойств в континентальной коре с амфиболитовым нижним слоем.

Действительно, среднее время жизни фононов τ обусловлено процессами их рассеяния, среди которых в области высоких температур преобладающими становятся трехфононные процессы переброса. Согласно теории, частота таких процессов возрастает пропорционально температуре, сокращая соответствующим образом среднее время жизни фононов. Минимальное τ_{\min} определяется максимальной частотой колебания атомов, которая, в свою очередь, ограничена в реальной дискретной кристаллической структуре частотой обрезания дебаевского спектра

$$v_{\max} = \frac{k}{h} \Theta \tag{4}$$

Таким образом, для τ_{\min} , будем иметь, по определению:

$$\tau_{\min} = \frac{1}{v_{\max}} = \frac{h}{k\Theta} \tag{5}$$

и, следовательно,

$$l_{\min} = \bar{v} \frac{h}{k\Theta} \tag{6}$$

Термодинамическая дебаевская температура Θ , с достаточной степенью точности, может быть заменена своим акустическим приближением:

$$\Theta = \frac{h}{k} \left(\frac{3N_a \rho}{4\pi \bar{M}} \right)^{\frac{1}{3}} \bar{U} \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6), получим для минимальной длины свободного пробега фононов соотношение:

$$l_{\min} = \left(\frac{4\pi \bar{M}}{3N_a \rho} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (8)$$

которое и фигурирует в формулах (2), (3).

При расчете a_{\min} и λ_{\min} , средний атомный вес принят равным $\bar{M} = 21$, а U_p и U_s для расчета средней скорости \bar{U} взяты согласно сейсмической параметрической модели РЕМ-С [23].

Анализируя полученные профили распределения тепловых свойств в континентальной литосфере с амфиболитовым нижним слоем земной коры, представленные на рис. 2., можно сделать следующие основные выводы:

- температуропроводность на толще континентальной литосферы интенсивно убывает с глубиной более чем в два раза от значений $\sim (10 \div 11) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ вблизи поверхности до значений $\sim (4,5 \div 5,0) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ в основании коры;

- теплопроводность в континентальной коре можно считать слабо изменяющейся со средней величиной $\lambda \approx 2,25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

- в верхних горизонтах литосферы ($40 \div 120$) км, $a = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ и $\lambda = 3,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ близки к минимально возможным значениям и практически постоянны на этом диапазоне глубин;

- на границах раздела теплопроводность и температуропроводность испытывают скачки с увеличением значений в 1,2 и 1,5 раза, соответственно, что несколько меньше значений, рассчитанных согласно сейсмической модели РЕМ-С в [19], где они составляют 1,3 и 1,7 раза;

- теплоемкость C_p в континентальной литосфере возрастает примерно в 1,5 раза, не чувствуя границ раздела и достигает в основании коры ($\sim 850\text{К}$), значений, соответствующих классическому насыщению.

Полученные результаты могут быть использованы для исследования современных термических процессов в литосфере, в том числе, и для уточнения континентальной геотермы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №11-05-00873-а

Литература

1. Петрунин Г.И., Юрчак Р.П. Установка для измерения температуропроводности минералов методом плоских температурных волн. ТВТ, №3, 1971, с. 622-626.
2. Петрунин Г.И., Юрчак Р.П. Учет влияния теплообмена при измерении температуропроводности методом плоских температурных волн. Вестник Моск. Ун-та, Сер. Физика и астрономия, №5, 1971, с. 613-614.

3. Попов В.Г., Петрунин Г.И. Нестеров А.Г. Установка для измерений температуропроводности и теплоемкости горных пород и минералов в интервале температур 300-1000 К. Депонирована в ВИНТИ. № 4744-81. Деп. 9.10.81, 28 с.
4. Петрунин Г.И., Попов В.Г. Метод и аппаратура высокоточных измерений теплофизических характеристик океанических осадков. Физика Земли, № 7-8., 1994, с. 35-41.
5. Петрунин Г.И., Юрчак Р.П., Ткач Г. Ф. Температуропроводность базальтов при температуре 300-1200К. Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, №2, 1971, с. 65-68.
6. Магницкий В.А., Петрунин Г.И., Юрчак Р.П. Поведение температуропроводности некоторых полевых шпатов и плагиоклазов при температурах 300-1200К. Доклады АН СССР, т. 199, №5, 1971, с. 1058-1060.
7. Петрунин Г.И. Связь теплоемкости породообразующих минералов со средним атомным весом. Вестник Моск. Ун-та, Сер. Физика и астрономия, т. 22, №4, №5, 1981, с. 66-68.
8. Петрунин Г.И., Попов В.Г. Влияние серпентинизации на тепловые свойства гипербазитов. Известия АН СССР, сер. Физика Земли, № 4, 1981, с. 18-24.
9. Петрунин Г.И., Попов В.Г. Тепловые свойства кварцсодержащих интрузивных горных пород. Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, № 3, 1983. с. 75-81.
10. Мегахед А. Петрунин Г.И., Попов В.Г., Ладыгин В.М. Тепловые характеристики эффузивных пород Малого Кавказа. Изв. АН СССР, сер. Физ. Земли, № 12, 1985, с. 81-87
11. Петрунин Г.И., Попов В.Г. Тепловые свойства пород из Кольской сверхглубокой скважины. Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, № 1, 1988, с. 44-51.
12. Петрунин Г.И. Попов В.Г., Ладыгин В.М. Тепловые свойства базальтов тройственного сочленения Буве и их связь с петрофизическими характеристиками. Физика Земли, №6, 2001, с. 3-15.
13. Петрунин, Г.И., Попов В.Г., Ильин И.А. Изучение особенностей кондуктивного теплопереноса в плагиоклазах. Физика Земли. 2004, №9, с. 58-66.
14. Петрунин Г.И., Орлик Е.В. Температуропроводность минеральных компонент мантийного вещества («пиролита») в диапазоне температур от комнатных до плавления (300-1700К). Вестник Моск. Ун-та, Сер. 3. Физика и астрономия, №4, №6, 2007, с. 52-56.
15. Петрунин, Г.И., Попов В.Г., Сосков А.В. Теплофизические свойства осадков Черного моря. Вестник Моск. Ун-та, Сер. 3. Физика и астрономия, №1, 2008, с. 62-67.
16. Петрунин Г.И., Попов В.Г. Особенности температурного поведения решеточной теплопроводности минерального вещества Земли. МАИК Наука, Физика Земли, №7-8, 1994, с 35-41.
17. Петрунин Г.И., Орлик Е.В. Кондуктивный теплоперенос в мантии Земли. Доклады АН СССР, т. 299, №2, 1988, с. 336-341.
18. Петрунин Г.И., Попов В.Г. О фоновой теплопроводности и ее поведении на границах раздела в верхней мантии. Известия АН СССР, сер. Физика Земли, №6, 1983, с 87-92.
19. Петрунин Г.И., Попов В.Г. Тепловые свойства вещества литосферы. Известия АН СССР, Физика Земли, №10, 1985, с 63-69.

20. Галдин Н.Е., Любимова Е.А., Попов Ю.А. и др. Тепловые свойства пород. Коллективная монография: «Кольская сверхглубокая», М., Недра, 1984, с.341-343.
21. Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породобразующих минералов и горных пород. М., Наука, 1970, 276 с.
22. Stacey F.L. A thermal model of the earth. Phys. Earth Planet Inter., Vol. 15, 1977, pp.341-348.
23. Dzievonski A.M., Hales A.L., Lapwood E.K. Parametrically simple Earth model consistent with geophysical data. Phys. Earth Planet Inter., Vol. 10, 1975, pp.12-48.

МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ЛОКАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ РАДИАЦИОННОГО ФОНА В УСЛОВИЯХ ГОРОДА

А.А. Потапов

Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Радиационный фон является важной экологической характеристикой территорий. Исследование пространственной неоднородности радиационной обстановки на местности может вестись как с применением геохимических методов (дополненных гамма-спектрометрическими и радиохимическими), так и с применением физических (дозиметрических) методов.

Особенность геохимических методов состоит в изучении концентраций радионуклидов в различных природных средах и скоростей их миграции [1, 2]. Их технология основана на отборе проб (почвы, воды, биоты) с последующими лабораторным гамма-спектрометрическими исследованиями; реже распространена *in-situ* гамма-спектроскопия, требующая как дорогостоящей аппаратуры, так и априорной информации о характере распределения радионуклидов в изучаемой среде [3]. Все это существенным образом ограничивают пространственное разрешение таких работ, которое обычно составляет от нескольких километров до нескольких сотен метров, и их оперативность.

Задача преодоления этих ограничений стала причиной создания и активного расширения национальных и международных сетей стационарных постов дозиметрического контроля, предназначенных для раннего оповещения о радиационных авариях и текущих радиационных условиях [4, 5]. Для создания моделей пространственной неоднородности радиационного фона могут использоваться как данные мониторинговых сетей [4], так и (чаще в национальном масштабе) систематические дозиметрические исследования, при этом из-за значительного объема работ исследователи прибегают к комбинированию данных наземных измерений и аэрогаммасъемки [6]. Пространственное разрешение таких моделей также чаще всего составляет от нескольких километров и грубее.

С помощью мелкомасштабных данных о радиационной обстановке затруднительно дать корректную оценку локальной экологической обстановки в искомой точке, т.к. в условиях города мощность дозы зависит от целого ряда локальных

причин – экранировки почвенного покрова асфальтом/бетоном, перемешиванием разных почвенных горизонтов с отличающейся удельной активностью и т.п. Например, показано, что благодаря мощению улиц и использованию привозных грунтов возможно снижение мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения на 60...80 % по сравнению с измерениями до начала массового строительства [7].

Пространственное разрешение дозиметрических исследований в урбанизированных средах составляет чаще всего 200...500 м, что затрудняет выявление малоразмерных радиационных аномалий вблизи отделки из натурального камня, жилых и общественных зданий или при отсыпке территорий дворов гранитной крошкой и т.п., где естественная МЭД может в 2...5 раз превышать естественную [8]. Повышение пространственного разрешения измерений до 10...15 метров характерно только при локальных работах вблизи потенциально опасных объектов (хранилищ радиоактивных отходов и проч.) [9].

Недостаточное внимание к малоразмерным и относительно небольшим по амплитуде (2...5 крат) колебаниям радиационного фона в городе связано с тем, что нормальными считаются колебания радиационного фона на местности в пределах 10...30 мкР/ч (в зависимости от геологии региона), поэтому на изменение фона в 2...5 раз в пределах указанных границ, органы санитарного надзора обычно не обращают внимания. Вместе с тем, по мнению ряда исследователей, придерживающихся т.н. концепции "малых доз", даже незначительные вариации радиационного фона должны учитываться и должны приниматься всесторонние меры для снижения их амплитуды, т.к. риск развития негативных радиационно-биологических эффектов при малых дозах прямо пропорционален мощности дозы (т.е. при увеличении фона в 2 раза, относительный биологический вред увеличивается также в 2 раза) [10].

При натурном обследовании радиационной обстановки на местности для выявления всего масштабного ряда вариаций гамма-фона пространственное разрешение сети измерений должно быть очень высоким (порядка метрового и лучше), что практически нереализуемо при каком-либо значительном территориальном охвате исследования. Поэтому автором был разработан и практически апробирован оперативный метод изучения пространственной неоднородности радиационного фона с применением портативной дозиметрической аппаратуры, адаптированный к условиям сильно мозаичной подстилающей поверхности городской среды.

Основной задачей метода является выявление вариаций МЭД, связанных с естественными колебаниями фона в пределах искомой территории, а также с крупномасштабной хозяйственной деятельностью в границах искомого участка местности (земляные работы по нивелированию форм рельефа и т.п.) с характерным пространственным шагом не менее шага пространственного разрешения исследования.

Разработанный метод в первую очередь направлен на снижение влияния на экспериментальные результаты локальных вариаций МЭД, а точнее на корректность создаваемой на их основе пространственной модели распределения радиационного фона. Вместе с тем, в его состав входят и практические приемы, направленные на целевое выявление степени радиационной опасности имеющихся источников повышенного фона (в первую очередь объектов из натурального камня и типичных искусственных покрытий исследуемой местности), и анализ их характе-

ристик. Предлагаемый метод исследования пространственной неоднородности радиационного фона основан на совокупности следующих приемов проведения измерений:

- I. В пределах искомой территории все измерения над поверхностью земли/покрытиями проводятся на высоте 1 м, а над дискретными объектами, расположенными выше уровня земли, на высоте 0 м (вплотную).
- II. После набора первичных экспериментальных данных вся совокупность точек мониторинга подразделяется на четыре сети измерений, разделенных по признаку подстилающей поверхности: 1) почво-грунты (базовые точки); 2) искусственные покрытия на основе натурального камня; 3) искусственные покрытия обычные (асфальт, тротуарная плитка); 4) поверхности потенциально-опасных объектов (памятники из гранита, цоколи зданий и т.п.).
- III. Базовые точки сети измерений МЭД располагаются исключительно над участками с открытым или задернованным грунтом (газоны, лесопарки и т.п.) для минимизации влияния локальных искусственных покрытий и включений. Пространственное разрешение базовой сети измерений должно быть не хуже 100 м.
- IV. По завершению набора первичной информации анализируются пространственные вариации МЭД по данным базовой сети измерений, при необходимости с исключением необследованных/недоступных участков, а также распределение МЭД над искусственными поверхностями и вблизи антропогенных объектов. Последнее позволяет провести анализ радиационных характеристик объектов, искажающих естественный гамма-фон, и степени их экологической опасности в условиях, когда связанные с ними вариации МЭД метровой – субметровой протяженности не выражаются в масштабе исследования.

Практическая апробация настоящего метода была осуществлена автором на территории МГУ им. М.В. Ломоносова и некоторых непосредственно прилегающих участках местности общей площадью 2,51 км². Для этого с помощью дозиметра интегрального типа ДКГ-07Д "Дрозд" были проведены измерения МЭД в 160 базовых точках искомой местности на высоте 1 м от земли со средним пространственным разрешением 90,4 м. Основные результаты измерений мощности экспозиционной дозы гамма излучения над участками местности с естественным грунтом приведены в таблице 1.

Также было проведено 25 измерений над обычными искусственными поверхностями и 21 измерение над участками с мощением гранитными плитами, крошкой и т.п. материалами из натурального камня (в обоих случаях на высоте 1 м); пространственное разрешение сетей измерения составило 178,5 и 79,4 м соответственно; точки измерений были распределены по всей территории для повышения репрезентативности.

Оценка радиационной опасности дискретных объектов из гранита (памятников, цоколей зданий, малых архитектурных форм и проч.) была проведена посредством измерений на поверхности 70 объектов, расположенных в границах ранее означенной территории; пространственное разрешение данной сети измерений составило 70,8 м.

Таблица 1. Результаты статистической обработки измерений МЭД по 160 точкам над естественными почво-грунтами.

Параметр	Результат
Площадь обследованной территории, км ²	2,51
Количество точек измерений, единиц	160
Среднее пространственное разрешение исследования, м	90,4
Среднее арифметическое значение МЭД, мкР/ч	15,1
Минимальное зарегистрированное значение МЭД, мкР/ч	12,0
Максимальное зарегистрированное значение МЭД, мкР/ч	18,0
Перепад величины в пределах массива данных, крат	1,5

Как следует из таблицы 1, среднее пространственное разрешение базовой сети измерений составило 90,4 м, что позволило выявить основные закономерности в распределении радиационного фона. Пространственное разрешение в условиях лесопарков составило в среднем 109,2 м. С наилучшим пространственным разрешением (80,0 м) были обследованы участки местности на которых расположены учебные, лабораторные корпуса и спортивные сооружения московского университета; на части территории МГУ (0,27 км²), закрытой для свободного посещения, измерения МЭД не проводились (соответствующая величина была вычтена из общей площади обследованной территории).

Среднее значение мощности дозы гамма излучения по территории составило 15,1 мкР/ч, что близко к значениям МЭД для города Москвы [11] и не превышает ни потенциально опасного уровня в 60 мкР/ч [12], ни ПДУ для участков территории, предназначенных для жилой застройки равного 30 мкР/ч [13]. Вместе с тем, в 61 точке (в 38,1 % случаев) незначительно превышает контрольный уровень в 15 мкР/ч установленный в [14] для высоты 0,1 м от земли.

Необходимо отдельно указать причины отнесения уровней мощности дозы ≥ 60 мкР/ч к потенциально-опасным. При неравномерном облучении в течение пятилетнего периода [15] установлен максимальный предел годовой эффективной дозы для населения равный 5 000 мкЗв. В случае если данный предел дозы превышает за счет природных источников, то в соответствии с [13] облучение населения считается повышенным. Если принять, что накопление дозы в 5 000 мкЗв происходит равномерно в течение года и только за счет внешнего облучения, то получим: 5 000 мкЗв/8 800 часов \approx 0,60 мкЗв/ч (60 мкР/ч) [12].

При проведении измерений помимо портативного дозиметра для накопления и обработки данных использовалась портативная ЭВМ Pocket PC, GPS приемник и мобильная геоинформационная система (ГИС) ArcPAD. Это обеспечило создание пространственно-привязанного точечного слоя, содержащего в атрибутивной таблице результаты измерений, а также его экспорт в среду настольной ГИС ArcGIS.

Затем посредством сплайн интерполяции с барьерами (Spline with barriers) была построена непрерывная Grid-матрица с размером пикселя 5 м и на ее основе воссоздано поле изолиний. В качестве барьеров интерполяции использовались внешние границы обследованной территории, а также внешние границы участка

местности, где измерения не проводились. На рисунке 1 приведено пространственное распределение уровней МЭД по обследованной территории.

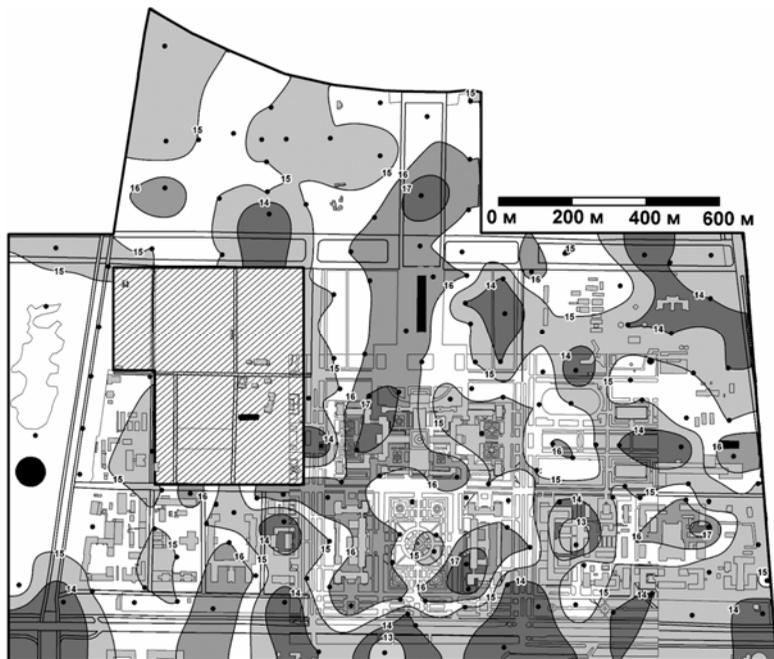


Рис. 1. Пространственное распределение МЭД гамма излучения на высоте 1 м от поверхности на территории МГУ и некоторых прилегающих территориях; тоновой градацией показано изменение МЭД на 1 мкР/ч; штриховкой показана территория, где измерения не проводились; точками показаны места проведения измерений.

Из рис. 1 следует, что на участках с открытым или задернованным грунтом протяженность зон с колебаниями МЭД менее 1 мкР/ч составила от 50...150 м до 300...400 м, а в некоторых случаях по отдельным направлениям до 300...1300 м. Дополнительный анализ пространственных вариаций был проведен с использованием карты "Мощность насыпного грунта", опубликованной в мульти-медиа-атласе московского университета [16]. Анализ выявил пересечение по планувому расположению ряда участков со значениями МЭД выше средних значений (16...17 мкР/ч) и участков с изъятием грунта на глубину 1...3 метра (особенно в пределах центральной части рис. 1, ограниченной изолинией 16 мкР/ч). Также удовлетворительное совпадение по местоположению выявлено для некоторых участков территории МГУ со значениями МЭД ниже среднего (< 15 мкР/ч) и зон на которых проводилась насыпка грунта для выравнивания неровностей мощностью до 1...6 метров (например, правый верхний угол рис. 1 в пределах контуров 15 и 14 мкР/ч).

Таким образом, совмещение дозиметрических данных и материалов об особенностях территории помогло выявить возможные причины появления пространственной неоднородности радиационного фона. Вместе с тем, из-за различающейся степени пространственной детализации материалов на основании которых создан рис. 1 и карта в [16] и конечного пространственного разрешения дозиметрического исследования строгого совпадения контуров мощности насыпного/изъятго грунта и МЭД гамма излучения по всей площади исследования выявлено не было.

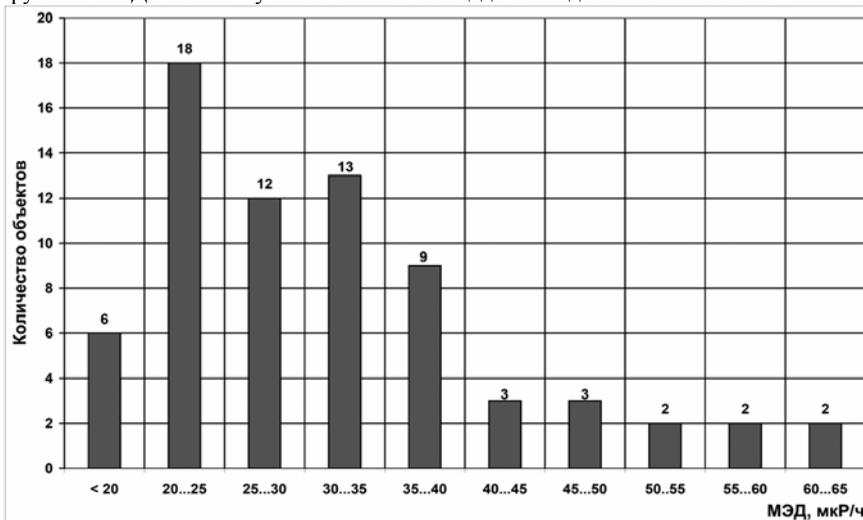


Рис. 2. Распределение результатов измерений уровней МЭД на поверхностях 70 дискретных объектов, выполненных из гранита.

Измерения МЭД над обычными искусственными поверхностями (асфальт, тротуарная плитка), проведенные в 25 пунктах, показали, что средний уровень гамма-фона над ними составил 14,0 мкР/ч, что несколько ниже чем над открытым грунтом; диапазон вариаций МЭД по всем пунктам данной группы находился в границах от 12 до 18 мкР/ч, что практически соответствует диапазону колебаний естественного фона на обследованной территории.

Измерения гамма-фона в 21 пункте над искусственными поверхностями из гранита выявили существенное превышение естественных уровней МЭД: среднее значение составило 24,5 мкР/ч, а диапазон вариаций составил от 14 до 34 мкР/ч. Из этого следует, что наличие протяженной области с мощением из гранита в большинстве случаев ведет к формированию области повышенного фона. Вместе с тем, высокая вариативность типа камня, его толщины и т.п. причин делает затруднительным априорную (без измерений) оценку радиационной безопасности таких участков. Также необходимо отметить, что некоторые из точек измерений с повышенным фоном были расположены на протяженных внешних лестницах зданий, в зонах интенсивного движения пешеходов.

Обработка результатов измерений МЭД на поверхностях 70 гранитных объектов (памятники и проч.) на территории МГУ показала, что среднее значение

МЭД составило 32,0 мкР/ч, что в 2,1 раза выше, чем средняя МЭД над открытым грунтом; также был выявлен значительный диапазон вариаций МЭД с границами от 16 до 62 мкР/ч. На рис. 2 приведено распределение результатов измерений по диапазонам МЭД с шагом в 5 мкР/ч.

Из рис. 2 видно, что наиболее часто встречающимися величинами МЭД (25,7 %) является диапазон 20...25 мкР/ч, на втором месте диапазон 30...35 мкР/ч (18,6 %) и на третьем 25...30 мкР/ч (17,1 %), которые в сумме составляет 61,4 %. Таким образом, по данным натурных измерений, вероятность превышения уровня в 35 мкР/ч на поверхности гранитных объектов не превышает 30 % (с учетом группы < 20 мкР/ч), а порога ≥ 60 мкР/ч – 4,3 %.

Доля дискретных объектов с уровнями гамма фона на поверхности более 50 мкР/ч не превышает 8,6 %, при этом необходимо отметить, что в эту группу входят как объекты возведенные (установленные) при первичной застройке территории в начале 1950-х годов, так и в более позднее время вплоть до 1990-х...2000-х годов. Доля объектов с уровнями МЭД на поверхности ≥ 60 мкР/ч, которые могут быть отнесены к потенциально-опасном, составляет 4,3 % (всего 3 объекта).

Приведенные данные свидетельствуют, что на поверхностях дискретных объектов, выполненных из гранита, уровни МЭД в среднем более чем в 2 раза превышают фон над грунтовыми поверхностями и обычными искусственными покрытиями. Положительным фактором является то, что радиационные аномалии пространственно локализованы (радионуклиды не выходят за пределы горной породы) и не создают дополнительной радиационной нагрузки на население на расстоянии более 3...15 м от поверхностей соответствующих объектов.

Совокупность результатов натурных исследований показывает существование значимой пространственной неоднородности радиационного фона в пределах обследованной территории МГУ, связанной с хозяйственным освоением/застройкой территории и выявляемой посредством дозиметрических измерений с использованием доступных контрольно-измерительных средств. По абсолютной величине в большинстве случаев зафиксированные значения МЭД находились в пределах санитарных норм, но в 5 пунктах над гранитным мощением и на поверхности 35 дискретных гранитных объектов МЭД превышала ПДУ 30 мкР/ч для территорий предназначенных для жилой застройки [13].

Выводы

1. Разработан метод экспериментального исследования (мониторинга) пространственной неоднородности радиационного фона в условиях городской среды с высокой мозаичностью подстилающей поверхности, связанной преимущественно с естественными колебаниями фона по участку и крупномасштабной хозяйственной деятельностью в пределах антропогенно-измененной территории, и оценки степени радиационной безопасности имеющихся в ее пределах искусственных покрытий и источников повышенного фона. Сущность метода состоит в проведении раздельных измерений над грунтовыми (естественными) участками местности, над искусственными покрытиями и вблизи потенциально-опасных объектов.

2. Практическая апробация предложенного метода проведена на примере территории МГУ имени М.В. Ломоносова и включала исследование пространственной неоднородности мощности экспозиционной дозы гамма излучения на уча-

стке площадью 2,51 км² с применением портативной дозиметрической аппаратуры.

3. Использование при проведении измерений средств спутниковой навигации и дальнейшая интеграция данных в среду ГИС ArcGIS позволило провести анализ пространственных вариаций радиационного фона. Выявлено, что на высоте 1 м в на участках с открытым или задернованным грунтом протяженность зон с колебаниями МЭД менее 1 мкР/ч составляла от 50...150 м до 300...400 м, а в некоторых случаях по отдельным направлениям до 300...1300 м.

4. Совместный анализ данных дозиметрических измерений и опубликованных картографических материалов выявил совпадение по пространственному расположению ряда участков со значениями МЭД выше средних значений (16...17 мкР/ч) и участков с изъятием грунта на глубину 1...3 метра. Также выявлено пересечение участков со значениями МЭД ниже среднего (< 15 мкР/ч) и зон на которых проводилась насыпка грунта для выравнивания неровностей мощностью до 1...6 метров.

5. Средний уровень мощности дозы над искусственными поверхностями по экспериментальным данным в среднем составил 14,0 мкР/ч, что несколько ниже чем над естественными грунтами. Средний уровень мощности дозы над поверхностями из гранита был в 1,6 раза выше чем средний уровень гамма фона над естественным грунтом и составил 24,5 мкР/ч, варьируясь от 14 до 34 мкР/ч в отдельных точках измерения. В 81 % случаев МЭД на высоте 1 м над гранитными поверхностями не превышала порога в 30 мкР/ч, а в остальных случаях находилась в диапазоне 30...35 мкР/ч.

6. Средний уровень мощности дозы на поверхностях дискретных объектов, выполненных из гранита, составил 32 мкР/ч, что в 2,1 раза выше чем средний уровень гамма фона над естественным грунтом. Отмечена высокая вариативность значений гамма фона у различных видов гранита – от практически фоновых уровней (16 мкР/ч), до значений близких или незначительно превышающих потенциально-опасный порог в 60 мкР/ч.

7. В целом, несмотря на выявленные пространственные вариации радиационного фона, экологическая обстановка на обследованной территории соответствует санитарным нормам, а выявленные радиационные аномалии вблизи объектов из гранита пространственно локализованы, т.к. радионуклиды надежно зафиксированы внутри использованного при застройке натурального камня и поэтому отсутствует опасность дополнительной радиационной нагрузки на население на расстоянии более 3...15 м от поверхностей соответствующих объектов.

Литература

1. Титаева Н.А. Ядерная геохимия. М.: Изд-во МГУ, 2000. – 336 с.
2. Богословский В.А., Жигалин А.Д., Хмелевской В.К. Экологическая геофизика. М.: Изд-во МГУ, 2000. – 256 с.
3. Booth L.F. et. al. In-situ гамма-спектрометрия для оценки загрязнения почвы. Meriden: Canberra Industries, 1996 г. URL: <http://www.canberra.ru/html/literature/insitu.pdf> (дата обращения: 18.08.2011)
4. Szegvary T. et. al. Mapping terrestrial γ -dose rate in Europe based on routine monitoring data //Radiation Measurements. – 2007. – № 42. – P. 1561 – 1572.

5. Радиационная обстановка на предприятиях Росатома [Электронный ресурс] //Интернет портал. URL: <http://www.russianatom.ru/> (дата обращения 18.08.2011).
6. Poncela L.S. et. al. Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain //Environment International.– 2004. – № 29. – P. 1091 – 1096.
7. Affonseca M.S. et. al. The influence of urbanization on natural radiation levels in anomalous areas //Journal of Environmental Radioactivity. – 2002. – № 63. – P. 65 – 75.
8. Королев А. Ф., Краснушкин А. В., Потапов А. А., Турчанинов А. В. Возможности геоинформационных технологий в анализе больших объемов слабоструктурированной физико-экологической информации //Научные технологии. – 2005. – № 1. – Т. 6. – С. 42 – 47.
9. Reistad O. et. al. On-site gamma dose rates at the Andreeva Bay shore technical base, northwest Russia //Journal of Environmental Radioactivity.– 2008. – № 99. – P. 1032 – 1044.
10. Ethical Issues in Radiation Protection (An International Workshop). Stockholm: The Swedish Radiation Protection Institute (SSI), 2000. – 52 p.
11. Экологический атлас Москвы /рук. проекта И.Н. Ильина/. М.: АБФ, 2000. – 96 с.
12. Горшкова О.М., Краснушкин А.В., Потапов А.А., Пращкина Е.М., Марголина И.Л., Корешкова Т.Н., Шкиль А.Н. Лабораторные методы изучения и контроля состояния окружающей среды: Учебное пособие/ Под ред. А.П. Капицы, А.В. Краснушкина. М.: Географический факультет МГУ, 2008. – 180 с.
13. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. СП 2.6.1.1292-03. – М.: Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2003. – 40 с.
14. Допустимые уровни ионизирующего излучения и радона на участках застройки МГСН 2.02-97. Москва: Научно-исследовательский и информационно-аналитический издательский центр (НИАЦ), 1997. – 19 с.
15. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523 – 09. Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009. URL: <http://files.stroyinf.ru/Data1/56/56325/#i516959> (дата обращения: 18.08.2011).
16. Берлянт А.М., Вилков А.Ю. Мультимедиа-атлас "Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова на Воробьевых горах". М.: МГУ, 2003.

КОСМИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
МОНИТОРИНГА МОРСКИХ АКВАТОРИЙ.
АЛЬТИМЕТРЫ (ВЫСОТОМЕРЫ)

Пустовойтенко В.В.^{1,2}, Запевалов А.С.¹, Показеев К.В.³

¹ *Морской гидрофизический институт НАН Украины*

² *Черноморский филиал МГУ им. М.В. Ломоносова*

³ *Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

Рассматриваются радиолокационные (РЛ-) альтиметрические системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) космического базирования в приложении к задачам экологического мониторинга морских акваторий. Приводятся сведения об основных технических и информационных характеристиках РЛ-альтиметрических систем. Рассматриваются тенденции развития спутниковых альтиметрических РЛ-систем мониторинга морских акваторий.

Введение. Ранее (см. [1, 2]) мы рассмотрели возможности использования видовых (ориентированных на получение изображений) РЛ-систем космического базирования – радиолокационных станций бокового обзора (РЛС БО) в сфере экологического мониторинга морских акваторий. В предлагаемой читателю работе мы рассмотрим основные возможности и особенности использования в интересах экологического мониторинга морских акваторий трассовых РЛ-систем – РЛ-альтиметров космического (спутникового) базирования, позволяющих получать информацию о значимой высоте морских волн, о скорости ветра вблизи морской поверхности и о реальной топографии морской поверхности, что позволяет, в конечном итоге, с использованием методов математического моделирования (см., например, [3-5]) получать данные о структуре и характеристиках полей морских течений. И, что весьма важно, данные охватывают районы морских акваторий, находящиеся вне поля зрения «стандартной» сети гидрометеорологических наблюдений и поступают на регулярной основе вне зависимости от сезона, времени суток и местных погодных условий.

Актуальность таких измерений диктуется беспрецедентным антропогенным воздействием на окружающую природную среду, в том числе – Мировой океан, вследствие наблюдающегося в настоящее время интенсивного научно-технического прогресса. Ряд исследователей (см., например [6]) считают, что на Земле наблюдаются признаки глобального экологического кризиса. При этом ситуация настолько серьезна, что человечество стоит перед необходимостью решения проблем, по сути дела поставивших его (человечество), как биологический вид, на грань выживания. Одной из кризисных, с экологической точки зрения, точек Земного шара и Мирового океана является регион Черного моря, современное состояние которого в целом оценивается как неблагоприятное. Считается (см., например [7, 8]), что Черное море подвержено наибольшему антропогенному прессу в Европе.

Влияние человека вызывает существенные изменения в экологической системе моря, выражающиеся в привнесении новых биологических видов, количественных и качественных нарушениях природных циклов обращения питательных веществ, катастрофически изменяющих естественно сложившийся баланс. Интенсивная промышленная эксплуатация шельфовой области моря и его использование

для добычи и транспортировки нефти и газа приводит к возрастанию вероятности крупных катастроф с непоправимым ущербом рекреационным и биологическим ресурсам моря (см., например, [9]).

Ведение разнообразной хозяйственной деятельности без ущерба (или с минимальным ущербом) для экологической системы Черного моря невозможно без создания совершенной системы контроля состояния морской среды, способной дать исчерпывающую и достоверную информацию для принятия оптимальных управленческих решений. Одним из элементов этой системы и являются космические РЛ-альтиметрические системы ДЗЗ.

Физические основы применения спутниковых РЛ-альтиметрических систем в оперативной океанографии для мониторинга морских акваторий. Кратко напомним читателю основные принципы, лежащие в основе «океанографического» применения спутниковых РЛ-альтиметрических систем.

Зондирование подстилающей (морской) поверхности ведется «в надир» с помощью коротких ¹ зондирующих импульсов «прямоугольной» ² формы. Информативными параметрами являются:

– время распространения зондирующего сигнала от космического аппарата (КА) до морской поверхности и обратно (как и в «классическом» РЛ-дальномере), зависящее от высоты орбиты КА, что, в конечном итоге, позволяет определять реальную топографию морской поверхности;

– степень измерения крутизны переднего фронта принимаемого РЛ-сигнала, зависящая от состояния (шероховатости поверхности на масштабах энергонесущих морских волн) морской поверхности, что, в конечном итоге, позволяет определять значимую высоту морских волн (*Significance Wave Height – SWH*);

– мощность принимаемого РЛ-сигнала, также зависящая от степени «крупномасштабной» шероховатости морской поверхности, что, в конечном итоге, позволяет определять модуль скорости ветра вблизи от морской поверхности.

«Альтиметрическое» определение океанографических параметров морской поверхности, при кажущейся своей простоте, является далеко не тривиальной задачей. Существует ряд факторов, оказывающих заметное влияние на результаты измерений, тем большее, чем более высокие требования предъявляются к их точности. Обычно эти факторы группируются по физической природе возникновения и влияния на результаты измерений. Назовем наиболее существенные из них.

К первой (инструментальной) группе обычно относят:

- шумовые погрешности;
- погрешности калибровок аппаратуры;
- не контролируемые тренды и флуктуации параметров аппаратуры;
- отклонения антенны альтиметра от надира и т.д.

Ко второй (ионосферной) ³ группе относят:

¹ Для создания коротких зондирующих импульсов при этом широко используется технология сжатия их длительности.

² Мы взяли слово «прямоугольный» в кавычки, поскольку передний фронт реальных зондирующих импульсов имеют все же конечную крутизну.

³ Изменение электрофизических параметров ионосферы и тропосферы вызывает поглощение энергии радиоволн, изменение скорости распространения и искривление траекторий распространения радиоволн. При этом проявляется явление дисперсии среды, приводящее к различию параметров атмосферы для составляющих спектра зондирующих импульсов.

- рассеяние радиоволн на свободных электронах;
- изменение в ионосфере электронной плотности (изменение показателя преломления);

К третьей (тропосферной)⁴ группе относят:

- рассеяние радиоволн молекулами воздуха, обусловленное, в первую очередь, молекулами атмосферного кислорода (поправка на «сухую» тропосферу);
- поглощение радиоволн молекулами водяного пара (поправка на «влажную» тропосферу);

К четвертой (геофизической) группе обычно относят:

- влияние на результат дальномерных измерений состояния морской поверхности (степени шероховатости, значимой высоты поверхностных морских волн);

- влияние на результат измерений вариаций локальной топографии поверхности, возникающих вследствие изменения атмосферного давления (эффект обратного барометра), приливов и отливов, а также – вследствие изменения объема водной массы при ее прогреве (охлаждении);

Наконец, к пятой (методической) группе относят:

- неадекватность моделей референц-эллипсоида⁵ реальной фигуре Земли, неадекватность расчетных моделей (модель морской поверхности и т.д.) описываемым ими реальным процессам и т.д.

Существование названных и других факторов, требует, в свою очередь, выполнения ряда методических и технических мероприятий, каких как:

- создание и использование многочастотных бортовых альтиметрических систем;
- оснащение бортовых альтиметрических измерительных систем радиометрическими комплексами;

- создание космической и наземной инфраструктур высокоточного определения параметров орбитального движения КА (включая системы глобального позиционирования);

- разработку и совершенствование геофизических (геоид, референц-эллипсоид), гидрофизических (морская поверхность) и радиофизических (распространение радиоволн в атмосфере Земли, отражение радиоволн от морской поверхности) и т.д.

Спутниковые океанографические альтиметрические комплексы и системы.

Прошлое и настоящее. Поскольку объем публикации ограничен, мы не будем приводить исчерпывающий обзор спутниковых океанографических альтиметрических систем и комплексов, остановившись только на наиболее «знаковых» из них.

Космическая система «SKYLAB» [10]. Идея использования альтиметрических систем для получения океанографической информации впервые была опробована в рамках эксперимента *EREP* (*Earth Resources Experiment Package* – комплексный эксперимент по исследованию природных ресурсов Земли), выполненного с борта орбитальной космической станции (ОКС) «*SkyLab*», запущенной в космос в 1973 г. Одной из составляющих этого эксперимента стал РЛ-эксперимент *S-193*, для выполнения которого на борту ОКС был установлен многофункциональный комплекс – радиометр/скаттерометр и альтиметр, работавшие на общую антенну,

⁴ См. ссылку 3.

⁵ Напомним, высота орбиты КА указывается относительно референц-эллипсоида.

главный лепесток диаграммы направленности которой имел ширину 1.5° по уровню половинной мощности на рабочей частоте альтиметра 13.9 ГГц (длина волны 2.15 см, *Ku*-диапазон ⁶). Длительность зондирующих импульсов радиовысотомера составляла 10, 100 и 130 нс, причем в последнем случае осуществлялась внутримпульсная модуляция фазы 13-разрядным кодом Баркера ⁷. Параметры системы позволяли получать, после статистической обработки сигналов отраженных сигналов, до 8 замеров высоты в 1 с, т.е. пространственное разрешение данных радиовысотомера ОКС «Скайлэб» вдоль трассы полета составляло около 1 км.



Рис. 1. КА «SEASAT». 1 – антенна альтиметра; 2 – кольцо лазерных отражателей

В эксперименте была достигнута относительная точность измерений вариаций топографии (профиля) поверхности океана около 1 м. Это позволило показать принципиальную возможность использования спутниковой альтиметрии для решения океанологических задач. В частности, было показано, что в топографии поверхности Океана проявляются особенности рельефа его дна: над районами глубоководных впадин и желобов поверхность Океана «прогибается», повторяя форму океанского ложа, а над подводными возвышенностями и подводными горами, поднимающимися над дном океана на несколько километров образуются своеобразные «купола».

Космическая система «GEOS-3». КА «GEOS-3» (Geodynamic Experimental Ocean Satellite) [11, 12] запущен на орбиту ИСЗ в 1975 г. Разработан КА специалистами Лаборатории прикладной физики Университета Джона Хопкинса (Applied Physics Laboratory of the Johns Hopkins University – США).

На его борту были установлены ⁸:

- радиолокационный высотомер (альтиметр) с параболической антенной диаметром 66 см;
- доплеровская навигационная радиосистема, работающая на двух частотах (162 и 324 МГц), для точных измерений радиальной скорости спутника;
- уголкового лазерные отражатели (4) для траекторных измерений;
- приемотранслятор для траекторных измерений с использованием в качестве ретранслятора спутника *ATS-6*;

⁶ В терминологии стандарта США «*IEEE Std. 521-2002, IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands*»

⁷ Это позволило апробировать методику сжатия импульса на реальном сигнале. Длительность импульса после его обработки (сжатия) составила 10 нс, что позволяло оценить эффективность «синтезирования» длительности импульса путем сопоставления между собой результатов измерений, получаемых при использовании «физического» и «синтезируемого» импульсов одинаковой длительности.

⁸ Здесь и далее, для экономии места, при описании бортовых комплексов дистанционного зондирования мы будем говорить только о РЛ-альтиметрах и системах, обеспечивающих работу альтиметрических комплексов.

Проектные характеристики альтиметрической системы (см., например, [12]):
– точность определения расстояния от КА до океанской поверхности не хуже 0.2 м;

– точность измерения абсолютной высоты поверхности от центра масс Земли с точностью до 5 м;

– точность измерения относительной высоты (1 – 2) м.

Космическая система «SEASAT». КА «SEASAT» [13] («Sea Satellite, SEAFarring SATellite») – морской спутник, спутник обеспечения мореплавания), созданный в рамках проекта, является первым гражданским КА, предназначенным для мониторинга морских акваторий. Его внешний вид показан на рис. 1.

Одним из элементов бортового РЛ-комплекса дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) КА являлся импульсный РЛ-альтиметр, способный измерять значимую высоту волн в диапазоне от 2 до 20 м с точностью до 10%, а расстояние между морской поверхностью и КА – с точностью до 10 см.

В качестве зондирующего сигнала использовался импульс длительностью 3.2 мкс с линейной частотной модуляцией несущей (девиация – 320 МГц). Длительность импульса после сжатия составляла 3.125 нс.

КА «SEASAT» был запущен на орбиту ИСЗ 26 июня 1978 г. и проработал на ней только до 10 октября 1978 г. Выход из строя обусловлен банальной причиной – коротким замыканием в системе электропитания КА (см., например [14]). Несмотря на столь короткий срок работы на орбите, с помощью КА получен обширный экспериментальный материал в области мониторинга морской акваторий.

Проект «GEOSAT». КА «GEOSAT» [15] разработан специалистами Лаборатории прикладной физики Университета Джонсона на конструктивной основе КА «GEOS-3». КА был запущен в 1985 г. в интересах ВМС США и предназначался для уточнения гравитационных характеристик Земли и формы геоида с целью обеспечения повышенной точности стрельбы баллистических ракет, запускаемых с подводных лодок. Был оснащен РЛ-альтиметром, измеряющим расстояние до поверхности моря с точностью около 10 см (см., например, [16]). Получаемые с его помощью данные первоначально были закрыты, затем в период с 1990 г. по 1995 г. (через 10 лет после запуска!) постепенно рассекречены и стали доступны научным коллективам. Очевидно, что для оперативной океанографии эта информация интереса уже не представляет.

Космическая система «Гео-ИК» [17-23]. Реализация проекта «Гео-ИК» начата в СССР 1985 г. Первоначально проект и одноименная с ним программа, выполняемая Топографической службой Министерства обороны, имели закрытый характер. Как и в случае с КА «GEOSAT», данные альтиметрических измерений были раскрыты и переданы в организации Российской академии наук и в Мировой центр данных только через 7 лет после запуска КА (в 1992 г.). Очевидно, что, как и в предыдущем случае, они уже потеряли свою актуальность для оперативной океанографии.

КА «Гео-ИК», разработан специалистами ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» (см., например [18]).

На борту КА устанавливались: радиовысотомер (альтиметр), доплеровская система навигации, ретранслятор (ответчик) радиотехнической запросной системы, система световой сигнализации и хранения времени, лазерные уголкового отражатели.

КА выводились на квазикруговую орбиту высотой около 1500 км и наклоном 74 или 83 градусов.

Наземный сегмент системы обеспечивал:

- измерение радиальной составляющей скорости движения КА относительно пункта наблюдения с погрешностью от 1 до 3 см/с;
- определение положение КА относительно звезд с погрешностью (1.0 – 1.5) угловые секунды;
- измерение дальности до КА лазерами и радиотехническим дальномерами с погрешностями соответственно (0.5-1.0) м и (1-2) м.

Точность альтиметрических измерений (инструментальная ошибка) для разных КА изменялась от 0.5 до 0.8 м.

В настоящее время ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева» возобновило работу над космическими аппаратами типа «Гео-ИК» (см., например, [18-23]) и в настоящее время создает геодезические космические аппараты нового поколения «Гео-ИК-2». Предполагается, что орбитальная группировка системы «Гео-ИК-2» будет состоять из двух одновременно работающих КА, запускаемых на солнечно-синхронные орбиты со средней высотой ~ 1000 км и наклоном 99,4°. Внешний вид КА показан на рис. 2.

На борту КА устанавливаются: радиовысотомер «Садко-2» (создан фирмой *Thales Alenia Space*), аппаратура доплеровской навигационной системы, оптическая рефлекторная антенна (лазерный отражатель), бортовое синхронизирующее устройство.

Первый КА серии Гео-ИК-2 (Муссон-2, Космос-2470, 14Ф31) был запущен 1 февраля 2011 г. Однако на рабочую орбиту вывести его не удалось, в связи с чем КА не может работать по своему основному назначению, но его принципиально можно использовать для проверки систем управления. Данных о планах запусков последующих КА этого типа нам в доступных источниках найти не удалось.

Космическая система «ERS». В рамках проекта на конструктивной основе КА оптико-электронного наблюдения серии «SPOT» созданы два идентичных по своим характеристикам КА: «ERS-1» и «ERS-2» (см., например, [24, 25]). Первый КА этой серии – «ERS-1», был запущен на орбиту ИСЗ 25 июля 1991 г., второй – «ERS-2», 21.04.1995 г. Орбита обоих КА солнечно-синхронная квазикруговая со средней высотой ~ 780 км и наклоном ~ 98°. Период обращения ~ 100 мин (14.3 витка в сутки), изомаршрутность орбиты: 3 дня («ледовая» орбита, для изучения ледовых полей в приполярных районах) и 35 суток («картографическая» орбита, обеспечивает практически беспрерывную съемку в глобальном масштабе).

КА «ERS-1» проработал на орбите до 10 марта 2000 г., КА «ERS-2» – до июня 2003 г. в штатном режиме. Далее продолжает работать со «сбросом» информации только в режиме непосредственной передачи в связи с выходом из строя бортового запоминающего устройства. В настоящее время КА используется для мониторинга различных регионов Земного шара (с учетом названного ограничения), в том числе для мониторинга региона Японии [26].

В «альтиметрический» сегмент комплекса ДЗЗ КА «ERS» вошли:

- РЛ-альтиметр *RA-1 (Radar Altimeter-1)*, работающий в *Ku*-диапазоне (рабочая частота 13.8 ГГц, длина волны 2.15 см). Длительность зондирующего импульса у *RA-1* составляет 20 мс, девиация частоты – 330 МГц при работе по морской поверхности и

82.5 МГц при работе по поверхности ледовых полей. Разрешение прибора по высоте при односекундном осреднении составляет 10 см в диапазоне значимых высот морских волн до 16 м. Пространственное разрешение прибора изменяется от 16 до 20 км в зависимости от состояния морской поверхности;

– радиометрический комплекс *ATSR/MWR* (*Along Track Scanning Radiometer/Microwave Radiometer* – сканирующий микроволновой радиометр), работающий в диапазонах 28.5 ГГц (длина волны 1.05 см) и 36.5 ГГц (длина волны 0.82 см). Информация, получаемая с его помощью, используется для определения содержания водяного пара в атмосфере и ее интегрального влагосодержания с целью «атмосферной» коррекции дальномерного (траекторного) сигнала РЛ-альтиметра *RA-1*.

– отражатель лазерного излучения *LRR* (*Laser Retro-Reflector*), предназначенный для выполнения траекторных измерений с помощью наземных станций слежения;

– радиотехническая навигационная система *PRARE* (*Precise Range And Range-Rate Equipment* – система точного определения дальности и скорости). В системе используются сигналы, излучаемые на двух частотах: 2.2 и 8.5 ГГц (длины волн, соответственно, 13 и 3.5 см). Как и предшествующая ей система *DORIS*, *PRARE* предназначена⁹ для выполнения измерений параметров траектории КА с учетом «атмосферной» поправки.



Рис. 2. Геодезический КА «Гео-ИК-2».
1 – антенна альтиметра «Садко»

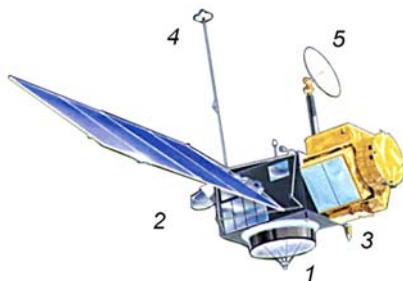


Рис. 3. КА «TOPEX/Poseidon».
1 – антенна альтиметра; 2 – антенна радиометрического комплекса; 3 – антенна радиотехнической навигационной системы *DORIS*; 4 – *GPS*-антенна; 5 – антенна системы передачи информации;

На борту КА «*ERS-2*» радиометрический комплекс *ATSR /MWR* заменен самостоятельными системами *ATSR* и *MWR*.

Космическая система «TOPEX/Poseidon» (*Topography Experiment/Poseidon*). КА «*TOPEX/Poseidon*» [27], внешний вид которого показан на рис. 3, запущен 10 августа 1992 г. квазикруговую орбиту, изомаршрутность которой составляет 9.9 суток (127 витков). В состав его «альтиметрического» комплекса ДЗЗ вошли:

⁹ На борту КА «*ERS-1*» система «*PRARE*» проработала только несколько дней.

– двухчастотный радиоальтиметр, работающий в частотных диапазонах 5.3 ГГц (С-диапазон, длина волны 5.66 см и 13.6 ГГц (Ku-диапазон, длина волны ~ 2.21 см)¹⁰;

– экспериментальный радиоальтиметр *SSALT (Single-Frequency Solid-State Altimeter – одночастотный альтиметр в твердотельном исполнении)*, известный также как «*Poseidon-1*» – этим объясняется вторая составляющая в названии КА. Прибор предназначен для демонстрации возможности создания и практического использования недорогих радиоальтиметров космического базирования.

– доплеровская навигационная система *DORIS (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite)*, излучающая когерентные сигналы на частотах 2036.25 МГц и 401.25 МГц и позволяющая определять радиальную скорость движения КА относительно приемной станции *DORIS* и вводить «атмосферную» поправку в результат измерения;

– радиометрический комплекс *TMR (TOPEX Microwave Radiometer)*. Прибор работал на частотах 18, 21 и 37 ГГц (длины волн 1.67, 1.43 и 0.81 см соответственно) и был предназначен для определения содержания водяного пара в атмосфере и введения «тропосферной» поправки в результат альтиметрических измерений;

– лазерный отражатель *LRA (Laser Reflector Array)*, разработанный в Лаборатории изучения реактивного движения (*JPL – Jet Propulsions Laboratory*). Предназначен для контроля параметров орбиты с помощью сети наземных лазерных станций слежения с точностью, определяемой характеристиками станций.

– экспериментальная (демонстрационная) система определения положения КА в сети *GPS (GPSDR – GPS Demonstration Receiver)*. Рабочие частоты системы: 1227.6 и 1575.4 ГГц (длины волн соответственно ~ 24.5 и ~ 19 см). Ожидаемая ошибка определения высоты полета – менее 10 см¹¹.

С помощью КА «*TOPEX/Poseidon*» удалось отследить изменения уровня Мирового океана, обусловленные температурным сжатием и расширением воды: зимой 1994/1995 г. было выявлено снижение уровня воды до 30 см у берегов Японии и у восточного побережья США, а в некоторых районах Южного полушария – уровень воды увеличивался на такую же величину.

КА «*TOPEX/Poseidon*» проработал на орбите практически 13 лет – работы с ним прекращены 5 января 2006 г. после отказа (остановки) маховика в канале тангажа системы ориентации и стабилизации.

Проект «ГРЕБЕНЬ». В конце 80-х – начале 90-х годов прошлого столетия в СССР усилиями специалистов ОКБ МЭИ (Особое конструкторское бюро Московского энергетического института) и ИРЭ АН СССР (Институт радиотехники и электроники) разрабатывался океанографический радиовысотометр «Гребень», предназначенный для эксплуатации в составе аппаратуры ДЗЗ модуля «Природа» ДОС «Мир»¹² (см., например, [28, 29]). Мы не будем детально останавливаться на этом комплексе, поскольку в доступных источниках нам не удалось найти информации о его работе

¹⁰ Обратим внимание читателя и на то, что на борту этого КА впервые был установлен двухчастотный РЛ-альтиметр, что позволяло вводить «атмосферную» поправку в результат измерения также и по дальномерному сигналу.

¹¹ По результатам реальной работы предпочтение было отдано «радиотехнической» (*DORIS*) и «лазерной» системам слежения.

¹² Модуль «Природа» запущен 23 апреля 1996 г., пристыкован к ДОС «Мир» 26 апреля 1996 г. и вместе с ней сведен с орбиты и затоплен в Тихом океане 23 марта 2001 г.

в космосе в составе модуля «Природа». Более того, радиовысотомер «Гребень» не упоминается как элемент комплекса ДЗЗ модуля «Природа» в ряде посвященных ему (модулю) публикаций – см. например [30, 31].

Космическая система «GFO-1» (*GEOSAT Follow-On*) (см., например [32]) запущен 10 февраля 1998 г. КА был разработан по заданию Командования космических и морских боевых систем ВМФ США для РЛ-измерения топографии Мирового океана в тактических целях. Был первым (отсюда и его название) в серии создаваемых ВМФ США эксплуатационных альтиметрических КА.

Основным средством ДЗЗ, установленным на борту КА, являлся одноканальный (одночастотный) РЛ-высотомер *GFO-RA* (*GFO Radar Altimeter*). СВЧ радиометр *WVR* (*Water Vapor Radiometer* – радиометр [для измерения] водяного пара) работает в частотных диапазонах 22 и 37 ГГц (длины волн 1.36 и 0.81 см, соответственно), используя общую с альтиметром антенну. Предназначен для определения в атмосфере Земли содержания водяного пара и внесения «атмосферной» поправки в результат альтиметрических измерений.

Кроме этого на борту КА также установлены: традиционный для альтиметрических геодезических КА лазерный отражатель *LRA* (*Laser Retroreflector Array*), резервированный комплект приемников *GPS*, обеспечивающих определение радиальной компоненты со среднеквадратическим отклонением не более 10 см, доплеровская радиотехническая навигационная система.

КА снят с эксплуатации 22 октября 2008 г.

Космическая система «Jason». Геодезический радиовысотометрический КА «*Jason-1*» (см., например [33]), внешний вид которого показан на рис. 4, запущен 7 декабря 2001 г. КА предназначен для мониторинга глобальной океанической циркуляции, изучения связей между океаном и атмосферой, улучшения глобальных прогнозов климата и прогнозов, а также мониторинг событий, таких как Эль-Ниньо и океанических вихрей. В эксплуатацию введен в начале 2002 г.

КА «*Jason-1*» создан специалистами Франции и США и оснащен «традиционным» комплексом аппаратуры ДЗЗ, в состав которого включены:

– двухчастотный РЛ-альтиметр «*Poseidon-2*» (см., например, [34]), работающий в частотных диапазонах 5.3 ГГц (*C*-диапазон, длина волны 5.66 см) и 13.575 ГГц (*Ku*-диапазон, длина волны 2.21 см). Альтиметр излучает частотномодулированный зондирующий импульс длительностью 195.6 мкс с девиацией частоты 320 МГц (в *Ku*-диапазоне) и 320 или 100 МГц (в *C*-диапазоне). При максимальной девиации длительность сжатого импульса составляет 3.125 нс (в обоих частотных диапазонах);

– трехчастотный микроволновый радиометр водяного пара *JMR* (*Jason Microwave Radiometer*), работающий в частотных диапазонах 18.7, 23.8 и 34 ГГц (длины волн, соответственно, 1.6, 1.26 и 0.88 см);

– доплеровская система *DORIS*, работающая по двум наземным маякам;

– лазерный отражатель *LRA*;

– *GPS*-приемник *TRSR* (*Turbo Rogue Space Receiver*);

– звездный датчик.

В литературе встречается так же и другое его название «*Jason-1*» – «*TOPEX/Poseidon* следующего поколения» (*TPFO, Topex/Poseidon Follow-On*). КА был выведен

на орбиту, на которой уже находился КА «*TOPEX/Poseidon*». После взаимной калибровки систем, КА «*TOPEX/Poseidon*» был переведен на новую орбиту так, чтобы его трассы располагались в середине между трассами КА «*Jason-1*». Это позволило в два раза повысить частоту съемки поверхности Мирового океана.

Дальнейшим развитием работ в области альтиметрии морской поверхности стал проект «*Jason-2*», известный в *CNES*¹³ и *NASA* также как проект *OSTM* (*Ocean Surface Topography Mission* – проект изучения топографии океана. Основной задачей проекта, как и предшествовавших ему проектов, является высокоточное (с погрешностью около 1 см) измерение реальной топографии морской (океанской) поверхности и изучение, на этой основе, закономерностей и особенностей общей циркуляции океана с целью последующей оценки влияния океанических процессов на изменчивость климата и гидрологических и биогеохимических циклов и т.д.

Запущен КА «*Jason-2*» на орбиту ИСЗ 20 июня 2008 г. При внешней схожести со своим предшественником – КА «*Jason-1*» (см. рис. 4), «*Jason-2*» отличается от него комплексом аппаратуры ДЗЗ, в состав которого вошли:

- твердотельный двухчастотный РЛ-альтиметр «*Poseidon-3*» – *Solid-State Radar Altimeter* (см., например, [35]), работающий в частотных диапазонах 5.3 и 13.575 ГГц (длина волны, соответственно, 5.67 и 2.21 см)¹⁴,

- микроволновый радиометр *AMR* (*Advanced Microwave Radiometer* – усовершенствованный микроволновый радиометр), работающий в частотных диапазонах 18.7; 23.8 и 34 ГГц, (длины волн соответственно 1.6; 1.15 и 0.88 см), обеспечивающий «тропосферную» коррекцию дальномерного сигнала (учитывается как интегральное влагосодержание атмосферы, так и влияние не дождевой облачности и ветрового воздействия на морскую поверхность);

- орбитальная радиотехническая навигационная система *DORIS*, являющаяся, по сути, неотъемлемой частью спутниковых альтиметрических систем;

- лазерный отражатель *LRA* (*Laser Retroreflector Array*), оптимизированный для работы в частотном диапазоне 532 нм (зеленый);

- многоканальный приемник системы *GPS TRSR-2* (*Turbo Rogue Space Receiver-2*), способный отслеживать до 16 *GPS*-спутников одновременно;

Кроме этого, на борту КА «*Jason-2*» установлена вспомогательная аппаратура: комплекс «*Carmen-2*» (*Environment Characterization and Modelisation-2*), предназначенный для определения характеристик потоков частиц высоких энергий с целью внесения «ионосферных» поправок в результаты измерений, выполняемых с помощью навигационной аппаратуры *DORIS*, аппаратура *LPT* (*Light Particle Telescope*), дополняющая измерения, выполняемые с помощью комплекса «*Carmen-2*» и оптическая аппаратура *T2L2* (*Time Transfer by Laser Link*).

Межвитковое расстояние по экватору для КА «*Jason-2*» составляет 315 км.

Одновременное нахождение на орбите двух однотипных КА – «*Jason-1*» и «*Jason-2*», позволило создать *систему* (тандем), обеспечивающую двукратное увеличение частоты съемки поверхности Мирового океана (см., например, [36]). При

¹³ *CNES* – *Centre National d'Etudes Spaciales*, (*Space Agency of France*) – Национальный центр космических исследований, космическое агентство Франции.

¹⁴ По своим техническим и точностным характеристикам «*Poseidon-3*» идентичен своему предшественнику – «*Poseidon-2*».

этом трассы одного из КА были расположены между трассами другого, а сдвиг в обзоре одних и тех же районов Океана первым и вторым КА составлял ~ 5 суток. Кроме этого, в «тандемном» режиме работы отработаны подходы к созданию перспективных альтиметрических систем ДЗЗ.

В ближайшей перспективе, в 2013 г., планируется запустить КА «Jason-3», который предполагается оснастить комплексом ДЗЗ, по составу аналогичным комплексам ДЗЗ предшествовавших КА.

Дальнейшим развитием системы должен стать КА «Jason-CS», запуск которого планируется на 2017 г.

Программа (проект) «ENVISAT». Космический аппарат «ENVISAT» (*Environmental Satellite* – экологический спутник) [37, 38] запущен 1 марта 2002 г. на солнечно-синхронную орбиту со средней высотой ~ 780 км, наклонением $\sim 98,5^\circ$ и периодом обращения ~ 100 мин. Внешний вид КА показан на рис. 5.



Рис. 4. КА «Jason-1». 1 – антенна альтиметра; 2 – антенна радиометра; 3 – антенна системы DORIS; 4 – лазерный отражатель.

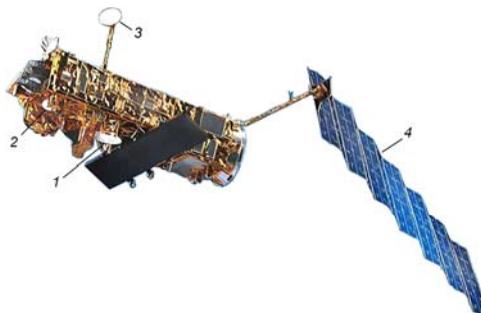


Рис. 5. Экологический КА «ENVISAT». 1 – антенна альтиметра RA-2; 2 – антенна радиометра MWR; 3 – антенна радиоканала передачи информации на КА «Artemis»; 4 – солнечная батарея.

Проект «ENVISAT» стал логическим продолжением предыдущего проекта Европейского космического агентства – «ERS-1/2», что обеспечило непрерывность и преемственность измерений.

Основная часть полезной нагрузки КА – EDI (*ESA Development Instruments*), состоит из семи приборов и разработана специально для программы «ENVISAT». «Альтиметрический» сегмент образован:

- двухчастотным альтиметр RA-2 (*Radar Altimeter 2*), идентичным альтиметру, ранее работавшему на борту КА «Jason-1»;
- микроволновым радиометром MWR (*Microwave Radiometer*), обеспечивающий измерение количества водяного пара в атмосфере и влагосодержания облаков. Он работает в частотных диапазонах 23.8 и 36.5 ГГц (длины волн, соответственно, 1.26 и 0.82 см – K-, и Ku-диапазоны);
- лазерным отражателем LRR (*Laser Retroreflector*);
- уже знакомой нам радиотехнической навигационной системой DORIS, обеспечивающей точное (с точностью до нескольких десятков сантиметров при обработ-

ке информации на борту КА и нескольких сантиметров при обработке данных на Земле) позиционирование КА;

Для повышения оперативности доведения космической информации до потребителей предусмотрено использование геостационарного телекоммуникационного КА-ретранслятора «ARTEMIS» – *Advanced Relay and Technology Mission Satellite*.

Перспективные спутниковые океанографические альтиметрические комплексы и системы. Говоря о развитии спутниковых альтиметрических океанографических космических систем (КС), мы уже упоминали о перспективных КА «*Jason-3*» и «*Jason-CS*». Кратко рассмотрим программы и проекты создания и других перспективных КС и КА.

Программа (проект) «Cryosat». Определенный интерес для оперативной океанографии представляет проект «*Cryosat*», являющийся частью европейской программы «Живая планета» (*Living Planet Program*). Для мониторинга параметров ледового покрова морских акваторий и материков и оценки влияния на них глобального потепления, в рамках проекта создано два КА, получивших, соответственно, названия «*CryoSat-1*» и «*CryoSat-2*» (см., например, [39, 40]).



Рис. 6. КА «CryoSat-2». 1, 2 – антенны альтиметра-интерферометра; 3, 4 – солнечные батареи.

Общее представление о КА дает рис. 6. Интересной особенностью его конструкции является отсутствие движущихся деталей – неподвижны даже панели солнечных батарей, образующие «крышу» своеобразного «домика».

Первая попытка запуска КА «*CryoSat-1*» 8 октября 2005 г. оказалась неудачной – он был потерян из-за аварии ракеты-носителя. Второй, удачный, запуск КА «*CryoSat-2*» состоялся 9 апреля 2010 г. КА вышел на рабочую солнечно-синхронную орбиту со средней высотой ~ 717 км и наклоном ~ 92°. Расчетный срок работы КА составляет – 3,5 года.

Установленный на борту КА комплекс ДЗЗ позволяет оценивать толщину морских и материковых льдов и отслеживать динамику ее изменения с точностью до 1 см в год. При оценивается толщина как относительно «тонких» морских льдов (толщина до ~ 2 м), так и толщина материковых льдов (толщина до ~ 5 км).

Основным измерительным прибором на борту КА является радиолокационный высотометр-интерферометр *SIRAL* (*SAR Interferometer Radar Altimeter*), работающий в частотном диапазоне 13,575 ГГц (длина волны 2,21 см). Антенная система образована (см. рис. 6) двумя параболоидами, формирующими диаграммы направленности с шириной главного лепестка $(1,08 \times 1,2)^\circ$ в направлении вдоль и поперек трассы на уровне половинной мощности. Фазовые центры параболоидов разнесены на 1,2 м.

Кроме интерферометра *SIRAL* на борту КА «*CryoSat-2*» установлены радиотехническая навигационная система *DORIS* и система лазерных отражателей *LRA*.

В настоящее время КА находится в рабочем состоянии и «выдает» весьма интересную информацию о характеристиках полей морских (дрейфующих) и материковых льдов

Таблица

Характеристики РЛ-системы *Altika*

Параметр	Значение
<i>Орбитальные данные</i>	
1. Высота орбиты, км	~ 800
2. Наклонение, градус	98,38
3. Период повторения, мин	100.6
4. Изомаршрутность, сутки	35
5. Время пересечения экватора *, час:мин	6:00
<i>РЛ-альтиметр «Altika»</i>	
1. Рабочая частота, ГГц	35.75 ± 0.25
2. Длительность зондирующего импульса, мкс	110
3. Девиация частоты сигнала, МГц	500
4. Частота повторения, кГц	~ 3.8
<i>Радиометр «Altika»</i>	
1. Рабочие частоты, ГГц	23.8 ± 0.2 и 37.0 ± 0.5
2. Постоянная времени, мс	200
3. Чувствительность, К	лучше 0.4
4. Точность измерения, К	лучше 3

* *LTAN (Local Time on Ascending Node)* – местное время восходящего узла.

Программа «SENTINEL». Космическая система «*Sentinel*» – «Сторож» (см., например, [41-43]) является перспективной космической системой и создается в рамках проекта Европейского космического агентства *GMES (Global Monitoring for Environment and Security)*. Предполагается, что в ее состав войдут пять КА «оптической» и «радиофизической» специализации, основной задачей которых является определение реальной топографии морской поверхности (альтиметрия), температуры и цвета поверхности океана и суши. Запуск «радиолокационного» КА «*Sentinel-1*», ожидается в 2011 г. Запуск второго, «оптического» КА «*Sentinel-2*» предполагается осуществить в 2013 г. Так же на 2013 г. намечен запуск и третьего, «оптико-топографического» КА «*Sentinel-3*».

Мы не будем детально останавливаться на составе комплексов ДЗЗ каждого из КА системы «*Sentinel*», обратим внимание читателя только на то, что в состав «топографического» комплекса КА включены:

– РЛ-высотометр «*SRAL*» (*SAR Radar Altimeter*) представляющий собой двух-частотный прибор (частоты 13.575 и 5.41 ГГц, длины волн, соответственно, 1.92 и 5.55 см), длительность зондирующего импульса 50 мс в обоих частотных диапазонах. Прибор имеет много общего с альтиметрами «*Poseidon-3*» и «*SIRAL*»;

– радиометр *MWR (Microwave Radiometer)*, работающий в частотных диапазонах 23.8 и 36.5 ГГц (и, возможно, 18.7 ГГц) – длины волн, соответственно: 1.26 и 0.82 см (1.6 см), предназначенный для внесения «атмосферных» поправок в результаты альтиметрических измерений;

– лазерный отражатель (рефлектор) *LLR (Laser Retroreflector)*, используемый для траекторных измерений с наземных станций слежения;

– двухдиапазонный приемник-навигатор *GNSS* (*Global Navigation Satellite System* – глобальная спутниковая навигационная система), предназначенный для точного определения параметров орбиты. Предполагается использование сигналов навигационной системы *GPS* и, возможно, сигналов навигационной системы «*Galileo*».

Космическая система «SARAL». КА «SARAL» – *Satellite with ARGOS and AltiKa*, создается (см., например, [44-46]) совместными усилиями *CNES* и *ISRO*¹⁵. КА «SARAL» (является дополнением к КА «*Jason*») и должна заполнить пробел в глобальной системе альтиметрического мониторинга между «*EnviSat*» и «*Sentinel-3*». Предполагается, что одновременная работа КА «*Jason*» и «SARAL» позволит в 4 раза снизить погрешность альтиметрических измерений определения высоты морской поверхности (*SSH* – *sea-surface height*).

На борту КА будут устанавливаться: РЛ-альтиметр *AltiKa*, работающий в *Ka*-диапазоне – отсюда, по-видимому, происходит название альтиметра; двухчастотный СВЧ-радиометр; лазерный рефлектор *LRA*; радиотехническая навигационная система *DORIS* и система сбора и передачи информации со стационарных и дрейфующих платформ *ARGOS-3* (*Advanced Research and Global Observation Satellite*). Запуск КА ожидается в 2011-2012 гг.

РЛ-альтиметр *AltiKa* работает в частотном диапазоне 35.75 ГГц (длина волны ~ 0.84 см). По мнению разработчиков, это обеспечивает:

– малую величину затухания сигнала при прохождении через ионосферу, кроме ситуаций ионосферных возмущений, в которых необходимые поправки могут быть внесены по данным, получаемой с помощью системы *DORIS* (это исключает необходимость использования многочастотного альтиметра, упрощает аппаратуру и в целом улучшает ее тактико-технические характеристики);

– меньший, чем в *Ku*-диапазоне, интервал корреляции РЛ-сигнала позволяет увеличить частоту повторения зондирующих импульсов до 4 кГц, что обеспечивает возможность значительного увеличения числа независимых отсчетов РЛ-сигнала и, таким образом, повысить точность альтиметрических измерений;

– большая девиация несущей частоты зондирующего сигнала (~ 500 МГц) позволяет повысить пространственное разрешение по дальности до ~ 30 см;

– при использовании *Ka*-диапазона достигается более точное, чем при использовании *Ku*-диапазона, РЛ-описание деталей структуры морской поверхности, поскольку становятся заметными мелкие «фацетты». Это позволяет осуществлять более точное измерение коэффициента обратного рассеяния, как при спокойной, так и при умеренно взволнованной морской поверхности, что приводит к снижению шум-фактора по сравнению, например, с альтиметрами типа «*Poseidon*»;– меньшая глубина проникновения сигнала *Ka*-диапазона в сравнении с *Ku*-диапазоном (для снежного покрова менее одного сантиметра в *Ka*-диапазоне по сравнению с пятью метрами в *Ku*-диапазоне) позволит повысить точность альтиметрических измерений при мониторинге морских и континентальных льдов.

– наконец, в *Ka*-диапазоне в сравнении *Ku*-диапазоном улучшаются характеристики антенных систем (при тех же размерах);

Двухчастотный радиометр *AltiKa* (рабочие частоты 23.8 и 37 ГГц, длины волн 1.26 и 0.8 см) используется для внесения в результат альтиметрических измерений корректирующих поправок, компенсирующих влияние «влажной»

¹⁵ *ISRO* – *Indian Space Research Organisation*, индийская организация по космическим исследованиям, космическое агентство Индии.

тропосферы: содержание паров воды (длинноволновый канал) и воды в облаках в жидкой фазе (высокочастотный канал). Калибруется радиометр по сигналам «холодного» космоса и «теплой» (согласованной) нагрузки. Некоторым недостатком КС можно считать невозможность одновременной работы альтиметра и радиометра, поскольку они используют одну и ту же антенну и работают на близких частотах.

Некоторые характеристики РЛ-системы *AltiKa* приведены в таблице.

Проект SWOT^{16, 17}. Проект разрабатывается совместно специалистами США и Франции (см., например, [47, 48]).

Основное внимание к проекту привлекает система двух интерферометрических РЛС «*KaRin*»¹⁸, работающих в миллиметровом диапазоне радиоволн (длина волны 0.86 см) и обеспечивающих обзор подстилающей поверхности на вертикальной и горизонтальной поляризациях в двух полосах, симметрично расположенных относительно трассы полета КА.

Альтиметрические измерения предполагается выполнять с помощью двухчастотного альтиметра, заимствованного из состава бортового информационно-измерительного комплекса (БИИК) КА «*Jason-2*». Одновременно с этим на борту КА предполагается установить также и трехчастотный радиометр *AMR*, также заимствованный из состава БИИК КА «*Jason-2*».

Общее представление о КА дает рис. 7.

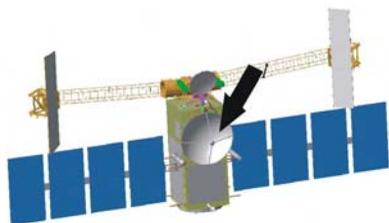


Рис. 7. КА проекта *SWOT*.
1 – антенна альтиметра;



Рис. 8. КА серии *HU-2*.
1 – антенна альтиметра;

Ввод КС в эксплуатацию ожидается в 2016 г.

*Проект HU*¹⁹ [49]. Проект, как следует из его названия, ориентирован на мониторинг морской (океанской) поверхности. Первый из КА серии «*HU-2*» – «*HU-2A*», разработанный специалистами Китайского института космических технологий, успешно запущен в августе текущего, 2011 г. Потребителем информации является Государственное океанологическое управление КНР. Общее представление о КА дает рис. 8 [50].

КА находится на солнечно-синхронной орбите со средней высотой ~ 970 км, наклоном 99.3° и периодом обращения 104.45 минуты. КА на восходящем витке пересекает экватор в 6:00 часов по местному времени. Изомаршрутность орбиты

¹⁶ *SWOT* – *Surface Water and Ocean Topography*.

¹⁷ Детальное рассмотрение возможностей КС выходит за рамки нашей публикации.

¹⁸ *KaRin (Ka-band Radar Interferometer)* – радиолокационный интерферометр *Ka*-диапазона.

¹⁹ *HaiYang* (Хайян) – на китайском языке означает «океан».

составляет 14 или 168 суток. На борту КА установлен двухчастотный РЛ-альтиметр²⁰, работающий в *Ku*- и *S*-диапазонах (рабочие частоты и длины волн, соответственно: 13.58 и 5.25 ГГц, 2.2 и 5.7 см. Альтиметр излучает частотномодулированный зондирующий сигнал длительностью 102.4 мкс с девиацией несущей частоты 320, 80 и 20 МГц в высокочастотном диапазоне и 160 МГц в длинноволновом. Максимальный коэффициент сжатия – 33000 (длительность сжатого импульса ~ 3.1 нс). В качестве обеспечивающей аппаратуры используются система *DORIS* и лазерный отражатель *LRA (Laser Ranging Assembly)*.

Параметры системы обеспечивают измерение значимой высоты волн в диапазоне от 0.5 до 20 м с ошибкой не более 10% (или 0.5 м).

Запуск остальных КА этой серии (*HY-2B*, *HY-2C* и *HY-2D*) предполагается осуществить, соответственно в 2012, 2015 и 2019 гг.

Заключение. В настоящее время спутниковые РЛ-альтиметрические комплексы стали неотъемлемой частью систем мониторинга морских (океанских) акваторий [4, 51]. За годы, прошедшие с момента запуска в космос первой РЛ-альтиметрической системы, определена оптимальная, с точки зрения обеспечения точности измерений, конфигурация как самих альтиметрических систем, так и бортовых и наземных обеспечивающих комплексов. Разработаны методики океанографической интерпретации данных альтиметрических измерений, существенно повышена точность определения параметров морской поверхности и приводного слоя атмосферы, таких как значимая высота поверхностных морских волн (*SWH*), скорость ветра над морской поверхностью, отклонение уровня моря от невозмущенного состояния (*SSH*).

Повышение требований к точности измерений стимулирует дальнейшее развитие как самих альтиметрических систем, так и методик обработки, интерпретации и усвоения результатов выполняемых с их помощью измерений (см., например, [52-54]).

Говоря о перспективах развития спутниковых «океанографических» альтиметрических систем, нельзя не отметить стремление специалистов Российской Федерации войти в космический «альтиметрический клуб» – возобновить работы над созданием системы геодезических альтиметрических КА «ГеоИк», предназначенных, в том числе, и для мониторинга морских акваторий.

Литература

1. Запелалов А.С., Показеев К.В., Пустовойтенко В.В. Обнаружение нефтяных загрязнений средствами космического базирования. Проблемы и пути их решения // Физические проблемы экологии (Экологическая физика) / под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова и К.В. Показеева. – М.: МАКС Пресс, 2010. – № 16. – С. 151-167.
2. Запелалов А.С., Показеев К.В., Пустовойтенко В.В. Отечественные космические радиолокационные системы мониторинга морских акваторий. Радиолокационные станции бокового обзора // Физические проблемы экологии (Экологическая физика) / под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова и К.В. Показеева. – М.: МАКС Пресс, 2011. – № 17. – С. 318-322.
3. Демьшев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинных течений океана с неровным дном на сетке *C* // Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: ИВМ РАН. – 1992. – С. 163-231.

²⁰ Создан китайскими специалистами.

4. Коротаев Г.К., Еремеев В.Н. / Введение в оперативную океанографию Черного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 382 с.
5. Korotaev G.K., Saenko O.A., Koblinsky C.J. Satellite altimetry observations of the Black Sea level // J. Geophys. Res. – 2001. – Vol. 106, № C1. – P. 917-933.
6. Гордиенко В.А., Старкова М.В. Мировоззренческие и философские аспекты базового курса экологии для «неэкологов» // Физические проблемы экологии (Экологическая физика) / Сб. научных трудов под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова и К.В. Показеева. – М.: МАКС Пресс, 2010. – вып. 16. – С. 98-111.
7. Практическая экология морских регионов. Черное море / Под ред. В.П. Кеонджяна, А.М. Кудина, Ю.В. Терехина. – Киев: Наук. думка, 1990. – 252 с.
8. Экология Черного моря. Сайт «Экология Черного моря» [Электронный ресурс]. http://www.lacuevalimon.com/2011/01/fiz_geo/ (Проверено 22.08.2011).
9. Коротаев Г.К., Малиновский В.В., Мотыжев С.В., Пустовойтенко В.В., Радайкина Л.Н., Станичный С.В., Суетин В.С., Суслин В.В. Компоненты спутникового мониторинга Черного моря (Вклад Украины в Black Sea GOOS). – Севастополь, 2001. – 116 с. (Препринт/НАН Украины. МГИ).
10. Бэлью Л., Стулингер Э. / Орбитальная станция «Скайлэб». (Сокр. пер. с англ. под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук Г.Л. Гродзовского). – М., «Машиностроение», 1977. – 232 с.
11. GEOS (Geodetic Earth Orbiting Satellite), NASA - GEOS Program. Сайт «Sharing Earth Observation Research – eoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_GEOSGeodeticEarthOrbitingSatelliteNASAGEOSProgram.html (Проверено 25.02.2011).
12. Ежегодник БСЭ. 1976 г. [Электронный ресурс]. <http://www.epizodsspace.narod.ru/bibl/ejeg/1976/76.html> (Проверено 15.02.2011)
13. SEASAT. Сайт «Sharing Earth Observation Research – eoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_SEASAT.html (Проверено 15.02.2011).
14. Ежегодник БСЭ. 1979 г. [Электронный ресурс]. <http://www.epizodsspace.narod.ru/bibl/ejeg/1979/79.html> (Проверено 15.02.2011).
15. GEOSAT (Geodetic/Geophysical Satellite). Сайт «Sharing Earth Observation Research – eoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_GEOSATGeodeticGeophysicalSatellite.html (Проверено 15.02.2011).
16. Ежегодник БСЭ. 1985 г. [Электронный ресурс]. <http://www.epizodsspace.narod.ru/bibl/ejeg/1985/85.html> (Проверено 25.03.2011).
17. Российские геодезические спутники ГЕОИК. [Электронный ресурс]. <http://www.wdcb.ru/ALTIM/Russian/GEOIK.htm> (Проверено 25.03.2011).
18. Космические аппараты. Сайт ОАО «Информационные спутниковые системы им. академика М.Ф. Решетнева». [Электронный ресурс]. <http://www.nporp.ru/?cid=ca> (Проверено 25.01.2011).
19. Лебедев С.А. Основы спутниковой альтиметрии. Сайт Института космических исследований РАН. [Электронный ресурс]. http://d33.infospace.ru/d33_conf/lebedev_osn.pdf (Проверено 25.03.2011).
20. Спутниковая система «ГЕО-ИК-2». Сайт ОАО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнева. [Электронный ресурс]. <http://www.iss-reshetnev.ru/?cid=prj-geo-ik2> (Проверено 26.03.2011).
21. Geo-IK-2 (Musson-2, 17F43) satellite. Сайт «RussianSpaceWeb.com» [Электронный ресурс]. http://www.russianspaceweb.com/geo_ik2.html (Проверено 15.01.2011).

22. Geo-ИК-2. Сайт «RussianSpaceWeb.com. News&History of Astronautics in the Former USSR by Anatoly Zak». [Электронный ресурс]. http://www.russian-spaceweb.com/geo_ik2.html (Проверено 25.02.2011).
23. GEO-ИК-2 (Mousson-2, Cosmos-2470) atop Rocket/Briz-KM on February 1st, 2011. Сайт «Orbiter Forum. Orbiter&Space Flight Discussion Boards». [Электронный ресурс]. <http://orbiter-forum.com/showthread.php?t=20365> (Проверено 11.04.2011).
24. ERS-1 (European Remote-Sensing Satellite-1). Сайт «Sharing Earth Observation Reseach – eoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_ERS1EUROPEANREMOTESENSINGSATELLITE1.html (Проверено 25.01.2011).
25. ERS-2 (European Remote-Sensing Satellite-2). Сайт «Sharing Earth Observation Reseach – eoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_ERS2EuropeanRemoteSensingSatellite2.html (Проверено 25.01.2011).
26. Спутник ESA «увидел» смещение Японии на 2,5 метра из-за землетрясения. Сайт агентства РИА «Новости». [Электронный ресурс]. http://www.rian.ru/jpq/uae_news/20110330/359386635.html (Проверено 12.04.2011).
27. TOPEX/Poseidon (Topography Experiment/Poseidon). Сайт «Sharing Earth Observation Reseach – eoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_TOPEXPoseidonTopographyExperimentPoseidon.html (Проверено 25.01.2011).
28. Баскаков А.И., Егоров В.В. Перспективный высокоточный спутниковый альтиметр [Электронный ресурс]. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_pdf/1/29.pdf (Проверено 12.04.2011).
29. Priroda. Сайт «Encyclopedia Astronautica» [Электронный ресурс]. <http://www.astronautix.com/craft/priroda.htm> (Проверено 12.04.2011).
30. Модуль «Природа». Сайт «Космический мир». [Электронный ресурс]. <http://www.cosmoworld.ru/mirstation/mir/77KSE.shtml> (Проверено 12.04.2011).
31. Лантратов К. Россия. Модуль «Природа» // Новости космонавтики. – 1996. – Том 6, № 9/124. – С. 16-26.
32. GFO (GEOSAT Follow-On) Satellite. Сайт «Sharing Earth Observation Reseach – eoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_GFOGEOSATFollowOnSatellite.html (Проверено 25.01.2011).
33. Jason-1 Altimetry Mission. Сайт «Sharing Earth Observation Reseach – eoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_Jason1AltimetryMission.html (Проверено 25.03.2011).
34. Poseidon-2. Сайт «CEOS EO Handbook: Instrument SummarySTRUMENT SUMMARY – POSEIDON-2 (SSALT-2)». [Электронный ресурс]. <http://database.eohandbook.com/database/instrumentsummary.aspx?instrumentID=182> (Проверено 15.03.2011).
35. Poseidon-3 Сайт «CEOS EO Handbook: Instrument SummarySTRUMENT SUMMARY – POSEIDON-3» [Электронный ресурс]. <http://database.eohandbook.com/database/instrumentsummary.aspx?instrumentID=829> (Проверено 15.03.2011).
36. First results for the new Jason tandem. Сайт «AVISO». [Электронный ресурс]. http://www.aviso.oceanobs.com/en/news-storage/news-detail/index.html?tx_ttnews%5Btt_news%5D=458&tx_ttnews%5BbackPid%5D=285&cHash=kgoqlpqvvhb (Проверено 15.03.2011).
37. ENVISAT (Environmental Satellite). Сайт «Sharing Earth Observation Reseach – eoPortal». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_ENVISATEnvironmentalSatellite.html (Проверено 18.04.2011).

38. Лантратов К. На орбите – европейский суперспутник. К запуску КА Envisat-1 // Новости космонавтики. – 2002, № 5. [Электронный ресурс]. <http://www.novosti-kosmonavtiki.ru/content/numbers/232/23.shtml> (Проверено 17.03.2011).
39. CryoSat-2 (Earth Explorer Opportunity Mission-2). Сайт «eOportal – Sharing Earth Observation Resources». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_CryoSat2EarthExplorerOpportunityMission2.html (Проверено 14.03.2011).
40. The instruments. Сайт Европейского космического агентства «ESA. Gryosat». [Электронный ресурс]. http://www.esa.int/SPECIALS/Cryosat/SEMQRQ4908BE_0.html (Проверено 14.03.2011).
41. GMES: Sentinel-1 Mission. Сайт «eOportal – Sharing Earth Observation Resources». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_GMESSentinel1Mission.html (Проверено 14.04.2011).
42. GMES: Sentinel-2 Mission. Сайт «eOportal – Sharing Earth Observation Resources». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_GMESSentinel2Mission.html (Проверено 14.04.2011).
43. GMES: Sentinel-3 Mission. Сайт «eOportal – Sharing Earth Observation Resources». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_GMESSentinel3Mission.html (Проверено 14.04.2011).
44. Satellite SARAL. Сайт «The International Laser Raing Service» [Электронный ресурс]. http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/list_of_satellites/sara_general.html (Проверено 14.09.2011).
45. ALtiKa, a Ka-band altimeter. Сайт «AVISO». [Электронный ресурс]. <http://www.aviso.oceanobs.com/en/missions/future-missions/saral/instruments/altika-a-ka-band-altimeter/index.html> (Проверено 10.09.2011).
46. SARAL (Satellite with ARGos and ALtiKa) Сайт «eOportal – Sharing Earth Observation Resources». [Электронный ресурс]. http://www.eoportal.org/directory/pres_SARALSatellitewithARGosandALtiKa.html (Проверено 05.10.2011).
47. Surface Water and Ocean Topography (SWOT). Science Requirements Document. [Электронный ресурс]. <http://swot.jpl.nasa.gov/mission/> (Проверено 25.09.2011).
48. Сайт «NASA_Jet Propulsion Laboratory». [Электронный ресурс]. <http://swot.jpl.nasa.gov/science/technology/> (Проверено 10.09.2011).
49. HY-2A (Haiyang-2A) / Ocean-2A. Сайт «eOportal – Sharing Earth Observation Resources». [Электронный ресурс]. <http://events.eoportal.org/presentations/8985/10003620.html> (Проверено 27.09.2011).
50. HY 2A, 2B, 2C, 2D. Сайт «Gunter's Space Page» [Электронный ресурс]. http://space.skyrocket.de/doc_sdat/hy-2.htm (Проверено 27.09.2011).
51. Смирнов Г.В., Еремеев В.Н., Агеев М.Д., Коротаев Г.К., Ястребов В.С., Мотыжев С.В. Океанология. Средства и методы океанологических исследований. – М.: Наука, 2005. – 795 с.
52. Алексанина М.Г., Алексанин А.И. Проблемы восстановления динамической топографии моря по спутниковой альтиметрии и полям термических структур // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Выпуск 5. Том II. – М.: ООО «Азбука-2000». – 2008. – С. 11-16.

53. Кубряков А.А., Станичный С.В. Восстановление средней динамической топографии Черного моря для альтиметрических измерений // Исследование Земли из космоса. – 2011, № 4. – С 1-7.
54. Запавалов А.С., Показеев К.В. Моделирование плотности вероятностей возвышений взволнованной морской поверхности при анализе данных альтиметрического зондирования // Физические проблемы экологии (Экологическая физика) / под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова и К.В. Показеева. – М.: МАКС Пресс, 2011. – № 17. – С. 151-167.

Работа выполнена при частичной поддержке УНТЦ – проект Р-400

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЯЧЕЙСТЫХ СТРУКТУР, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЗАМОДЕЙСТВИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН И ТУРБУЛЕНТНОСТИ

А. Д. Розенберг, К. В. Показеев, А. В. Кистович

*Emitech, Inc., Fall River, P/O 02720, MA USA,
МГУ имени М.В. Ломоносова, 119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы,
ФГУП “ВНИИФТРИ”, 141570, Менделеево, Московская область*

1. ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие поверхностных волн и турбулентности – одна из малоизученных областей гидродинамики. На качественном уровне изучения данной проблемы ясно, что если характерный размер турбулентной области существенно больше длины волны, изменения дисперсионных свойств поверхностных волн накапливаются в процессе распространения. Это приводит к эффективному отражению поверхностных волн от зон турбулентности. При обратном соотношении масштабов основное влияние турбулентности сводится, в основном, к рассеянию волны на случайных неоднородностях. При сопоставимых характерных размерах наличие турбулентности приводит к проявлению обоих упомянутых эффектов.

Подробный анализ рассеивания длинных гравитационных поверхностных волн на турбулентности представлен в [1]. В то же время, существует необходимость в исследовании коротковолнового поверхностного волнения, изучения его свойств (например, в задачах СВЧ дистанционного зондирования).

Использование струнных волнографов [2 – 4] при измерении характеристик ряби не позволяет судить о рассеивающих свойствах турбулентности. Развитие оптических методов изучения тонкой структуры поверхностного волнения, в том числе и с использованием лазерных измерителей углов наклона волн, открывает новые возможности в изучении взаимодействия турбулентности и ряби. При этом рассеяние волны оценивается по изменению компонент углов наклонов волны вдоль (X) и поперёк (Y) лотка.

Пространственно-временные характеристики крутых нелинейных волн, подверженных влиянию турбулентности, измерялись в лабораторном лотке посредством лазерного измерителя углов наклона волн [5, 6]. Было показано, что

приповерхностная турбулентность изменяет направление распространения и уменьшает фазовую скорость коротких периодических волн. Для более слабой турбулентности ($Re < 1000$), сокращение фазовой скорости крутых коротких волн вызывает резкое увеличение крутизны волн ("каталитический эффект"). Дальнейшее увеличение интенсивности турбулентности способно существенно изменить пространственную структуру волнового поля, создавая характерные гексагональные ячейки, наблюдавшиеся в [7]. Данная работа посвящена экспериментальному изучению ячеистых структур, возникающих при взаимодействии коротких волн и турбулентности.

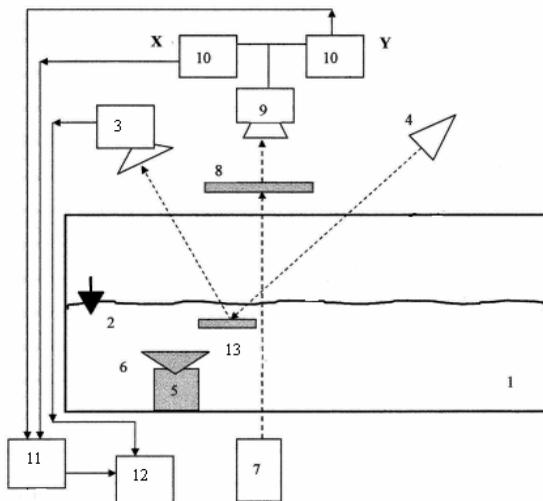


Рис. 2а.

Схема экспериментов представлена на рис. 1, где числами обозначены: 1 – лоток; 2 – волнопродуктор; 3 – видеокамера; 4 – источник света; 5 – насос; 6 – источник турбулентности; 7 – лазерный диод; 8 – экран; 9 – датчики отклонения луча; 10 – усилители; 11 – аналого-кодированный преобразователь; 12 – компьютер; 13 – подводный экран.

2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты по измерению углов наклона поверхностных волн проводились в стеклянном лотке Emitech Inc. высотой и шириной 0.5 м, длиной 1.8 м, заполненным на 0.3 м пресной водой. Для подавления отражения стенки лотка покрыты поглощающим материалом. Волнопродуктор поршневого типа создавал короткие периодические поверхностные волны в диапазоне частот $F = 4 \dots 50$ Гц, длинами волн $\lambda = 1 \dots 10$ см и крутизной $ak = 0.005 \dots 0.2$ (a – амплитуда, k – волновое число).

Лазерный измеритель углов наклона волн [8] состоит из 617 нм лазерного диода LPM02 мощностью 3 мВт, помещенного под прозрачным дном лотка и освещающего диффузный экран, расположенный выше водной поверхности. Система фотодиодов SC-50 фиксирует вызванное изменением профиля поверхности отклонение луча лазера от центра экрана и формирует два аналоговых сигнала, пропорциональные ортогональным компонентам поверхностных наклонов волны вдоль (X) и поперек (Y) лотка соответственно. После предварительного усиления в усилителях 301-DIV сигналы поступают в аналого-кодовый преобразователь с частотой квантования 500 Гц, а далее в компьютер для формирования временных рядов углов наклона волн вдоль и поперек лотка.

Система отображений углов наклона водной поверхности состоит из 250 Вт галогеновой лампы, освещающей водную поверхность под скользящими углами, подводного экрана и видеокамеры «КОБРА», создающей цветные изображения углов наклона волн с частотой кадров 30 Гц.

Турбулентная область создаётся устройством, состоящим из двух параллельных пластмассовых труб диаметром 2.5 см и длиной 20 см, присоединённых к подводному насосу. Каждая труба имеет пять отверстий (инжекторов) диаметром 1 мм, сквозь которые параллельно водной поверхности инжектируются струи. Во избежание формирования среднего потока, струи одной трубы противоположно направлены струям другой. Устройство размещается на 5 – 10 см ниже водной поверхности; интенсивность турбулентности регулируется изменением давления в насосе. Калибровка турбулентности производится с помощью измерения скорости взвешенных в воде частиц (PIV).

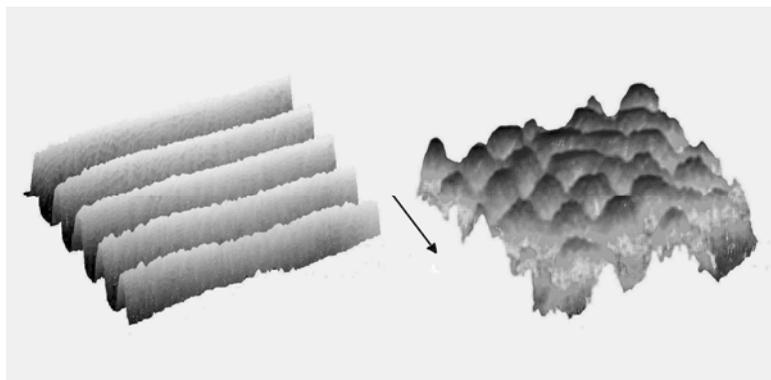


Рис. 2а.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Как уже говорилось ранее, турбулентность изменяет пространственную структуру поверхности, вызывая рассеяние поверхностных волн и изменение их фазовой скорости. Проведённые эксперименты показывают, что наличие в приповерхностном слое области турбулентности со средне-квадратичным значением скорости частиц $\sigma_u \geq 2$ см/сек существенно влияет на распространение коротких

поверхностных волн, что, в свою очередь, приводит к возникновению регулярных ячейчатых структур.

На рис. 2а представлены трехмерные изображения поверхностных волн частотой 7 Гц ($ak = 0.03$) при отсутствии (слева) и при наличии (справа) приповерхностной турбулентности; стрелка указывает направление распространения волн. Типичная ячейка периодически повторяется в двух горизонтальных направлениях. Как показывают видеозаписи, ячейки распространяются вдоль лотка с небольшими изменениями формы.

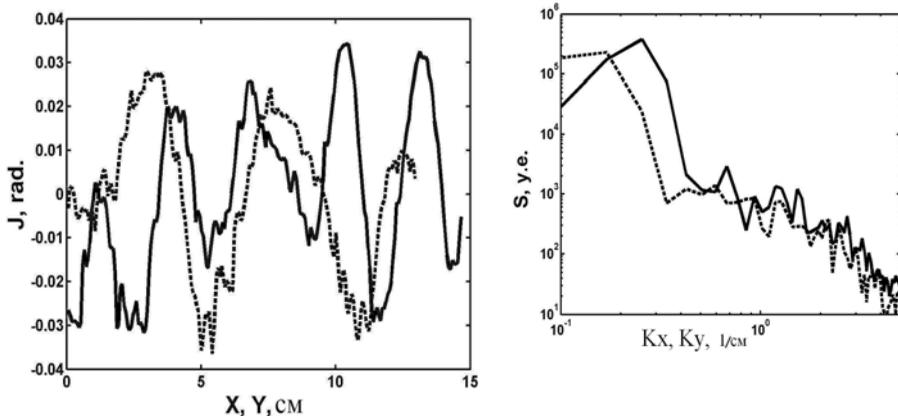


Рис. 2б.

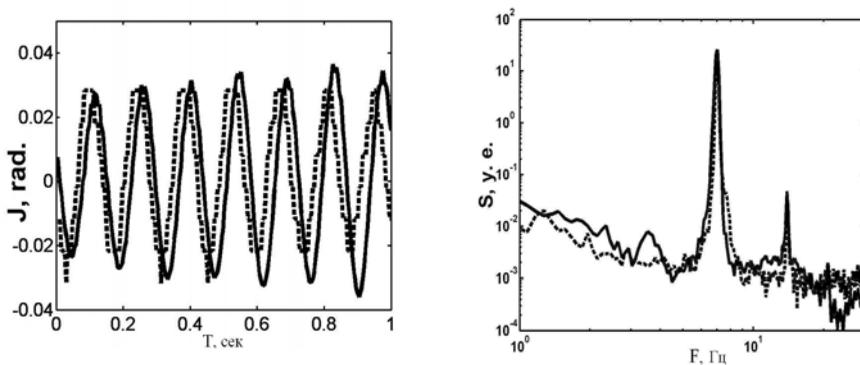


Рис. 2в.

Пространственные параметры ячеек для описанных волн приведены на рис. 2б. Слева представлены профили наклонов (J , рад) волны, полученные как поперечные сечения трехмерных изображений. Справа в условных единицах приведены их спектры $S(k)$ вдоль (X – сплошные линии) и поперек (Y – пунктирные линии) лотка. Как профили, так и спектры показывают, что размеры ячеек вдоль и

поперек лотка различны: масштаб ячейки вдоль лотка равен длине волны $l_x = \lambda$, в то время как масштаб ячейки поперек лотка в полтора раза больше: $l_y = 1.5l_x$.

На рис. 2в представлены временные параметры волн. Слева – записи лазерного измерителя углов наклонов. Справа – их спектры $S(F)$ вдоль (сплошные линии) и поперек (пунктир) лотка.

Многочисленные эксперименты и анализ видеозаписей, проведённые для волн в частотном диапазоне $F = 5 \dots 15$ Гц и крутизны $ak = 0.005 \dots 0.2$ при $\sigma_u \geq 2$ см/сек, выявили стабильное возникновение регулярных ячеистых структур.

Необходимо особо подчеркнуть важный экспериментальный факт: характеристики формирующихся структур не зависят от крутизны волны во всём экспериментальном диапазоне изменения крутизны $ak = 0.005 \dots 0.2$.

3. МОДЕЛЬ ЯВЛЕНИЯ

Предлагаемая модель наблюдаемого явления опирается на анализ экспериментальных результатов. Как следует из данных, приведённых на рис. 2б, 2в, пространственные и временные спектры углов наклонов волновых структур подобны друг другу, локализованы в пространстве частот и волновых чисел, не имеют существенных комбинационных гармоник (графики даны в логарифмическом масштабе). Это указывает на отсутствие эффективного нелинейного взаимодействия между поверхностными волнами и областью турбулентности. Подтверждением квазилинейности (или слабой нелинейности) наблюдаемого явления также служит независимость характеристик возникающих структур от крутизны волн.

В связи с этим представляется возможным следующий механизм взаимодействия поверхностной волны с турбулентностью. В турбулентной области существуют локализованные разнонаправленные приповерхностные течения, попадая на которые поверхностная волна испытывает на себе эффект блокировки (или разгона – это зависит от взаимной направленности течения и волны). При отсутствии эффективного нелинейного взаимодействия явление блокировки на локализованном течении, размеры которого сравнимы с длиной волны, проявляет себя подобно рассеянию на локальной неоднородности. Дальнейшая интерференция рассеянных волн порождает картину взволнованной поверхности.

В основу расчётной модели, привлекаемой для получения приближённых картин возмущений поверхности, положен принцип линейной суперпозиции поверхностных волн. Использование этого принципа оправдывается экспериментальными значениями характерной крутизны волн.

4. ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

Предложенная модель была подвергнута предварительному тестированию в различных физических ситуациях, позволяющих проводить непосредственное сравнение с экспериментом. На всех приводимых ниже экспериментальных ячеистых структурах белым цветом отображаются гребни, черным – впадины; волны движутся сверху вниз. Реальные размеры структур – 12 см × 12 см.

Сначала был исследован случай взаимодействия двух квазиплоских волн, которые генерировались волнопродуктором с плунжером, состоящим из двух по-

ловин. Угол θ между этими половинами менялся в пределах от 30° до 180° . Было проведено более 100 экспериментов при изменении частот от 5 до 15 Гц, для крутиз волн от 0.005 до 0.2 и углов $\theta = 90^\circ, 100^\circ, 120^\circ$ и 140° . На рис. 3а представлены интерференционные картины для случая $\theta = 120^\circ$: $F = 6.0$ Гц, $ak = 0.05$ (слева); $F = 10.0$ Гц, $ak = 0.01$ (справа).

Модель линейной интерференции таких волн описывает возмущение свободной поверхности ζ выражением

$$\zeta = A_1 \cos(\mathbf{k}_1 \mathbf{r} - \omega t) + A_2 \cos(\mathbf{k}_2 \mathbf{r} - \omega t), \quad \mathbf{r} = \mathbf{e}_x x + \mathbf{e}_y y \quad (1)$$

Здесь A_1, A_2 – амплитуды волн (при численных расчётах они выбирались равными); \mathbf{k}_1 и \mathbf{k}_2 – волновые векторы интерферирующих волн, определяемые соотношениями

$$\mathbf{k}_1 = k(\mathbf{e}_x \sin \theta/2 + \mathbf{e}_y \cos \theta/2), \quad \mathbf{k}_2 = k(\mathbf{e}_x \sin \theta/2 - \mathbf{e}_y \cos \theta/2) \quad (2)$$

где k – волновое число, то есть решение дисперсионного соотношения

$$\omega^2 = gk + \alpha k^3 / \rho \quad (3)$$

Интерференционные картины, рассчитанные по формуле (1) для различных углов θ , представлены на рис. 3б.

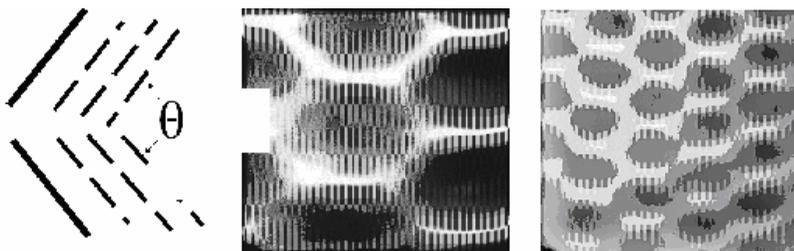


Рис. 3а.

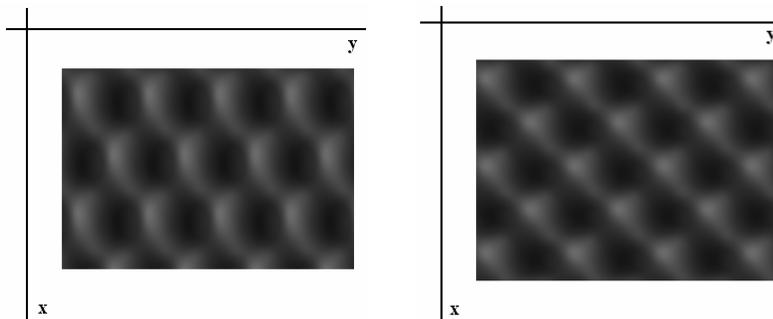


Рис. 3б.

Видно, что наблюдаются как гексагональные (слева, $\theta = 60^\circ$), так и квадратные ячейки (справа, $\theta = 90^\circ$). При иных углах между волнами ячейки приобретают неправильную форму. Например, при $\theta = 135^\circ$ наблюдаются гексагональные ячейки, вытянутые вдоль направления y .

Для исследования взаимодействия цилиндрических волн использовались два точечных поршневых волнопродуктора с промежутком между ними в 10 см. Волны генерировались в диапазоне частот от 5 до 12 Гц и крутизн от 0.005 до 0.1. В проведённых 20 экспериментах наблюдались квадратные или гексагональные ячейки с $l_x = \lambda$ и $l_y = (1..1.5) l_x$. Результаты одного из экспериментов показаны на рис. 3 в: $F = 6.3$ Гц, $ak = 0.1$ (слева); $F = 9.0$ Гц, $ak = 0.008$ (справа).

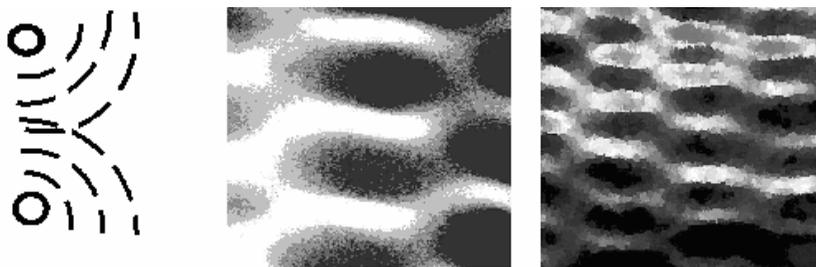


Рис. 3в.

Аналогичные результаты получаются и для расчётной картины интерференции от точечных источников, каждый из которых порождает возмущение поверхности вида

$$\zeta = AH_0^{(1)}(kr)\exp(-i\omega t) \quad (4)$$

где $H_0^{(1)}(x)$ – функция Ханкеля первого рода нулевого порядка; r – расстояние от источника.

Результаты расчетов интерференции представлены на рис. 3г для двух (слева) и трех источников (справа), расположенных равноудаленно на одной линии на расстоянии d , таком что $kd = 30\pi$.

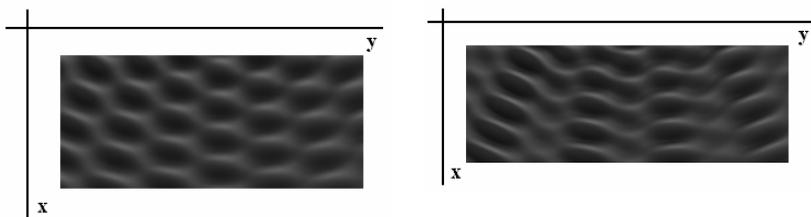


Рис. 3г.

Более 40 экспериментов проведено с волнами, распространяющимися над двумя цилиндрами диаметром 7 см с промежутком между ними в 2 см, затопленными на глубину $\delta \leq \lambda/2$, выступающими в роли препятствий. Испытания проводились для частот 5.5, 6.0 и 7.5 Гц и крутизн в диапазоне от 0.005 до 0.2. Наблюдались квадратные или гексагональные ячейки с характерными размерами $l_x = \lambda$ и $l_y = (1..1.5) l_x$. Часть результатов приведена на рис. 3д: $F = 5.5$ Гц, $ak = 0.08$ (слева); $F = 7.5$ Гц, $ak = 0.01$ (справа).

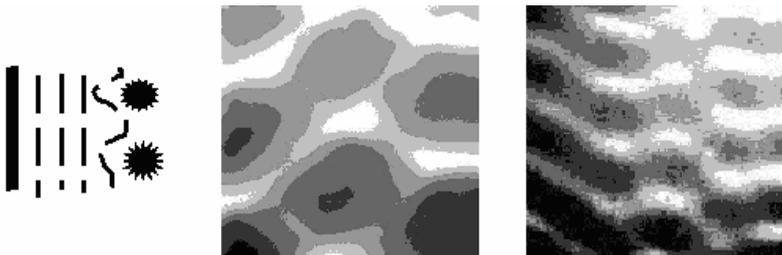


Рис. 3д.

Расчеты дифракции плоской волны вида $\zeta = A \cos(\mathbf{kx} - \omega t)$ на препятствиях, являющихся вторичными источниками волн вида (4), представлены на рис. 3е для двух (слева) и трех (справа) препятствий, расположенных на тех же расстояниях, что и на рис. 3г.

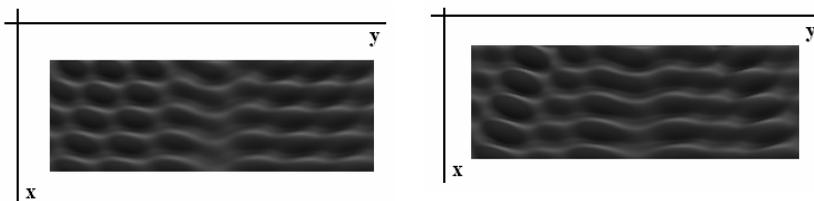


Рис. 3е.

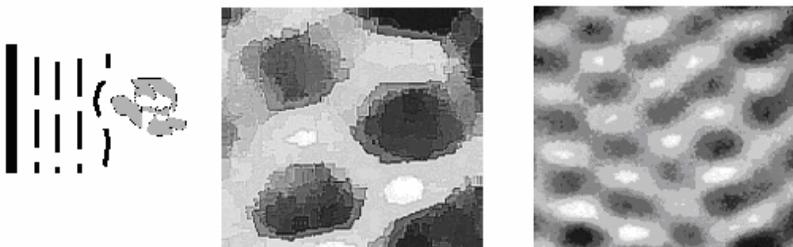


Рис. 3ж.

Более 150 экспериментов по взаимодействию волн и турбулентности было проведено в диапазоне частот от 4 до 15 Гц, крутизн от 0.005 до 0.2 и со средне-квадратичным значением скорости частиц $\sigma_u = 2..3$ см/с. В результате для всех экспериментов были получены гексагональные ячейки с $l_x = \lambda$ и $l_y = 1.5l_x$. На рис. 3ж показаны результаты взаимодействия волн и турбулентности: $F = 5$ Гц, $ak = 0.05$ (слева); $F = 8$ Гц, $ak = 0.01$ (справа).

Для расчетов выбирались 5 препятствий со случайным расположением. Результаты представлены на рис. 3з для дифракции на случайных препятствиях с большой (слева) и малой (справа) степенью рассеяния.

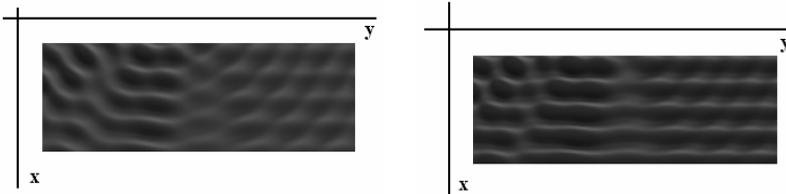


Рис. 3з.

Как видно из полученных результатов, и на случайных препятствиях образуется ячеистая картина. На всех расчётных рисунках отсчеты по координатам представлены в единицах длин волн. Начало отсчёта расположено в точке, находящейся в дальней зоне излучателей, препятствий, неоднородностей. Следует ещё раз подчеркнуть независимость процесса формирования ячеистых структур от амплитуды волн для всех проведенных экспериментов.

Подобие изображений ячеистых структур, представленных на рис. 3, подтверждает правильность выбора модели, применяемой для интерпретации полученных данных.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдаемые экспериментальные ячеистые структуры удивительно напоминают трехмерные коротко-гребневые волны, возникающие в результате нелинейного взаимодействия между двумя плоскими волнами – предмет давнишнего интереса. Многочисленные теоретические, экспериментальные и численные исследования [9] были посвящены, главным образом, длинным и крутым коротко-гребневым волнам. Самые короткие квазиплоские гравитационно-капиллярные волны, исследованные экспериментально [10,11], соответствовали крутым ($ak = 0.17..0.28$) нелинейным волнам с частотами $F = 3.7..4.6$ Гц. При этом были получены гексагональные ячейки, подобные обсуждаемым в данной работе.

Главным отличием описываемых здесь явлений является их линейный характер. Косвенные данные о степени нелинейности явления следуют из анализа спектров: нелинейное взаимодействие приводит к разным искажениям спектрального состава различных пространственных компонент. Как было отмечено выше, анализ спектров на рис. 2 убеждает в линейности рассмотренных процессов. Пря-

мая и исчерпывающая проверка линейности была проведена путем прямых измерений ячеистых структур в диапазоне крутизн, изменяющихся почти на три порядка ($ak = 0.003..0.2$) для некоторых случаев.

Следующим этапом в идентификации полученных структур является проверка того, что существование шестигранных симметрий не заложено заранее в самой лабораторной установке. Подробный анализ пространственно-временных спектров турбулентности с использованием PIV-методики [5,6] показал отсутствие в них каких-либо избранных масштабов; об этом свидетельствует также неизменность размера ячейки $l_x = \lambda$ в широком диапазоне изменения длин исследуемых волн.

Объяснение регулярной ячеистой картины, возникающей при прохождении волны через турбулентную область, основано на том, что если имеется сумма (конечная или счётная) периодических сигналов, отношение периодов которых – рациональные числа (что реализуется в физическом эксперименте), то результат – тоже периодический сигнал (период которого вычислить трудно) [12]. Поэтому независимо от того, как расположены случайные препятствия, в картине интерференции будут присутствовать два пространственных периода – по одному на каждую горизонтальную ось. Представляется справедливым, что любой другой вид создания турбулентности, включая классический метод использования вибрирующей решетки, подпадает под такое определение.

Как показывают проведённые эксперименты и расчёты на основе предложенной модели, наблюдение гексагональных структур в коротковолновых возмущениях поверхности не позволяют дать однозначный ответ на вопрос об их происхождении. Подобные ячейки в равной степени могут быть порождены как прохождением волны через область турбулентности, так и иными способами, описанными в данной работе. Это указывает на необходимость более углублённого изучения проблемы определения причин происхождения той или иной волновой картины.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование взаимодействия приповерхностной турбулентности и поверхностными короткими волнами показало, что:

а) Взаимодействие вызывает существенную деформацию структуры поверхностных волн, приводящую к образованию правильных гексагональных ячеек.

б) Найденный эффект образования ячеистых структур может быть рассмотрен как частный случай интерференции и рассеяния волн на множественных неоднородностях, создаваемых приповерхностной турбулентностью.

в) Обнаруженные структуры служат идентификаторами возможного присутствия турбулентности в приповерхностном водном слое.

БЛАГОДАРНОСТИ

А. Д. Розенберг выражает благодарность А. А. Любичкому и В. И. Шпире за плодотворные обсуждения.

Литература

1. Phillips O. M. The scattering of gravity waves by turbulence // J. Fluid. Mech. 1959. V. 5. P. 177-192.
2. Green T., Medwin H., Paquin J.G. Measurements of surface waves decay due to underwater turbulence // Nature. 1972. V. 237. P. 115-117.
3. Badulin S.V., Voropaev S.I., Kulikov A.N., Rozenberg A.D. Action of turbulence on regular small-amplitude gravity-capillary waves // Ocean. Acad. Sci. USSR. 1988. V. 28. P. 426-429.
4. Olmez H.S., Milgram J.H. An experimental study of attenuation of short water waves by turbulence // J. Fluid Mech. 1992. V. 239. P. 133-156.
5. Rozenberg A.D., Matusov P., Melville W. K. Polarized microwave scattering by surface waves and turbulence // IGARSS Proc. 1998. V. 1. P. 208-209.
6. Rozenberg A.D. Laboratory measurements of wave-turbulence interaction for scatterometry application // IGARSS Proc. 2004. V. 5. P. 3176-3179.
7. Rozenberg A. D. Laboratory study of wave-turbulence interaction // Poster, EGU Symposium. Vienna. 2005.
8. Rozenberg A.D., Ritter M. Laboratory measurements of the fine structure of short waves due to breaking: Two-directional wave propagation // J.Geophys.Res. 2005. V. 110. C02011.1-C0201.14.
9. Dias F., Kharif C. Nonlinear gravity and gravity-capillary waves // Annu. Rev. Fluid Mech. 1999. V. 31. P. 301-346.
10. Hammack J. L., Henderson D. M., Segur H. Progressive waves with persistent two-dimensional surface patterns in deep water // J. Fluid Mech. 2005. V. 552. P. 1-52.
11. Kimmon O., Branger H., Kharif C. On short-crested waves: experimental and analytical investigations // Eur. Mech. B/Fluids. 1999. V. 18. P. 889-930.
12. Математический энциклопедический словарь / Гл. ред. Ю.В. Прохоров. М.: Сов. энциклопедия, 1988. 848 с.

РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС ЗЕМЛИ В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Рыженков А.П.

Московский Государственный Областной Социально-Гуманитарный институт
Факультет математики, физики, химии, информатики, Коломна

Физическое образование и его содержание не может не откликнуться на изменение социально-го заказа мирового сообщества на границе двух столетий, который в «Повестке 21» ООН определяется как «**Устойчивое развитие**». Этот отклик может проявиться в изменении содержания, методов и форм обучения различных дисциплин, в том числе физики.

В содержании физики школы и университета можно выделить две основные составляющие: 1. фундаментальная основа (ядро), отражающая прогресс физической науки, 2. прикладная часть (оболочка), отвечающая социальному заказу общества. Если первая часть мало зависит от социальной конъюнктуры, то прикладная часть – ее прямое отражение. Так, например, содержание учебников физики предшествующих десятилетий и, пока еще современных, в прикладной и иллюстративной части четко ориентировано на обеспечение научно-технического прогресса. Это отвечает принципу *политехнизма* в физическом образовании, введенного известным физиком-педагогом и автором популярных учебников А.В. Перышкиным. Согласно этому принципу, от учителя физики требуется введение политехнического материала в каждое занятие. По учебникам физики (да и не только физики) можно проследить, как изменялось их содержание согласно изменению направления вектора социально-экономического развития.

В учебной физике такие изменения больше всего отражаются в *прикладном и иллюстративном материале*. Если условно, относительно времени, разделить физику на две части: 20 столетие и 21 столетие, то изменения в прикладном аспекте можно представить следующим образом:



Появление концепции Устойчивого развития (доклад Брунтланд, 1987) расширяет возможности участия физики в экологическом образовании. Развитие физического образования с ориентиром на *экологические проблемы* часто ассоциируется с биологией и поэтому вызывает неприятие у части преподавателей физики. Установка на участие физики в проблеме *Устойчивого развития и устойчивой окружающей среды* сохраняет задачи физического образования, но придает им другой оттенок. Понятие *среда* предполагает интеграцию традиционного содержания учебной физики с геофизикой, понятие *устойчивость* – характеристика многих физических явлений искусственной и естественной среды. Такой подход для преподавателя ВУЗа и учителя физики делает интеграцию физики экологии более привлекательной и приемлемой.

В качестве ориентира по введению в физику вопросов с экологическим содержанием можно воспользоваться списком проблем, находящихся на стыке физики, экологии и техники.

1. Физика атмосферы, гидросферы и литосферы и влияние антропогенного фактора на процессы в этих системах. Физические процессы в системе атмосфера-поверхность, атмосфера-океан, океан-суша.
2. Обмен энергией в системе Земля – Космос. Радиационный баланс Земли и его изменение.
3. Энергетика биосферы. Круговороты вещества в природе, большой и малый циклы, влияние на них человеческой деятельности. Распределение энергии в трофических цепях.
4. Физика процессов в биосистемах и их нарушение внешним воздействием.

Радиационный баланс Земли.

Изменение содержания программ общей физики и учебных пособий нужно с чего-то начать, таким началом может быть введение радиационного баланса Земли. Это важнейшее фундаментальное физическое явление, обеспечивающее устойчивое существование развитой жизни на земле и являющееся основой множества важных геофизических и биосферных явлений. Впервые механизм этого явления сформулирован в работах М.И. Будыко, ему принадлежит понятие «Тепловой баланс земли»¹⁾. Это фундаментальное физическое явление, заслуживающее его включения в курсы физики всех специальностей без исключения. В вузовский и школьный курс физики оно введено в России в учебных пособиях автора^{2,3)}.

Каждое нагретое тело излучает в окружающее пространство тепловое (инфракрасное, невидимое для человека) излучение. Земля также «светит» в космос потоком теплового излучения, зависящим от температуры ее поверхности.

Состояние биосферы, комфортное для жизни, определяется средней температурой ее климата в системе поверхность-атмосфера. Данные спутниковых измерений показали, что эта температура 14°C была удивительно стабильна в течение тысяч лет, сейчас она 15°C. Многие полагают, что эта температура определяется потоком тепла из земных глубин. Такое мнение возникает из того, что температура земного ядра и температура Солнца примерно одинакова – около 6 000°C, однако ядро находится примерно в 5 000 км от поверхности, а до Солнца 150 млн. км. Для анализа теплового состояния Земли и вклада в него этих двух источников рассмотрим несколько моделей.

Модель 1. Температура поверхности и геотермальная энергия.

Предположим, что средняя температура климата определяется тепловым потоком из земного ядра. Если исходить из того, что диаметр ядра около 2 500 км, а его температура 6 000°C, то с учетом коэффициента теплопроводности тела Земли до поверхности доходит очень малый поток тепла. Его средняя мощность $P = 0,05 \text{ Вт/м}^2$ и градиент температуры примерно 1К на 1км. Таким образом, практически вся энергия ядра рассеивается внутри Земли на нагрев пород и их движение. Температура поверхности, вычисленная по мощности этого потока $T = [(gradT/01) \sigma^8]^{4/1}$, оказывается чрезвычайно низкой, около 30К.

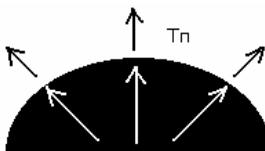


Рис.2. Излучение поверхности, нагретой только геотермальным теплом
 T_p – температура поверхности.

Строительство шахт и бурение скважин показывают, что температура в верхнем слое коры возрастает 30К на 1 км. Такой градиент температуры предполагает наличие источника тепла в земной коре. Причиной этого потока являются делящиеся материалы, находящиеся именно в земной коре. С возрастанием глубины их концентрация уменьшается. Если исходить из этой величины, то можно вычислить величину энергии теплового потока к поверхности используя уравнение теплопроводности.

$$Q = k A \Delta T / \Delta R,$$

где k – коэффициент теплопроводности базальта $2 \text{ Дж} / (\text{м}^2 \text{ с К})$, A – площадь поверхности Земли, $\Delta T / \Delta R = 0.03 \text{ К/м}$ – возрастание температуры с глубиной. Итак, $Q = 3 \cdot 10^{13} \text{ Вт}$.

Мощность излучения с 1 м^2 поверхности

$$P = Q/A_{\text{поверхности}} = 0,06 \text{ Вт/м}^2$$

Температура нагретой поверхности вычисляется по закону Стефана-Больцмана для излучения абсолютно черного тела $P = \sigma T^4$, где $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(\text{м}^2 \text{ град}^4)}$ – постоянная Стефана-Больцмана и

$$T = [0,06 \text{ Вт/м}^2 / 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(\text{м}^2 \text{ град}^4)}]^{1/4} = 74 \text{ К или } -199^\circ \text{C}.$$

Вывод очевиден. При таких температурах поверхности поток земного тепла существенного влияния на процессы в биосфере оказать не может. Главной движущей силой биосферных процессов может быть только энергия Солнца.

Обсудим еще несколько приближений (моделей) для понимания роли энергии солнечного излучения в формировании климата, точнее, его главной характеристики – средней температуры поверхности.

Модель 2. Температура поверхности Земли без атмосферы.

Определим температуру поверхности, предполагая отсутствие атмосферы и полное поглощение солнечного излучения поверхностью.

В этом случае поверхность нагревается солнечным излучением и, по закону сохранения энергии, возвращает ее обратно в космос в форме теплового излучения.

$$P(\text{полученная}) = P(\text{излученная})$$

Полученная мощность определяется солнечной постоянной $S_0 = 1368 \text{ Вт/м}^2$, количеством энергии получаемым нормально ориентированной площадкой площадью 1 м^2 в 1 секунду. Средняя энергия, получаемая поверхностью земного шара меньше в 4 раза, т.к. отношение площади экваториального сечения ($A_{\text{ЭК}}$) ко всей поверхности (A): $A_{\text{ЭК}}/A = \pi R^2 / 4 \pi R^2 = 1/4$. Принимая поверхность Земли за абсолютно черное тело, получим значение температуры поверхности из закона сохранения энергии

$$S_0/4 = \sigma T^4$$

Отсюда температура поверхности $T = 279\text{К}$ или 6°С . Такая температура не способствуют высоко-развитой растительной и животной жизни.

Если приблизить свойства поверхности к реальной, то есть учесть ее отражательную способность $\alpha = 3 - 5\%$. То мощность теплового излучения поверхности соответственно уменьшится, а температура будет либо близкой к 0°С , либо отрицательной. Ни о какой развитой жизни при такой температуре говорить не приходится.

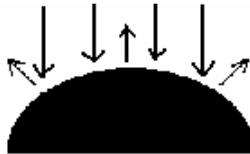


Рис.3. Излучение поверхности Земли, нагретой солнечным светом, атмосфера отсутствует.

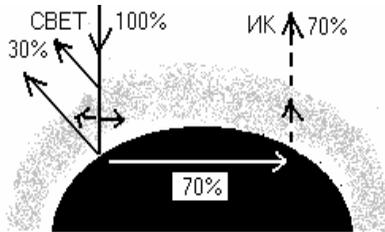


Рис. 4. Тепловой баланс Земли с азотно-кислородной атмосферой
ИК – инфракрасное излучение.

Модель 3. Поверхность и кислородно-азотная атмосфера.

Определим роль азотно-кислородной атмосферы в формировании средней температуры

Солнечное излучение в системе атмосфера-поверхность проходит цепочку различных процессов, заканчивающуюся возвращением энергии в космос.

Атмосфера, как известно, состоит в основном из азота (78%), кислорода (21%), небольшого количества благородных газов, из которых больше всего аргона (0.9%), углекислого газа (0.03%) и очень малого количества других газов. Если пренебречь влиянием на поток солнечного излучения газов, составляющих 1%, то

энергия солнечного излучения, примем ее за 100%, распределяется следующим образом (рис. 4).

По наблюдениям с космических аппаратов установлено, что отражается от атмосферы (условная граница) 27%, рассеивается (поглощается) в воздухе 26%, доходит до поверхности 47%, отражается от поверхности 3%, поглощается поверхностью 44%. Поглощенная энергия идет на нагрев воздуха и поверхности Земли.

По закону сохранения энергии, полученная энергия должна быть равна энергии отданной. Следовательно, в космос энергия возвращается в форме двух потоков: отраженный свет ($27\% + 3\% = 30\%$ - альbedo Земли) и тепловое инфракрасное (невидимое) излучение нагретой атмосферы и поверхности (70%).

$$W_{\text{полученная}} = W_{\text{отраженная}} + W_{\text{теплового излучения}}$$

Отраженный свет не влияет на температуру поверхности, следовательно, для вычисления ее температуры нужно пользоваться законом сохранения для потока энергии, поглощенной атмосферой и поверхностью.

$$W_{\text{поглощенная}} = W_{\text{теплового излучения}}$$

Принимая энергию приходящего к Земле излучения за 1 вместо 100%, а альbedo $\alpha = 0,3$, для простоты расчетов, и считая поверхность абсолютно черным телом, уравнение энергетического баланса имеет вид:

$$S_0 (1 - \alpha) A_{\text{эк}} = \sigma T^4 A$$

Напомним, что температура нагретого абсолютно черного тела с мощностью теплового излучения связана законом $P = \sigma T^4$. Это уравнение называют уравнением теплового или радиационного баланса Земли. Из этого уравнения определим температуру поверхности

$$T = [S_0(1 - \alpha) / 4\sigma]^{1/4} = 255\text{K}.$$

Итак, средняя температура системы атмосфера-поверхность всего лишь 255K или -18°C . Однако, наблюдаемая температура 288K или 15°C , а наш расчет ошибся на 33K. Ошибка связана с тем, что мы предположили атмосферу прозрачной для инфракрасного излучения. Исследования излучения поверхности со спутников показали, что часть теплового излучения задерживается атмосферой. Это задержанное излучение связано с влиянием небольшого количества газов, которыми мы пренебрегли и водяными парами, присутствующими в атмосфере. Учет поглощения исходящего излучения должен дать реальную температуру.

Модель 4. Температура поверхности и «парниковый эффект».

Определим температуру поверхности с учетом поглощения теплового излучения Земли небольшим (около 1%) количеством газов и паров воды в составе атмосферы.

Если учесть влияние углекислого газа, паров воды, метана, то окажется, что эти газы действуют на исходящее излучение подобно стеклу парника, поэтому их называют «парниковыми газами».

Они поглощают исходящее излучение Земли, нагреваются и переизлучают энергию обратно к поверхности (рис. 5), явление получило название «парникового эффекта». Эта переизлученная энергия приводит к дополнительному нагреву поверхности и повышению ее температуры.

Таким образом, в уравнении радиационного баланса нужно учесть энергию $W_{\text{пр}}$, возвращенную к земле «парниковыми газами». Ее величина оценивается как $\frac{1}{2}$ от $0,7S_0$ энергии теплового излучения нагретой поверхности. Кроме этой величины нужно также учесть энергию теплового излучения атмосферы (W_k), об-

разующегося при поглощении коротковолновой части солнечной радиации. Эту величину оценивают около $0,1S_0$. Значения $W_{пр}$ и W_k зависят от многих факторов: типа поглощающей поверхности (вода, пустыня, лес, горы, географической широты), состава атмосферы, запыленности воздуха и т.п.

Уравнение радиационного баланса с учетом этих добавок имеет вид

$$[(1 - \alpha)S_0 + W_{пр} + W_k]\pi R^2 = \pi 4\sigma R^2 T^4$$

или, с учетом конкретных величин

$$\frac{1}{4}(1,15S_0) = \sigma T^4, \text{ отсюда } T = [1/4\sigma 51,1(S_0)]^{1/4} = 288\text{K или } 15^\circ\text{C}$$

В этой модели значение температуры совпадает с ее современной средней величиной с точностью $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Точность полученного значения зависит от учета уже приведенных факторов, однако не учтены энергетические эффекты ряда явлений, например, конвекционные потоки в атмосфере, морские течения. В нашем обсуждении важна не точность совпадения расчетной температуры с реальной, а тот факт, что **ничтожное количество** газов в атмосфере (парниковый эффект), например CO_2 , дает колоссальный эффект для нашей планеты, от температуры вечной зимы при -180°C (Модель 3) до $+15^\circ\text{C}$, температуры обеспечивающая потрясающее разнообразие и красоту жизни на планете.

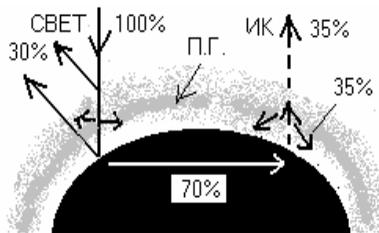


Рис. 5. Тепловой баланс Земли с реальной атмосферой, (ПГ- парниковые газы).

Вывод о влиянии малых добавок в атмосфере очень важен, так как установлено, что быстрый рост концентрации CO_2 и других парниковых газов связан с человеческой деятельностью. С этим связывают также повышение средней температуры от 14°C до 15°C или на 1°C примерно за три последних десятилетия. Казалось бы какое влияние на биосферные процессы может оказать повышение температуры на 1 градус ?

Однако, этот 1 градус, как считают специалисты-климатологи, привел к тому, что климат засушливых стран становится более засушливым, а климат влажных – более влажным. Это наблюдается в последние годы в связи с катастрофическими наводнениями в Центральной Европе, на Юге и Востоке России. Там, где еще недавно ничего подобного не наблюдалось. Повышение концентрации CO_2 и, связываемое с этим потепление климата, послужило причиной для конференции в Киото (Япония, 1997), и принятия протокола о снижении эмиссии промышленных газов. Принятие этого протокола может сильно изменить мировое промышленное производство, энергетику и транспорт не только для снижения выбросов газов в атмосферу, но и перевести мировую экономику на принципиально новые альтернативные технологии.

Предложенный материал впервые введен в преподавание физики школы³⁾ и рекомендован как обязательный. В зарубежных учебныхниках для школы и университетов такой материал пока еще большая редкость⁴⁾. Предложенные модели не означают перенесение всего этого материала на урок физики. Он дает возможность преподавателю физики выбрать то, что он сочтет более важным и необходимым. Наиболее приемлемо введение радиационного баланса земли в курс оптики и термодинамики.

Другой, второй по значимости тему, связанную с радиационным балансом, можно считать физику глобальных ветров⁵⁾. Важность этого явления в том, что глобальные ветры сглаживают на планете температурные контрасты, распределяют равномерно кислород и влагу. Изменение динамики глобальных ветров ведет к катастрофическим, уже наблюдаемым со второй половины прошлого столетия, последствиям.

Литература

1. Будыко М.И. Тепловой баланс Земли. Л.: 1978
2. Рыженков А.П. Физика и экология. М. Прометей. 1989
3. Рыженков А.П. Физика. Человек. Окружающая среда-9. М.: Просвещ., 1999.
4. Mats Areskoug. Miljofusik. Energi och klimat. Studentlitteratur. Швеция. 1999
5. Рыженков А.П. Физика. Человек. Окружающая среда-8. М.: Просвещ. 1998

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

В.Л. Саввин, Г.М. Казарян, Ю.А. Пирогов

*Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова
кафедра фотоники и физики микроволн*

Проведен анализ современного состояния исследований в развивающейся области СВЧ энергетики – микроволновой передаче энергии. Обсуждаются проблемы повышения эффективности передачи, снижения уровня фонового излучения и переизлучения кратных гармоник рабочей частоты. Анализируются перспективы проектов микроволновой передачи энергии наземного и космического базирования.

1. Введение

Идея передачи энергии с помощью электромагнитного излучения была впервые высказана выдающимся электротехником Николой Тесла в начале XX века. Развитие радиолокации и интенсивные работы по освоению дециметровых и сантиметровых диапазонов микроволн заложили основу для широкого использования СВЧ энергетики и вызвали растущий интерес к беспроводной передаче энергии с помощью направленного микроволнового излучения [1-2]. Микроволновый диапазон (2,4-5,8 ГГц) дает возможность существенно уменьшить размеры передающих и приемных антенн и отличается высоким уровнем эффективности устройств генерации и преобразования энергии электромагнитного излучения.

Идея широкомасштабной микроволновой передачи энергии, вырабатываемой космическими солнечными электростанциями, наземным потребителям принадлежит П. Глезеру [3] и интенсивно прорабатывалась в 70-х годах прошедшего столетия. Проблемам солнечных космических электростанций и микроволновой передачи энергии посвящен ряд публикаций в отечественной научной печати [4,5]. В последние годы ряд перспективных проектов микроволновой передачи энергии наземного и космического базирования, рассчитанных на меньшую мощность, разрабатываются в США, Японии и ЕС.

Целью настоящей публикации является обсуждение современного состояния в области микроволновой передачи энергии, возникающих при этом технологических и экологических проблем, а также перспектив развития микроволновых систем передачи энергии наземного и космического назначения.

2. Эффективность микроволновых передающих устройств

При анализе потенциальных возможностей микроволновой передачи энергии важно учитывать как эффективность передачи, так и достигнутый уровень переданной мощности. Общая эффективность системы микроволновой передачи энергии может рассматриваться как произведение эффективности составляющих компонент – КПД систем генерации микроволн, КПД передачи микроволнового излучения от передающей антенны к приемной антенне и КПД обратного преобразования микроволн в электрический ток для энергоснабжения потребителей.

На сегодняшний день наивысшее значение результирующей эффективности микроволновой передачи энергии в промышленном диапазоне частот (2,4-2,5 ГГц) продемонстрировано в эксперименте В. Брауна и Р. Дикинсона в 1975 году [6]. Было зафиксировано значение отношения мощности, выделенной в нагрузку постоянного тока на приемном конце линии передачи, к мощности питания магнетрона в передающей антенне на уровне $54 \pm 1\%$. Необходимо отметить, что этот уровень достигнут при использовании единственного «наиболее неэффективного» звена во всей технологической цепочке микроволновой передачи энергии – магнетрона с КПД не более 72%. Если бы этот эксперимент можно было бы повторить сегодня с магнетроном, разработанным в России и обладающим КПД на уровне 83%, то результирующая эффективность передачи энергии составила бы 64%.

Наивысший уровень переданной мощности также зафиксирован в эксперименте В. Брауна и Р. Дикинсона – 34 кВт постоянного тока в нагрузку приемной системы при передаче энергии на расстоянии 1,55 км на частоте 2,4 ГГц. Приемная система, содержащая ректенны с GaAs-диодами, продемонстрировала КПД приема и преобразования микроволн в постоянный ток на уровне 82,5%. При использовании частоты 5,8 ГГц в качестве рабочей наибольший уровень мощности постоянного тока в нагрузке – 450 Вт зафиксирован для микроволновой передачи на расстояние 60 метров.

Для систем передачи космического базирования эффективность генерации микроволн имеет особое значение в связи с требованиями уменьшения масс - габаритных характеристик передающих устройств. Среди наиболее высокоэффективных вакуумных устройств для генерации микроволн следует выделить магнетроны, клистроны и гиротроны. Наивысший КПД генерации в настоящее время достигнут на магнетронах (83% на частотах выше 2 ГГц), хотя для более низких частот КПД вакуумных СВЧ-устройств и твердотельных генераторов может превышать этот уровень.

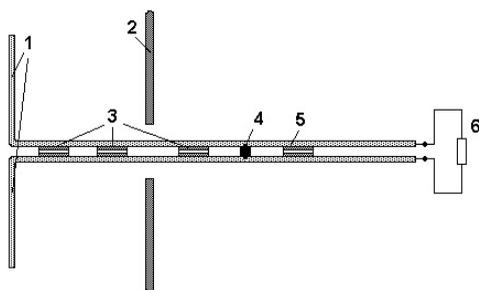


Рис. 1. Ректенный элемент с диодом Шоттки, 1- полуволновой диполь, 2- отражающая поверхность, 3- фильтр нижних частот, 4- диод Шоттки, 5- выходной фильтр, 6- нагрузка.

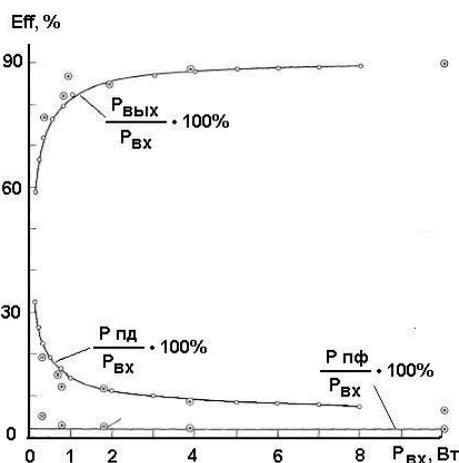


Рис. 2. Зависимость КПД ректенны ($R_{вых}/R_{вх}$), потерь на диоде ($R_{пд}/R_{вх}$) и потерь в фильтре от уровня входной мощности ($R_{вх}$) для экспериментального образца ректенны с диодом Шоттки

3. Обратное преобразование микроволн в постоянный ток

Наиболее распространенным типом преобразователя микроволн в постоянный электрический ток является ректенна с полупроводниковым диодом Шоттки (см. рис.1). Наивысшее значение КПД преобразования ректенны было достигнуто в лабораторных условиях – 91,4% при входной мощности микроволн до 10 Вт на единичном экземпляре диода Шоттки (см. рис. 2) для рабочей частоты 2,45 ГГц [7]. На частоте 5,8 ГГц КПД преобразования ректенн с диодами Шоттки достигает 82% при входной мощности 50 мВт [8].

Плотность мощности падающего излучения может заметно изменяться на апертуре приемного комплекса микроволновой линии передачи (до 10 дБ). Для крупномасштабных проектов солнечной энергетики плотность мощности уменьшается от 230 Вт/кв.м в центре приемного комплекса до 23 Вт/кв.м на краю ректенны (для проекта NASA). При оптимальных значениях плотности диполей (150-200 диполей/кв.м) нагрузка на один диод в центре приемной ректенны будет близка к номинальной мощности диодов Шоттки (1-2 Вт), при которой реализуется максимальный КПД преобразования микроволн в постоянный ток.

Однако уменьшение уровня входной мощности приводит к росту потерь на диоде и значительному снижению КПД преобразования. Так при значениях $P_{вх}$ 100 мВт и ниже КПД преобразования не превышает 60% (см. рис. 2). Таким образом, использование однопольных ректенн на всей площади приемного комплекса приведет к заметному уменьшению КПД всей системы.

Наиболее рациональным решением для поддержания уровня входной мощности ректенны, близкого к номинальной мощности диода, может быть использование ректенн с многодипольными антеннами. В таких ректеннах мощность микроволн, принятых каждым диполем, суммируется и направляется на один общий диод. Суммирование мощности даст возможность реализовать оптимальный режим работы диода Шоттки с высоким КПД преобразования.

Альтернативным типом устройства для обратного преобразования микроволн в постоянный ток могут быть различные вакуумные приборы, работающие в обращенном режиме (клистроны, магнетроны и др.). Следует особо выделить циклотронный преобразователь с эффективностью до 83%, входной мощностью микроволн 10 кВт на частоте 2,45 ГГц и выходным напряжением 15-20 кВ [9].

Мощные вакуумные преобразователи с высоким выходным напряжением легче могут быть интегрированы в существующие энергосистемы по сравнению с низковольтными ректеннами, которые придется коммутировать в большое число последовательно- параллельных цепочек для передачи энергии на киловольтном уровне.

4. Проблемы безопасности микроволновой передачи

Среди основных требований к микроволновой передаче энергии следует выделить достижение высокой эффективности при одновременном обеспечении безопасности, экологической чистоты и электромагнитной совместимости системы. Уровень фонового излучения и боковых лепестков передающих антенных систем на основной частоте должны соответствовать требованиям стандартов безопасности. Особое внимание следует уделять проблеме переизлучения микроволн приемной системой с полупроводниковыми преобразователями (ректеннами) на кратных гармониках рабочей частоты.

Эксперименты по применению ректенн с полуволновыми диполями показали достаточно высокую эффективность – до 80-90%. Однако дипольная антенна способна переизлучать значительную долю высших кратных гармоник частоты f_0 принимаемого микроволнового излучения, которые возникают при его выпрямлении полупроводниковым диодом. Относительный уровень мощности высших кратных гармоник может достигать нескольких процентов (2-5% на удвоенной частоте) и уменьшается с номером гармоники. Однако при высоком уровне передаваемой мощности и без принятия специальных мер по подавлению высших гармоник приемные наземные системы микроволновых линий передачи энергии могут создавать серьезные помехи существующим системам передачи информации и радиосвязи. С этой целью в конструкцию полуволнового ректенного элемента вводят фильтры низких частот, предназначенные для уменьшения уровня высших кратных гармоник рабочей частоты, излучаемых ректенной (см. рис. 1).

Помимо полуволновых диполей в ректенных элементах предложено использовать дисковые микрополосковые антенны. Микрополосковые антенны имеют ряд привлекательных свойств, таких как малый профильный размер, малый вес, компактная и простая конструкция, сравнительная легкость интеграции с твердо-

тельными устройствами, возможность использования техники фотолитографии для промышленного изготовления и др. Применение круглых дисковых микрополосковых антенн дает также дополнительные возможности решения проблемы переизлучения высших кратных гармоник рабочей частоты.

Дисковая микрополосковая антенна (ДМА) представляет собой двухслойную композицию круглой формы из тонкого металлического диска и диэлектрической подложки, нанесенную на плоскую металлическую поверхность (см. рис. 3). Резонансные частоты круглой ДМА можно определить из решений уравнения

$$J'_n(k_n a) = 0, \quad (1)$$

$$k = 2\pi f_0 \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu_0}, \quad (2)$$

где $J'_n(k_n a)$ - производная функции Бесселя первого рода n -го порядка, a - радиус круглого диска, f_0 - рабочая частота, ε - относительная диэлектрическая проницаемость подложки, ε_0, μ_0 - диэлектрическая и магнитная проницаемость вакуума.

Радиус диска выбирается из условия резонанса для основной моды TM_{11} на рабочей частоте. Как следует из решения уравнений (1-2) резонансные частоты круглой ДМА для других мод не совпадают с частотами кратных гармоник рабочей частоты f_0 , возникающих в процессе выпрямления на диоде. Поэтому интенсивность переизлучения на частотах кратных гармоник у ректенн с ДМА будет существенно ниже, чем у ректенн с полуволновыми диполями. При достаточно узких резонансах подавление кратных гармоник может быть настолько эффективным, что ректенный элемент с ДМА может и не содержать дополнительных фильтров низкой частоты.

Дополнительные возможности для снижения уровня кратных гармоник (в четыре-пять раз) дает введение в конструкцию ДМА щелей, расположенных вдоль линий тока для основной моды на рабочей частоте f_0 и препятствующих возбуждению антенны на удвоенной частоте.

5. Перспективы микроволновой передачи энергии

Среди разнообразных предложений по использованию микроволновой передачи энергии следует особо выделить два проекта, разрабатываемые в последние годы с участием сотрудников МГУ. Это - проект энергоснабжения населенного пункта, расположенного в труднодоступном районе острова Реюнион (Франция) и проект космической спутниковой системы для роста полупроводниковых кристаллов.

Проект первой наземной беспроводной линии передачи (остров Реюньон) предполагает снабжение электроэнергией небольшой деревни, расположенной в глубоком кратере потухшего вулкана, где монтаж обычных силовых кабелей затруднен из-за сложности рельефа и высокой стоимости работ [10].

Крайне важно, чтобы уровень фонового излучения за пределами приемно-преобразующего комплекса наземной микроволновой линии передачи не превышал экологически безопасного уровня. По западным стандартам микроволновое излучение считается безопасным в течение рабочего дня при плотности мощности

менее 100 Вт/м². Этот уровень фонового излучения может быть достигнут путем реализации оптимальных амплитудно-фазовых распределений поля на поверхности передающей антенны.

Передающую антенну наиболее рационально заменить фазированной решеткой стандартных излучателей в виде N концентрических колец. Амплитудное распределение будет иметь вид :

$$E_A(r) = \begin{cases} E_n, & r_{n-1} < r < r_n, \quad n = 1, 2, \dots, N, \\ 0, & r > r_N = R_1, \end{cases} \quad (3)$$

где E_n и r_n - амплитуда и радиус n -ой ступеньки; N - число ступенек дискретного амплитудного распределения; $E_{N+1} = 0$; $r_0 = 0$. Тогда распределение поля в плоскости приема принимает вид:

$$E_R(r) = E_{max} \frac{k R_1^2}{2D} \sum_{n=1}^N \Delta \varepsilon_n x_n^2 A_1(2\tau x_n r / R_2), \quad (4)$$

где $E_{max} = \max\{E_n\}$; $\Delta \varepsilon_n = \varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}$; $\varepsilon_n = E_n / E_{max}$ и $x_n = r_n / R_1$ - относительные амплитуда и радиус n -ой ступеньки, где $A_n(z)$ - лямбда-функция первого рода 1-го порядка.

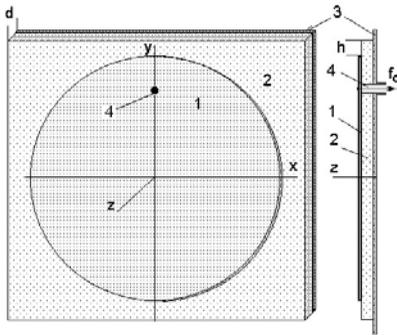


Рис. 3. Дискковая микрополосковая антенна (вид спереди и сбоку), 1- металлический диск, 2- диэлектрическая подложка, 3- металлический отражатель, 4- коаксиальный вывод.

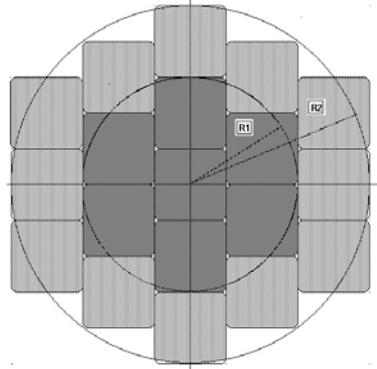


Рис.4. Передающая антенна из 19 квадратных модулей с 2-х ступенчатым амплитудным распределением

КПД микроволновой передачи энергии зависит от величины волнового параметра $\tau = \pi R_1 R_2 (\lambda D)^{-1}$, где λ - длина волны, на которой ведется передача энергии, R_1 и R_2 - радиусы передающей и приемной антенны, D - расстояние между антеннами.

Методом численного моделирования найдено оптимизированное двухступенчатое амплитудное распределение на передающей антенне, при котором линия имеет высокий КПД и низкий уровень фона. Мощность излучения передающей антенны составляла около 14 кВт при фиксированном расстоянии между антеннами $D=700\text{м}$ и радиусе передающей антенны $R_1=2,4\text{м}$.

Основные результаты проведенных расчетов для анализируемой линии передачи представлены в таблице 1. Как видно, оптимизированное двухступенчатое распределение характеризуется высоким КПД и низким уровнем фонового излучения, незначительно уступающим варианту с оптимальным Гауссовым распределением, и выгодно отличается от него простотой конструкции передающей антенны, которую можно представить в виде системы однотипных излучающих блоков (см. рис. 4).

Как видно из табл. 1 и рис. 5 фоновое излучение за пределами зоны центрального лепестка для проанализированного варианта наземной микроволновой линии передачи может быть доведено до уровня, соответствующего требованиям стандарта РФ (0.1 Вт/м^2). С точки зрения западных стандартов микроволновая линия передачи энергии такого масштаба является абсолютно безопасной даже в области центрального лепестка.

Таблица 1. Характеристики микроволновой линии передачи энергии

Вид амплитудного распределения	Равномерное	Гауссово 10-ступенчатое	Оптимизир. 2-ступенчатое
КПД передачи	81.25 %	88.22 %	86.5 %
Уровень 1-го бокового лепестка	0.29 Вт/м^2 (-17.5дБ)	0.07 Вт/м^2 (-23.3дБ)	0.11 Вт/м^2 (-21.2дБ)
Радиус 1-го бокового лепестка	29.3 м	31.9 м	31.1 м

В последние годы в МАИ, МГУ, ИМЕТ РАН и НПО машиностроения проведены комплексные исследования по созданию концепции космической системы с беспроводной передачей энергии. Предлагаемая космическая система предназначена для проведения высокотехнологических экспериментов при предельно низком уровне и стабильности направления вектора остаточных микроускорений ($10^{-7} - 10^{-8} g_0$, g_0 – ускорение силы тяжести на Земле).

В результате разработан аванпроект космической системы, предназначенной для экспериментального определения теплофизических свойств жидкостей и газов (коэффициентов диффузии, вязкости, тепло- и электропроводности) при стабильном положении в пространстве вектора микроускорений и предельно низком их уровне ($10^{-7} - 10^{-8} g_0$). Реализация этих параметров имеет первостепенное значение для успешного проведения различных технологических (выращивание однородных высококачественных полупроводниковых и других кристаллов), медико-биологических (получение сверхчистых медицинских препаратов) и тонких физико-технических и химических экспериментов в космосе.

Космическая система состоит из малого специализированного (технологического) спутника (МСС) и базового космического аппарата - энергетического космического модуля (ЭКМ) (см. рис.6). МСС рассчитан на гравитационную (пассив-

ную) стабилизацию на орбите высотой порядка 1000 км и содержит минимальное количество подсистем (экспериментальный блок и приемник СВЧ или лазерного излучения) для реализации предельно низкого уровня остаточных микроускорений. Роль модуля ЭКМ, находящегося на одной и той же орбите с модулем МСС, заключается в энергоснабжении МСС по сфокусированному электромагнитному лучу. При этом модуль ЭКМ выполняет все дополнительные функции по развращению системы на орбите, управлению технологическими процессами и возвращению полученных материалов, имея в своем составе основную энергетическую установку для питания источника излучения, системы управления и двигательный комплекс.

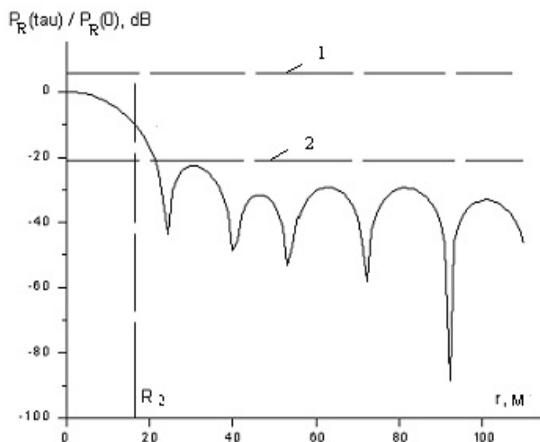


Рис. 5. Распределение нормированной мощности излучения в плоскости приема вдоль радиуса, 1-уровень западного стандарта безопасности, 2-стандарт РФ.

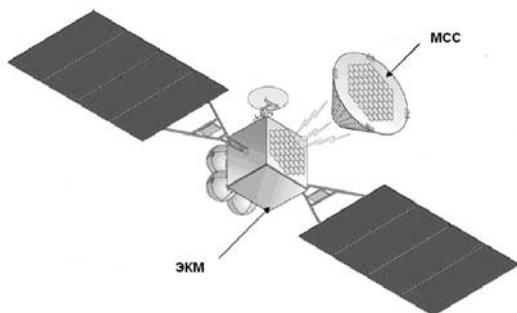


Рис.6 Схема космической системы с микроволновой передачей энергии на технологический модуль

Простота конструкции модуля МСС позволяет реализовать плотную упаковку небольшого количества бортовых систем, повысив тем самым удельный вес от стандартных $0,5 \text{ г/см}^3$ до $1,0 \text{ г/см}^3$, тем самым существенно улучшая соотношение мидель/объем и, тем самым, уменьшая возмущающее воздействие солнечного ветра. Предлагаемая система может быть реализована на базе уже существующих космических технологий и средств выведения, разработанных в настоящее время малых спутников и стандартных

носителей. С учетом малых размеров и масс системы возможен вариант ее выведения на штатную орбиту по схеме попутного груза.

7. Заключение

Выбор оптимальных параметров наземной микроволновой линии передачи энергии (уровня передаваемой мощности, профиля поля на передающей антенне, параметра передачи τ и др.) даст возможность обеспечить эффективную (с КПД 70% и более) и экологически безопасную передачу энергии направленным микроволновым излучением.

При низких значениях плотности потока микроволнового излучения и его значительной неоднородности в плоскости приема наиболее рационально использовать ректенны с многодипольными антеннами, обеспечивающие оптимальный уровень входной мощности на диоде Шоттки.

Применение ректенн с дисковой микрополосковой антенной (ДМА) снижает опасность переизлучения кратных гармоник рабочей частоты, возникающих на полупроводниковом диоде в процессе выпрямления, из-за несовпадения их частот с резонансными частотами круглой ДМА.

Реализация предложенной космической спутниковой системы с предельно низким уровнем остаточных микроускорений и беспроводной передачей энергии на технологический модуль даст возможность проведения высокотехнологических экспериментов по росту полупроводниковых кристаллов и синтезу высококачественных препаратов.

Литература

1. Mankins J. Space-Based Solar Power. Inexhaustible Energy from Orbit //Ad Astra, №1, 2008
2. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика, М., 2003.
3. Glaser P.E. Power from the Sun: its future//Science, 162, p.857, 1968.
4. Ванке В.А, Лопухин В.М., Саввин В.Л., Проблемы солнечных космических электростанций//УФН, Т.104, №4, С.879. 1977.
5. Грихилес В.А., Орлов П.П., Попов Л.Б., Солнечная космическая энергетика М. Наука, 1984.
6. Dickinson R., Brown W., Radiated Microwave Power Transmission System Efficiency Measurements//NASA-JPL Techn. Mem. 33-727, 1975.
8. Brown W., History of Power Transmission by Radio Waves//IEEE Trans., V. MTT-32, N9, 1984
9. McSpadden J., Fan L., Chang K., High Conversion Efficiency 5,8 GHz Rectenna//IEEE MTT Digest, p.547, 1997.
10. Vanke V., Savvin V., Cyclotron-Wave Converter For SPS Energy Transmisson System//Proc. SPS-91, Paris, p.515, 1991.
11. Celeste A., Jeanty P., Pignolet G. Case study in Reunion Island. //ACTA Astronautica. - 2004- (54), p. 253, 2004.

ГЕНЕРАЦИЯ ОБРУШАЮЩИХСЯ ВОЛН С МАКСИМАЛЬНОЙ АМПЛИТУДОЙ ПРИ ПОМОЩИ ОДНОНАПРАВЛЕННОЙ ДИСПЕРСИОННОЙ ФОКУСИРОВКИ

Иван Б. Савельев

Данная статья описывает существующие методы и предлагает новый подход к генерации обрушающихся волн в волновых бассейнах. Благодаря дисперсионной природе гравитационных волн, однонаправленный пакет волн может быть запрограммирован таким образом, что его энергия фокусируется в заданной пространственно-временной точке. В данной работе такие частотно-модулированные волновые пакеты создавались при помощи плоскостного волнопродуктора, закрепленного шарниром на дне. Новый метод, предложенный в статье, сочетает два стандартных подхода: фокусировка энергии и фокусировка фаз волн, а так же вводит эмпирическую поправку на нелинейность. Основным нелинейным свойством волновых пакетов высокой крутизны было найдено их стремление к переносу энергии в начало пакета. Если оставлена без поправки, эта нелинейная модуляция приводит к дефокусировке волновой энергии, что в свою очередь вызывает уменьшение амплитуды основной обрушающейся волны, а так же может привести к возникновению вторичных обрушающихся волн на ранних стадиях распространения волнового пакета. Эмпирически найденная поправка к фазе генерируемых волн предложена в качестве компенсации к описанному нелинейному эффекту.

1. Введение.

Детальное экспериментальное воссоздание обрушающихся волн часто необходимо для таких приложений как развитие волновой теории, описание взаимодействия атмосферы и океана, оптимизация и тестирование новых форм кораблей и прибрежных сооружений и прочее. Для большинства из этих приложений важна возможность генерации обрушающихся волн с определенными свойствами в заданном месте и времени.

Существует несколько механизмов посредством которых гравитационная поверхностная волна может обрушиться: ветровая накачка, развитие нелинейной неустойчивости (Benjamin and Feir 1967, Su et al. 1982), пространственная (Van Dorn and Pazan 1975) или дисперсионная (Rapp and Melville 1990) фокусировка волновой энергии, а так же воздействие дна. Хотя перечисленные механизмы принципиально отличаются физически, все они приводят к росту крутизны волны, которая, при превышении критической величины, вызывает обрушение. Среди различных методов, возможно наиболее широко распространенным является создание обрушающейся волны с помощью дисперсионной фокусировки, или, иначе говоря, частотной фокусировки волнового пакета. Данная статья посвящена подробному описанию и улучшению этого метода.

Метод частотной фокусировки использует дисперсионную природу гравитационных волн. Механический волнопродуктор начинает с генерации высокочастотных волн и со временем постепенно снижает частоту. Поскольку скорость распространения низкочастотных волн быстрее чем у высокочастотных, спустя некоторое время длинные волны нагоняют более короткие и происходит фокусировка энергии волнового пакета.

В наиболее простой форме данный метод был впервые предложен Longuet-Higgins (1974), хотя подобные способы ранее использовались для тестирования кораблей (Davis and Zarnick 1964). Используя выражение для групповой скорости на глубокой воде

$$C_g = \frac{g}{2\omega}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения и ω радиальная частота волны, несложно прийти к выводу что для того чтобы энергия всех генерируемых волн пересеклась на расстоянии x_b от волнопродуктора, частота генерируемой волны должна линейно понижаться со временем как (Longuet-Higgins 1974)

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{g}{2x_b}. \quad (2)$$

Этого принципа достаточно для создания некоей обрушающейся волны вблизи расстояния x_b от волнопродуктора, и для многих приложений этого достаточно.

Однако, при более тщательном изучении выявляются некоторые ограничения описанного метода. Во-первых, он не предоставляет контроля над фазой волны в точке фокусировки. Во-вторых, он действителен только в приближении глубокой воды и, в-третьих, он игнорирует нелинейные процессы, тогда как его целью является создание волны с повышенной нелинейностью. Ввиду перечисленных ограничений, хотя обрушающаяся волна может быть создана, её точная форма и расположение остаются не определенными.

Наиболее существенной и распространенной модификацией метода Longuet-Higgins (1974) является фазовая фокусировка (например Rapp and Melville 1990). Возвышение поверхности задается как суперпозиция линейных волн:

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(k_i x - \omega_i t), \quad (3)$$

где x – расстояние в направлении распространения волн, t – время, a_i – амплитуда волн, k_i – волновое число и ω_i – радиальная частота волн. Обычно выбирается диапазон частот наиболее подходящий для размеров экспериментального бассейна, и генерируемые частоты равномерно распределяются в рамках диапазона. Вне зависимости от выбора частот, ур.3 обеспечивает пересечение гребней всех волн в точке $(x, t) = (0, 0)$, что приводит к скачку возвышения поверхности и последующему обрушению волны. Для того чтобы получить соответствующую форму сигнала для волнопродуктора, достаточно рассчитать возмущение поверхности для координаты волнопродуктора x_w :

$$\eta(x_w, t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(k_i x_w - \omega_i t). \quad (4)$$

Уравнение 4 является простым и эффективным способом создания обрушающейся волны с улучшенным контролем над ее расположением. Такая форма изначального сигнала так же позволяет использовать полное дисперсионное соотношение

$$\omega^2 = gk \tanh(kh), \quad (5)$$

где h - глубина. Несмотря на популярность указанного метода в настоящее время, в нем по-прежнему остаются недостатки связанные с линейным подходом. Нелинейные процессы связанные с распространением таких пакетов детально обсуждаются ниже. Так же стоит заметить что в результате суммирования в ур.4, некоторые волны могут изначально превысить критическую крутизну, что усложняет выбор подходящих частот и накладывает существенное ограничение на максимальную амплитуду создаваемого волнового пакета. Более того, сигнал, созданный с помощью ур.4, не всегда плавно начинается и оканчивается нулем, что приводит к необходимости накладывать временное окно (например Duncan et al. 1994, Griffin et al. 1996).

Некоторые авторы писали о нелинейных поправках к частотно-модулированным волновым пакетам. Perlín et al. (1996) использовал слабо нелинейное дисперсионное соотношение

$$\omega^2 = gk \left(1 + \frac{(ak)^2}{4} \right), \quad (6)$$

для того чтобы учесть отклонение нелинейной фазовой скорости волны, C_{nonlin} , от ее линейного значения, C_{lin} :

$$C_{nonlin} = C_{lin} \left(1 + \frac{(ak)^2}{4} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Таким образом, если все частоты в волновом пакете созданы с одинаковой крутизной ak , суперпозиция их гребней в точке обрушения должна остаться неизменной. Однако, этот метод добавляет ограничение на форму создаваемого сигнала, не учитывает нелинейную модуляцию волнового пакета, а так же не учитывает тот факт что пакет сжимается и крутизна волн постепенно растет со временем.

Kuehnlein et al. (2002) предпринял более полный подход к нелинейной коррекции. Линейная теория была использована для получения «волновой информации» на всех стадиях распространения волнового пакета, после чего нелинейная коррекция менялась в зависимости от линейных свойств волн.

Обе работы (Perlín et al. 1996 и Kuehnlein et al. 2002), вводили нелинейную поправку на фазовую скорость распространения волн, но не брали в рассмотрение нелинейное изменение формы огибающей волнового пакета. С другой стороны, Dommermuth et al. (1988) ясно указал на то, что под воздействием нелинейной модуляции энергия пакета переносится вперед (во времени и пространстве). Этот эффект особенно заметен при крутых волнах, где он приводит к нарушению фокусировки и понижению амплитуды основной обрушающейся волны. Численное моделирование нелинейных волн (Dommermuth et al. 1988) было в состоянии воспроизвести описанный эффект. Но каким образом изначальный пакет должен быть изменен для восстановления фокуса осталось не определено.

Более того, при усложнении функции генерации изначального пакета, необходимо помнить, что для воссоздания сигнала, подаваемого на мотор волнопродуктора, к желаемой волновой форме должно быть приложено преобразование, связанное с гидродинамическими свойствами волнопродуктора (например, классическое решение проблемы волнопродуктора Havelock 1929). Такие преобразования обычно зависят от частоты, поэтому в практических целях необходимо сохранять информацию о частоте создаваемой волны.

2. Экспериментальная установка.

В данной работе использовался лабораторный бассейн с размерами 8,48 м в длину и 2,29 м в ширину. Средняя глубина воды поддерживалась на уровне 0,5 м. На одном из концов бассейна находился программируемый волнопродуктор, представляющий из себя движущуюся плоскость, закрепленную шарниром на дне. Для преобразования желаемой формы волны в соответствующий контрольный сигнал для мотора использовалась линейная теория волнопродуктора (Dean and Dalrymple 1984). Три датчика возвышения поверхности емкостного принципа (RBR WG-50), расположенные вдоль длины бассейна, были использованы для прослеживания эволюции волнового пакета. Точность измерения датчиков ± 2 мм, измерения производились с частотой 1000 Гц.

3. Новый метод генерации волнового пакета.

Далее предлагается новый метод создания волновых пакетов с дисперсионной фокусировкой, который решает некоторые проблемы существующих методов. Метод частично основан на базовой идее фокусировки энергии (Longuet-Higgins 1974). Как и в его методе, частота генерируемого волнового пакета в каждый момент времени должна удовлетворять следующему уравнению

$$\frac{\partial \omega(t)}{\partial k(t)} \equiv C_g = x_w / t, \quad (8)$$

где x_w - расстояние до точки фокуса и t время до момента фокуса. В данной работе место и время фокуса было определено как $x = 0$ и $t = 0$, таким образом x_w и t в ур.8 – отрицательные величины.

В добавок к фокусировке энергии, данный метод требует пересечения гребней всех созданных волн в точке фокуса, аналогично методам фазовой фокусировки. Таким образом, возвышение поверхности, создаваемое волнопродуктором описывается как

$$\eta(t) = A(t) \cdot \cos(k(t)x_w - \omega(t) \cdot t), \quad (9)$$

где $A(t)$ - произвольная амплитуда. Выбрав амплитуду как $A(t) = \varepsilon / k(t)$, где $\varepsilon = const$ – крутизна волны, становится возможно удерживать крутизну всех создаваемых волн на желаемом уровне. Это свойство позволяет максимизировать количество энергии передаваемое волнопродуктором волновому пакету, а так же позволяет вводить нелинейные поправки, зависящие от крутизны волны.

В приближении глубокой воды (т.е. $\omega^2 = gk$), используя ур.8, частота волны и волновое число могут быть выражены как функции времени: $k(t) = \frac{gt^2}{4x_w^2}$,

$\omega(t) = \frac{gt}{2x_w}$. Таким образом, используя ур.9, функция описывающая генерируемый волновой пакет выражается как

$$\eta(t) = \frac{4\varepsilon x_w^2}{t^2 g} \cos\left(-\frac{t^2 g}{4x_w}\right). \quad (10)$$

В ситуациях, когда приближение глубокой воды недействительно, необходимо использовать полное дисперсионное соотношение. Поэтому уравнение

$$\frac{\partial \sqrt{gk \tanh(kh)}}{\partial k} = \frac{x_w}{t} \quad (11)$$

должно быть решено численно для $k(t)$, после чего $\alpha(t)$ находится из ур.5. Полученные $k(t)$ and $\alpha(t)$, рассчитанные для каждого временного шага, подставляются в ур.9.

Уравнение 10 предлагает удобный способ вычисления функции генерации волнового пакета. Несмотря на простоту функции, предложенный метод сочетает в себе преимущества методов фокусировки энергии и методов фокусировки фаз волн. В отличие от различных методов суммирования (например, ур.4), крутизна волн в данном пакете легко контролируется, позволяя введение нелинейных поправок и максимизацию энергии волнового пакета. С другой стороны, метод сохраняет контроль над фазой волн, требуя пересечения гребней всех волн в точке фокуса.

4. Нелинейная модуляция волнового пакета.

Толстая сплошная линия на рис.1 иллюстрирует распространение волнового пакета, созданного с помощью описанного выше метода ($\varepsilon = 0.32$). Тогда как три верхние панели показывают экспериментальные измерения, на нижней панели изображено предположение о форме волнового пакета в точке фокуса η_3 , исходя из соображений линейной волновой теории. Для получения линейного решения, преобразование Фурье было приложено к временным рядам, измеренным в точке η_1 , после чего синусоидальные составляющие были численно распространены и суммированы. Как и предполагалось, линейное решение предсказывает образование большой одиночной волны в точке $t = 0$, однако, в реальности огибающая волнового пакета искривлена в сторону начала пакета (см. третья панель). Этот нелинейный эффект вызывает раздвоение фокуса, так как точка наложения гребней волн не совпадает с максимумом энергии волнового пакета. Далее кратко описываются нелинейная теория распространения волнового импульса, связанная с данным явлением, а так же предлагается соответствующая эмпирическая нелинейная поправка для ур.10.

Захаров и Шабат (1972) получили точное аналитическое решение кубического уравнения Шрёдингера для однонаправленного волнового импульса. Их решение предсказывает разложение импульса на некоторое число независимых солитонов, количество и форма которых зависит от начальных условий. Теоретический результат был подтвержден экспериментально и численно в работе Yuen и Lake (1975), и с тех пор считается одной из основ нелинейной теории волн. Однако, Dysthe (1979) и позже Lo and Mei (1985) заметили некоторые недостатки кубического подхода, в частности связанные с асимметричностью разложения волнового импульса, и предложили решать уравнение Шрёдингера более высокого порядка.

Численные решения (Lo and Mei 1985) показали что именно эти дополнительные члены уравнения вызывают наклон волнового пакета вперед, а так же приводят к снижению частоты волн около максимума, что в свою очередь приводит к ускоренному распространению пика энергии пакета. Это явление было впервые обнаружено в работе Feir (1967), а так же дополнительно подтверждено в эксперименте описанном далее.

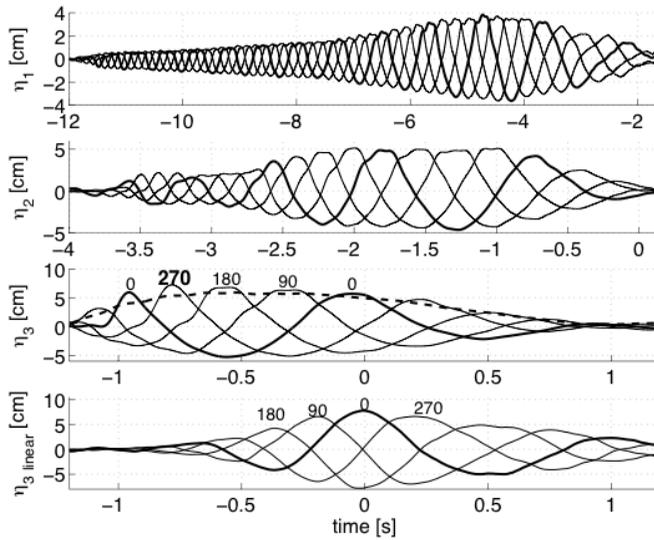


Рисунок 1. Эволюция четырех дисперсионных волновых пакетов с точкой фокуса в $\eta_3(t=0)$. Возвышения поверхности η_1, η_2 и η_3 были измерены при $x = -408.4$ см, -109.6 см и 0 см соответственно (координата волнопродукта $x_w = -469.0$ см). Нижняя панель показывает линейное решение в точке $x = 0$. Толстая сплошная линия показывает волновой пакет без фазового сдвига, т.е. $\varphi = 0^\circ$, тогда как три тонкие линии соответствуют $\varphi = 90^\circ$, $\varphi = 180^\circ$ и $\varphi = 270^\circ$. Пунктирная линия показывает огибающую кривую, усредненную по всем четырем волновым пакетам.

Для более полной иллюстрации нелинейности, в данной работе был проведен ряд дополнительных экспериментов, в которых рассматривался волновой импульс формы

$$\eta(t) = a \cdot e^{\frac{-(t-t_0)^2}{2\sigma^2}} \cdot \cos(kx_w - \omega t), \quad (12)$$

представляющий из себя монохроматическую волну с наложенным на нее гауссианом. Было исследовано несколько импульсов с различными амплитудами a , оставляя другие параметры неизменными. Как и предполагалось в рамках нелинейной теории, было наблюено ускоренное распространение пика импульса, по сравнению с линейным предположением (ур.1). Причислив это ускорение к сдвигу центральной частоты волны $(\omega - \omega_0)/\omega_0$, где ω_0 – начальная центральная частота импульса, результаты эксперимента показаны как функция безразмерного развития волны $(ak)^2 kx$ на рис.2.

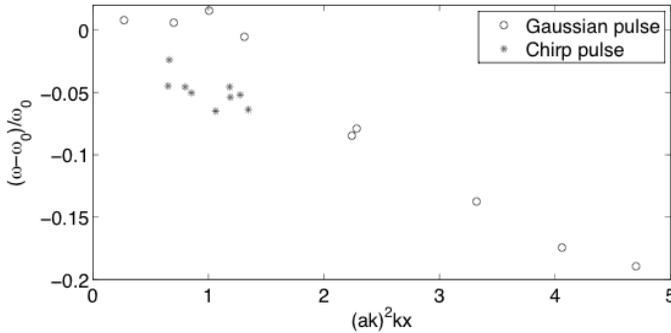


Рисунок 2. Нелинейное снижение частоты вблизи пика волнового пакета показано как функция безразмерного развития волны для монохроматических (Gaussian) и дисперсионных (Chirp) волновых пакетов.

Нелинейные свойства дисперсионного волнового пакета (рис.1), а именно описанный сдвиг его пика, похожи на свойства монохроматического импульса (ур.11). Однако, поскольку в дисперсионном пакете присутствует широкий диапазон частот, определение центральной частоты становится неоднозначным. Для сравнения, здесь для этих целей использовался период волны между подошвами до и после основной обрушающейся волны, T_p . Полученный таким образом сдвиг частоты так же показан на рис.2. В данном случае сдвиг частоты происходит несколько быстрее, возможно это связано с присутствием более высоких частот в волновом пакете, величина безразмерного развития для которых значительно больше, что в свою очередь приводит к более сильному развитию нелинейности.

После тестирования нескольких экспериментальных подходов, было обнаружено, что поправку на сдвиг частоты лучше всего вводить в форме сдвига фазы φ начального сигнала. Таким образом ур.9 становится

$$\eta(t) = A(t) \cdot \cos(k(t)x_w - \omega(t) \cdot t + \varphi), \quad (13)$$

а ур.10

$$\eta(t) = \frac{4\epsilon x_w^2}{t^2 g} \cos\left(-\frac{t^2 g}{4x_w} + \varphi\right). \quad (14)$$

Связь между снижением частоты и сдвигом фазы можно получить из линейных соотношений

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{-1}{1 + \frac{360^\circ}{\varphi} \frac{4\pi x_b}{T_p^2 g}}. \quad (15)$$



Рисунок 3. Фотография обрушающейся волны в момент прохождения точки фокуса.

Таблица 1. Приблизительные оптимальные значения фазового сдвига φ в зависимости от крутизны волны ε и расстояния от волнопродуктора.

$\varepsilon \backslash x_b$	0.19	0.23	0.28	0.32
3.60 м	90°	180°	180°	180°
4.15 м	90°	180°	180°	180°
4.69 м	90°	180°	180°	270°
5.24 м	90°	180°	180°	270°
5.79 м	90°	180°	270°	270°

В рамках линейной волновой теории, физический смысл сдвига φ заключается в том что не гребни, а другие фазы волн пересекутся в точке фокуса. Например при $\varphi = 180^\circ$ в точке фокуса должна образоваться глубокая подошва. Три дополнительных эксперимента были проведены для $\varphi = 90^\circ, 180^\circ$ and 270° и показаны тонкими сплошными линиями на рис.1. Из сравнения волновых пакетов с различными сдвигами фазы видно что он не имеет воздействия на форму огибающей волнового пакета. Это свойство позволяет экспериментально подобрать оптимальный сдвиг фазы так, чтобы гребень волны совпадал с пиком энергии волнового пакета. В частном случае, показанном на рис.1, оптимальный сдвиг фазы $\varphi = 270^\circ$, что приводит к повышению амплитуды обрушающейся волны на 26% в точке $x = 0, t = -0.8$ (см фотография на рис.3), про сравнению с волной при $\varphi = 0^\circ, x = 0, t = 0$. В общем случае, величина оптимального сдвига фазы φ зависит от крутизны волн ε и от расстояния от волнопродуктора до точки фокуса x_b . Таблица 1 дает приблизительные значения $\varphi (\pm 45^\circ)$ для диапазона параметров доступных в данном лабо-

раторном бассейне. Фазовый сдвиг увеличивается как с крутизной, так и с расстоянием до точки фокуса. При малых величинах крутизны $\varepsilon < 0.15$ в данных экспериментах нелинейность не была зафиксирована, т.е. $\varphi = 0$. С другой стороны, при значениях x_f выше исследованных, ожидается дальнейший рост φ . В практических целях, вне диапазона параметров данных в таблице 1, рекомендуется воспроизводить анализ произведенный на рис.1, т.е. измерение возвышения поверхности в точки фокуса и последующий поиск оптимального сдвига фазы.

5. Выводы.

Основной результат данной работы заключается в формулировке нового метода для создания обрушающихся волн в лабораторном бассейне. Метод прост в использовании и предлагает решение некоторых недостатков ранее существовавших подходов. Преимущества предложенного метода становятся особенно заметными, когда необходимо создать обрушающуюся волну с максимально возможной амплитудой.

В приближении глубокой воды, функция генерации волнового пакета дана в ур.14, тогда как при конечной глубине остается необходимость численного решения ур.11. Идея метода заключается в сочетании двух ранее известных подходов: фокусировки энергии и фокусировки фаз волн, а так же в добавлении фазового сдвига в качестве поправки на нелинейность. Необходимость нелинейной поправки связана с нелинейной модуляцией волнового пакета, которая приводит к сдвигу пика энергии пакета и таким образом нарушает фокусировку. Значения фазового сдвига были найдены экспериментально и даны в Таблице 1.

Литература

1. Davis, M.C., and E.E. Zarnick, 1964: Testing ship models in transient waves, *Proceedings of the 5th Symposium on Naval Hydrodynamics*.
2. Dean, R.G., and R.A. Dalrymple, 1984: Water wave mechanics for engineers and scientists, *Prentice-Hall, Inc.*, Englewood Cliffs, New Jersey.
3. Dommermuth, D.G., D.K.P. Yue, W.M. Lin, R.J. Rapp, E.S. Chan, W.K. Melville, 1988: Deep-water plunging breakers: a comparison between potential theory and experiments, *J Fluid Mech.*, 189, 423-442.
4. Duncan, J.H., V. Philomin, M. Behres and J. Kimmel, 1994: The formation of spilling breaking water waves, *Phys. Fluids*, 6, 2558.
5. Dysthe, K.B, 1979: Note on a modification to the nonlinear Schrödinger equation for applications to deep water waves, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 369, 105-114.
6. Feir, J.E., 1967: Discussion: some results from wave pulse experiment, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 299, 54-58.
7. Griffin, O.M., R.D. Peltzer, H.T. Wang, 1996: Kinematic and dynamic evolution of deep water breaking waves, *J. Geophys. Res.*, 101 C7, 16515-16531.
8. Havelock, T.H., 1929: Forced surface waves on water, *Phil. Mag.*, F8, 569.
9. Kuehnlein, W.L., G.F. Clauss, and J. Hennig 2002: Tailor made freak waves within irregular seas, *Proceedings of OMAE'02, 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE2002-28524, Oslo, Norway.
10. Lo, E. and C.C. Mei, 1985: A numerical study of water-wave modulation based on a higher-order nonlinear Schrödinger equation, *J. Fluid Mech.*, 150, 395-416.

11. Longuet-Higgins, M.S., 1974: Breaking waves in deep or shallow water, *Proc. 10th Symp. Naval Hydro.*, Cambridge, Mass., ed. R. D. Cooper and S. W. Doroil, pp. 597-605. Government Printing Office, Washington.
12. Melville, W. K., 1983: Wave modulation and breakdown, *J. Fluid Mech.*, 128, 489-506.
13. Nepf, H. M., C. H. Wu, and E. S. Chan, 1998: A comparison of two- and three-dimensional wave breaking, *J. Phys. Oceanogr.*, 28, 1496-1510.
14. Perlin, M., J. He, and L.P. Bernal, 1996: An experimental study of deep water plunging breakers, *Physics of Fluids*, 8, 2365-2374.
15. Rapp, R.J., and W.K. Melville, 1990: Laboratory measurements of deep-water breaking waves. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 331, 735-800.
16. Su, M.Y., M. Bergin, P. Marler, and R. Myrick, 1982: Experiments on nonlinear instabilities and evolution of steep gravity-wave trains. *J. Fluid Mech.* 124, 45-72.
17. Van Dorn, W.G., and S.E. Pazan, 1975: Laboratory investigation of wave breaking. Part ii: Deep water waves. *Advanced Ocean Engng Lab. Rep.*, 71, 75-21, Scripps Institution of Oceanography.
18. Yuen, H.C. and B.M. Lake, 1975: Nonlinear deep water waves: Theory and experiment, *Phys. Fluids*, 18, 956-960.
19. Zakharov, V.E. and A.B. Shabat, 1972: Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 61, 118.

ПРОФИЛИ СДВИГОВОЙ СКОРОСТИ И ВЗВЕСИ В СГОННО-НАГОННОМ ТЕЧЕНИИ

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований профилей осредненных и турбулентных характеристик полей скорости и концентрации взвеси в системе стратифицированных течений. Выявлены автомодельные свойства вертикальных распределений сдвиговой скорости от дна до открытой поверхности воды в системе течений, включающей придонный плотностной поток и сгонно-нагонное течение, индуцированное ветром. Предложена и проверена функция распределения сдвиговой скорости, которая применена в расчетах профилей коэффициента турбулентного обмена, скорости течения и концентрации взвеси. Полученные теоретические распределения указанных параметров сопоставлены с профилями, найденными по данным натуральных измерений.

Введение

Распространение естественных и техногенных примесей в системах стратифицированных течений в морях и озерах в значительной мере обеспечивается турбулентной диффузией взвесей и растворенных веществ. Прогноз распределений примесей требует разработки математических моделей переноса взвешенных частиц, растворенных солей и газов в течениях, входящих в конкретную систему. Под системой течений понимается совокупность потоков, развивающихся на разных глубинах и взаимодействующих между собой. К ключевым элементам в моделях переноса импульса и примесей в системах течений относятся такие характеристики обмена, как турбулентная вязкость и сдвиговая скорость. При отсутствии данных о распределении скорости течения в модель переноса приходится включать полуэмпирические распределения указанных ключевых параметров, которые, как правило, имеют специальный вид для конкретных типов систем течений [1]. Исследованию вертикальных распределений сдвиговой скорости и концентрации взвеси в системе течений со сгонно-нагонным и придонным потоками, посвящена данная работа.

Объект и методика исследований

Анализируемые ниже результаты получены 19.09.2007 г. в Петрозаводской губе Онежского озера [2]. Выполнялась серия зондирований на вертикали, расположенной в центральной части губы. Регистрации профилей скорости течения по глубине водоема с дискретностью 10 мин при шаге по вертикали 0,5 м велись доплеровским профилографом RDCP-600 (Aanderaa). Прибор RDCP-600 в режиме донной постановки обеспечивал также регистрацию отклонения свободной поверхности. Одновременно зондом RCM 9 LW (той же фирмы) измерялись профили скорости U , температуры T и электропроводности C_k , концентраций кислорода O_2 и взвеси S . Точности измерений U , T , C_k , O_2 и S составляли 0,5 см/с, 0,02°C, 0,02 мСм/см, 0,25 мг/л и 0,4 NTU. Параллельно анеморумбометром М-63М измерялась скорость ветра с точностью $\pm 0,25$ см/с.

Распределения параметров течения и состава воды

В серии зондирований на срочной станции было получено 34 распределения скорости U , каждое из которых включало в себя дрейфовый поток вверх по заливу, компенсационное и придонное течения из губы [2]. Средние скорости составляли 30 см/с для дрейфового и 6 и 8 см/с для компенсационного и плотностного течений. Одновременно со съемкой каждого третьего профиля скорости (с шагом 30 мин) измерялись распределения T , C_k , O_2 и S . Средняя за время серии наблюдений разность температур воды у поверхности и у дна составляла 2.5 °С. Представление о структуре течения дают профили U , $\delta\rho$ и S (рис. 1).

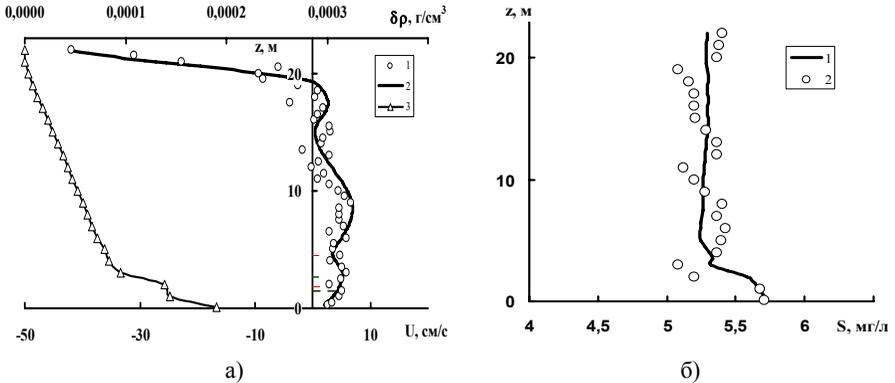


Рис.1. а) 1- измеренное распределение скорости течения $U(z)$, 2- теоретическое распределение $U(z)$, 3- изменения плотности воды $\delta\rho$ с глубиной; б) 1 – теоретическое распределения концентрации взвешенных частиц S , 2- измеренное распределение S .

Сплошная кривая $U(z)$ соответствует теоретическому распределению [2], полученному путем решения уравнения динамики течения с применением предложенного нами выражения коэффициента турбулентного обмена вида

$$K_u = (u_\tau + \sqrt{e_{fc}})\ell / \left(1 + \frac{\alpha_1 N^2 \ell^2}{u_\tau^2 + e_{fc}} \right), \quad (1)$$

где $u_\tau = \ell |\partial_z U|$ - сдвиговая скорость;

$e_{fc} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot \bar{U}_{FD}^2 \cdot \left(1 - \left| \partial_z U / (\partial_z U)_{MAX} \right| \right)$ - оценка энергии вертикального турбулентного обмена в слоях воды с градиентами скорости $\partial_z U$, близкими к нулевым. Здесь \bar{U}_{FD} - скорость, средняя по всей глубине;

$N^2 = (g / \rho)(-\partial_z \rho)$ - частота плавучести, ρ - плотность воды;

$\ell = \kappa z / (1 + (\kappa z / L))$ - путь смешения для придонного слоя ($\kappa=0,4$, L - интегральный масштаб турбулентности [1]) и аналогично для приповерхностной области, но с ростом ℓ с глубиной.

Проверка правильности определения K_u по (1) проводилась путем сравнения измеренных и теоретических распределений концентрации взвеси, полученных из уравнения ее диффузии с применением K_u из (1). Важная практически задача получения распределения скорости течения с учетом влияния внутренней волны на турбулентную вязкость должна решаться путем определения K_u из (1) в отсутствие информации о профиле скорости.

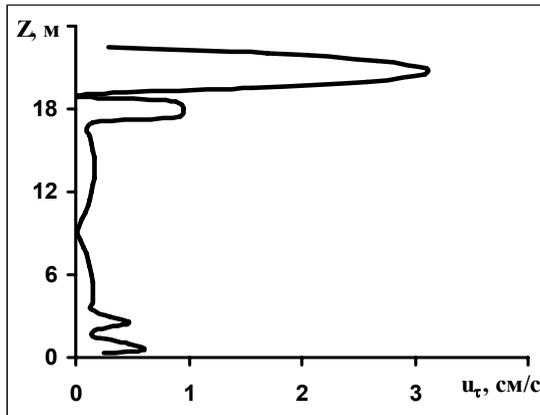


Рис.2. Теоретическое вертикальное распределение сдвиговой скорости u_τ .

Если профиль $U(z)$ не задан, то функции e_{ic} и u_τ , входящие в K_u по (1), определяются по найденным и проверенным авторами для сгонно-нагонного течения полуэмпирическим выражениям. При этом распределение плотности воды считается известным по данным измерений. Полуэмпирические выражения e_{ic} и u_τ получены с учетом выявленных элементов подобия распределений этих параметров. Над уровнем жидкого грунта при $z_{lg} \leq z \leq z_{mc}$ профиль u_τ принимается квазилинейным (2), что типично для придонных течений. Под жидким грунтом понимается придонный пикноклин, высота которого Z_{lg} соответствует положению максимума градиента плотности в придонном слое. Здесь z_{mc} - уровень максимума скорости компенсационного течения. В области термоклина и выше, в дрейфовом течении, при $z \geq z_{mc}$ на профилях u_τ устойчиво воспроизводятся два максимума (рис. 2).

Такая (выявленная впервые) особенность профиля u_τ наилучшим образом учитывается путем применения суммы двух логорифмически-нормальных распределений в соответствии со следующим выражением

$$u_\tau = \begin{cases} u_\tau^* \left(1 - \frac{z - z_{lg}}{z_{mc} - z_{lg}} \right), & z \leq z_{mc} \\ \sum_{i=1}^2 u_i^* \frac{z_i^*}{z} \exp \left(\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2} \right) \left(\ln \frac{z}{z_i^*} \right)^2 \right), & z \geq z_{mc} \end{cases} \quad (2)$$

Для величины e_{fc} обнаружена квазиинвариантность в основной толще течения. Это позволило заменить функцию $e_{fc}(z)$ ее средним по вертикали значением \bar{e}_{fc} . Анализ зависимости \bar{e}_{fc} от устойчивости стратификации \bar{N}_{FD} с учетом пропорциональности скоростей, средних по глубине \bar{U}_{FD} и приповерхностных U_{ns} , позволил получить выражение вида

$$\bar{e}_{fc} = 0,017 \cdot U_{ns}^2 (104 \left(\bar{N}_{FD} / N_{qh} \right) - 1)^2 \quad (3)$$

Здесь \bar{N}_{FD} и N_{qh} - частоты плавучести средние по всей глубине и по верхнему квазиоднородному слою на профиле плотности. Приповерхностная скорость течения $U_{ns} = U|_{z=H-0,5m}$ достаточно надежно оценивается по выражению из работы [3] по данным о возвышении уровня воды и топографии водоема.

Все параметры из (2), (3) параметризованы функциями возвышения уровня и характеристик распределения плотности воды. Предложенная методика проверена в расчетах профилей концентрации взвешенных частиц и скорости течения (рис 1).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-05-01146-а).

Основные результаты.

1. Выявлены автомоделные свойства вертикальных распределений сдвиговой скорости от дна до открытой поверхности воды в системе течений, включающей придонный плотностной поток и сгонно-нагонное течение, индуцированное ветром.

2. Предложенная функция распределения сдвиговой скорости проверена в расчетах профилей коэффициента турбулентного обмена, скорости течения и концентрации взвеси.

Литература

1. Самолюбов Б. И. Плотностные течения и диффузия примесей. М.: Изд. ЛКИ. 2007.
2. Самолюбов Б.И., Иванова И.Н. Влияние волновых процессов на структуру стратифицированных течений в заливе. Известия РАН. Серия физическая, 2010 г, т.74, № 12, стр.1770-1774.
3. Preusse M., Peeters F., Lorke A. Internal waves and the generation of turbulence in the thermocline of a large lake // J. Limnol. Oceanogr, 55(6), 2010, 2353–2365. doi:10.4319/lo.2010.55.6.2353.

ОБЛАКА МУТНОСТИ В СИСТЕМАХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ

Б.И. Самолюбов, Н.А. Перескок

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

На базе данных натурных измерений в озерах и водохранилищах выполнен статистический анализ характеристик облаков мутности. Рассмотрены облака, зарегистрированные комплексно с распределениями параметров течений и состава воды. Обнаружено 60 облаков мутности в различных системах стратифицированных течений. Выявлены распределения характеристик облаков по частоте их появления и диапазоны наименее вероятных параметров облаков. Получены зависимости относительного вертикального размера облаков мутности и интенсивности турбулентности в них от гидродинамической устойчивости в различных системах стратифицированных течений.

Введение

Облака мутности в морях, озерах и водохранилищах представляют собой широко распространенное явление, которое часто наблюдается в турбулентных стратифицированных течениях при их взаимодействии с другими потоками, а так же с крупномасштабными вихрями и внутренними волнами [3-8]. Такие сочетания гидродинамических эффектов типичны для систем стратифицированных течений. Облако мутности – это область в толще течения, которая выделяется на фоне окружающих вод за счет повышенной концентрации взвешенных частиц (рис. 1). Под системой стратифицированных течений понимается совокупность потоков, развивающихся на разных глубинах от поверхности до дна и взаимодействующих между собой. Входящие в эти системы придонные, приповерхностные течения и струи, распространяющиеся под слоями вод меньшей плотности, активно изучаются для решения проблем геофизической гидродинамики и задач, связанных с ее практическими приложениями. К важнейшим прикладным задачам относится разработка методов прогноза формирования качества воды. Параметры качества воды в облаках мутности, как правило, существенно отличаются от аналогичных характеристик окружающих вод.

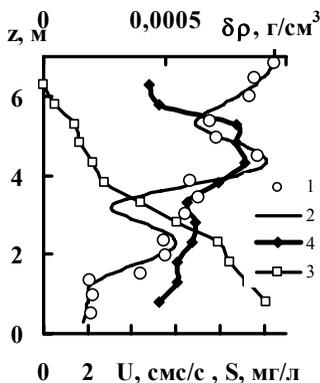


Рис. 1. Характерные профили скорости течения U (измеренной 1 и теоретической 2), концентрации взвеси S с облаками мутности, и увеличения плотности воды с глубиной $\delta\rho$ 3, комплексно измеренные в Можайском водохранилище (на разрезе в июле 1996 г.) [2].

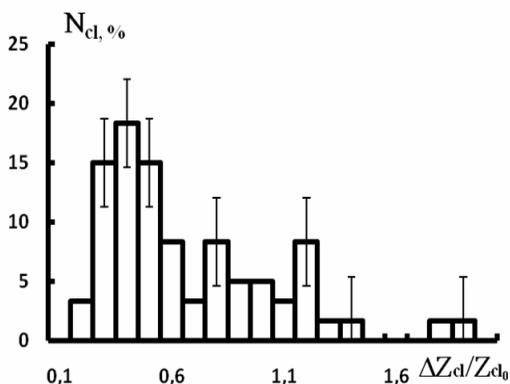


Рис. 2. Частота появления облаков в зависимости от отношения их вертикального размера к высоте подъема над уровнем дна.

Несмотря на важность прогноза развития облаков мутности с учетом порождающих их гидродинамических процессов, теория этих явлений остается недостаточно развитой. Такое положение обусловлено не только сложностью механизмов отдельных процессов, но и спорадичностью появления облаков. Решение данной проблемы возможно лишь при сочетании натурных исследований, статистического анализа результатов измерений и математического моделирования. В связи с этим цели данной работы были сформулированы следующим образом: выявление закономерностей формирования и развития облаков мутности в системах стратифицированных течений; оценка влияния облаков мутности на распределение характеристик состава воды; разработка методов расчета параметров облаков мутности.

Диапазоны наивероятнейших значений параметров облаков.

Частота появления облаков N_{cl} рассматривается ниже (рис. 2) в виде зависимости N_{cl} от отношения их вертикального размера ΔZ_{cl} к высоте подъема над уровнем дна Z_{cl} .

Анализируя частоту появления облаков, можно заметить, что чаще всего встречаются облака со значением $\Delta Z_{cl}/Z_{cl}$ в промежутке от 0,3 до 0,5 ($N_{cl} = 50\%$).

К этой основной группе относятся, преимущественно, облака расположенные вне придонного потока, когда размер облака в 2-5 раз меньше высоты его подъема над уровнем дна. Дополнительные максимумы с $N_{cl} = 20-30\%$ имеют место при $\Delta Z_{cl}/Z_{cl} = 0,8$ и 1,2. Эти группы включают, как правило, облака, находящиеся в придонном потоке.

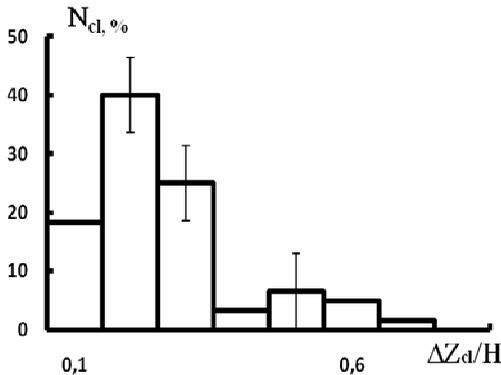


Рис. 3. Частота появления облаков в зависимости от отношения их вертикального размера к полной глубине.

Несколько иной характер носит зависимость частоты появления облаков в зависимости от отношения их вертикального размера к полной глубине (рис. 3). Из анализа частоты появления облаков по отношению к $\Delta Z_{cl}/H$, следует, что в интервале $\Delta Z_{cl}/H$ от 0 до 0,3 лежат порядка 85% облаков. К этому интервалу относятся облака, находящиеся в придонном слое или еще не поднявшиеся в приповерхностный слой. При значениях $\Delta Z_{cl}/H$, превышающих 0,3, появление облаков маловероятно. К этим облакам относятся в основном пики мутности, уже поднявшиеся в приповерхностный слой.

Зависимости характеристик облака от устойчивости

В данной работе получена зависимость функции $\Delta Z_{cl}/Z_{cl}$ (отношение размера облака к высоте его подъема от дна) от числа Ричардсона Ri в облаке. Число Ричардсона, характеризующее локальную гидродинамическую устойчивость, определяется по формуле

$$Ri = g \partial_z \rho / \rho (\partial_z U)^2 .$$

Было выявлено три типа зависимостей: две спадающих и одна возрастающая (рис. 4).

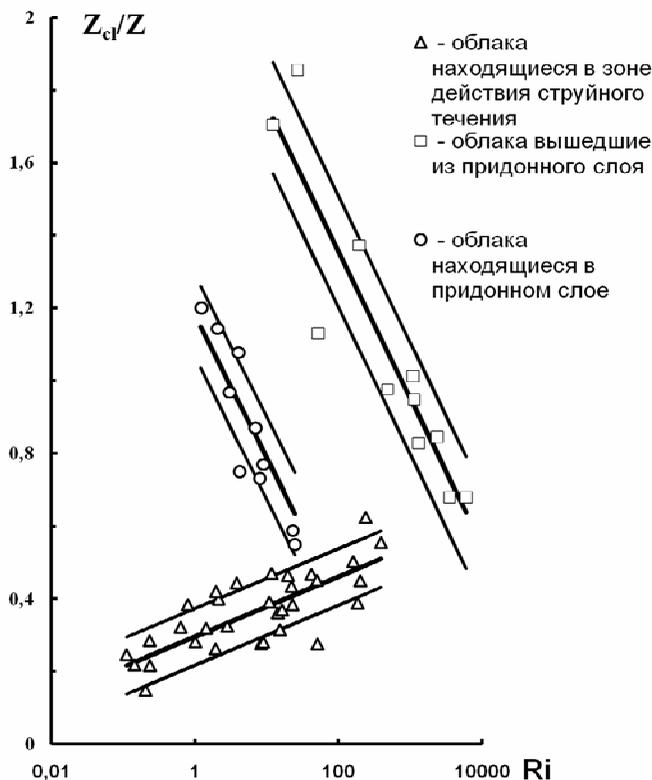


Рис. 4. Зависимость $\Delta Z_{cl}/Z_{cl}$ (отношение размера облака к высоте его подъема над уровнем дна) от гидродинамической устойчивости Ri в облаке.

Спадающие зависимости соответствуют облакам, находящимся в придонном слое и облакам, вышедшим из придонного слоя. Возрастающая зависимость соответствует облакам мутности в зоне действия струйного течения.

Для второй группы относительные размеры облака пропорциональны отношению интегральной устойчивости придонного потока к локальной устойчивости течения в зоне действия облака (Ri_0/Ri). В соответствии с выявленной зависимостью (рис. 5) с одной стороны рост локальной устойчивости течения приводит к уменьшению относительного размера облака за счет гашения турбулентности под влиянием стратификации. С другой стороны рост интегральной устойчивости придонного потока, которая пропорциональна толщине течения, способствует увеличению размеров облака, так как снимает ограничения для расширения его границ за счет турбулентной диффузии. Эта зависимость усиливается с повышением соотношения устойчивостей. Данная особенность обусловлена уменьшением разно-

сти плотностей воды в пределах облака с ростом высоты над уровнем дна и одновременно с ослаблением связи параметров облака с устойчивостью придонного потока по мере удаления от него.

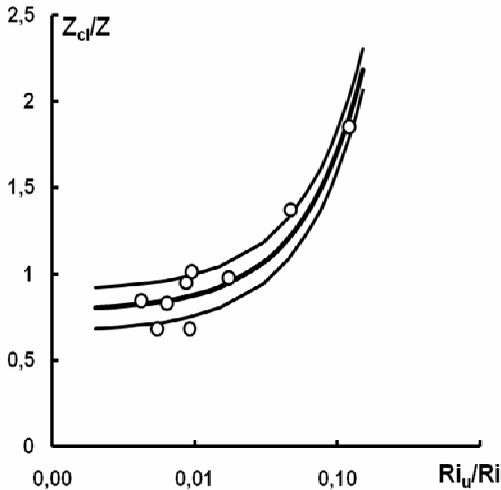


Рис. 5. Зависимость относительных размеров облаков мутности от соотношения интегрального и локального чисел Ричардсона для облаков, вышедших из придонного потока.

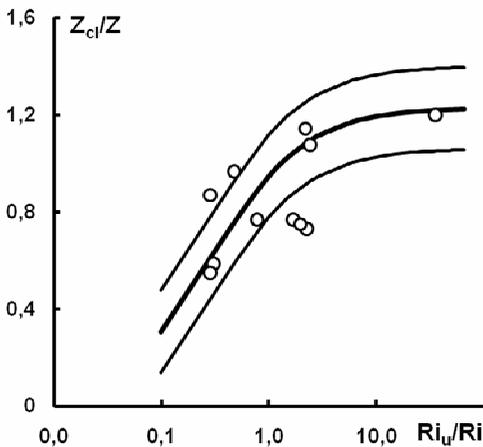


Рис. 6. Зависимость относительных размеров облаков мутности от соотношения интегрального и локального чисел Ричардсона для облаков мутности в придонном потоке.

Для третьей группы, относящейся к облакам находящимся в придонном потоке, зависимость относительного размера облака от указанного отношения чисел Ричардсона отличается ее ослаблением в области повышения соотношения устойчивостей. Такой характер выявленной зависимости (рис. 6) связан со стабилизацией процессов обмена в придонном потоке по мере роста его устойчивости и, соответственно, в самом облаке.

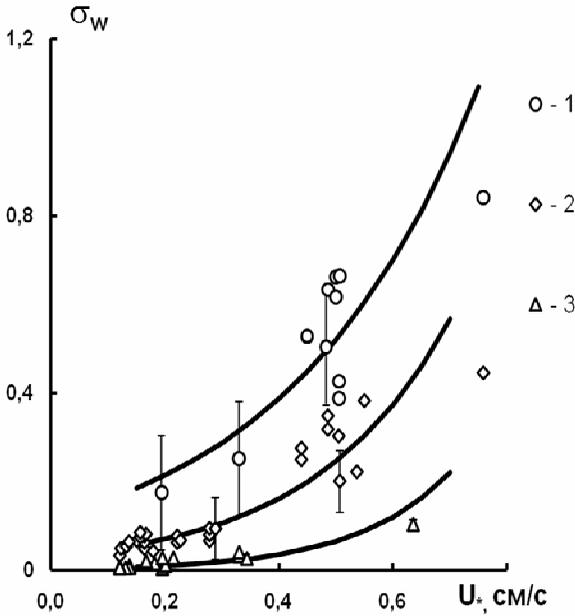


Рис. 7. Связь стандарта вертикальной компоненты пульсаций скорости течения $(\sigma_w)_{cl}$ в облаке с динамической скоростью U^* . Для кривой 1: $\sigma_w/U^* = 0,75 - 1,35$; для кривой 2: $\sigma_w/U^* = 0,21 - 0,74$; для кривой 3: $\sigma_w/U^* = 0,01 - 0,20$.

В качестве энергетической характеристики облака мутности можно использовать квадрат стандартного отклонения вертикальной компоненты пульсации скорости течения в зоне существования облака. Стандартное отклонение оценивалось по полуэмпирической формуле, предложенной в работе [1]

$$\sigma_w \cong 0.04\overline{U} / (1 + 0.4Ri_u)^{0.5}$$

Поскольку по нашей гипотезе облака генерируются за счет турбулентности, развивающейся у дна, то представляет интерес исследование связи величин стандартного отклонения вертикальной компоненты пульсации скорости течения с динамической скоростью. Динамическая скорость оценивалась по выражению, полученному в работе [2] для придонного плотностного потока:

$$U_* = 0.5(0.0025 + 0.0003Ri_u)^{1/2}\overline{U}$$

Из сравнения величин σ_w и U_* (рис. 7) следует, что вертикальная компонента пульсации скорости в облаке экспоненциально возрастает с увеличением динамической скорости. Это подтверждает гипотезу о формировании облаков мутности под влиянием вихреобразований генерируемых у дна. Удалось выделить три кривых, соответствующих следующим диапазонам значений соотношения σ_w/U_* : 0,01-0,20, 0,21-0,74, 0,75-1,35.

Заключение

1. Выявлено 60 облаков мутности в различных системах стратифицированных течений по данным измерений на 6 полигонах.
2. Получены распределения характеристик облаков по их размерам и частоте появления. Выделены диапазоны наиболее вероятных параметров облаков.
3. Получена обобщенная зависимость относительного вертикального размера облаков мутности от гидродинамической устойчивости течения. Установлено, что
 - а) для облаков мутности в струях имеет место рост толщины облака с увеличением устойчивости течения;
 - б) для облаков в придонном течении и других зонах вне струй выявлена спадающая зависимость от устойчивости течения в облаке.
4. Выявлена пропорциональность размера облака и соотношения устойчивостей придонного потока и течения в облаке.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-05-01146).

Литература

1. Анисимова Е.П., Петров В.В., Сперанская А.А. Исследование поля скорости в потоках сложной структуры // Вестник МГУ, сер. 3, 1992. Т. 33, №5, С.63.
2. Самолубов Б. И. Плотностные течения и диффузия примесей. М.: Изд. ЛКИ. 2007. 352 с.
3. Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. // Л.: Гидрометиздат. 1982. 256 с. М о н и н А. С, Каменкович В. М., Корт В. Г. Изменчивость мирового океана.— Л.: Гидрометеиздат, 1974, 262 с.
4. Woods J. D. Wave-induced shear instability in the summer thermocline.—J. Fluid Mech., 1968, vol. 32, P. 4, p. 792—800.
5. Самолубов Б.И. Придонные стратифицированные течения // М. «Научный мир», 1999. 464с.
6. Самолубов Б.И. Турбулентная диффузия в локальных сдвиговых слоях придонного стратифицированного течения с взвешенными частицами. // Изв. АН СССР. Сер.Физика атмосф. и океана. 1986. Т. 22 № 5. С. 513-524.
7. Копелевич О.В., Буренков В.И., Маштаков Ю.Л., Носенко Н.М. Некоторые результаты исследований рассеяния и поглощения света морской водой в Бенгальском заливе. // Гидрофизические и оптич. иссл. в Инд. океане. М.: Наука. 1975. С. 67-70.
8. McCave I. Particulate size spectra, behavior and origin of nepheloid layers over the Nova Scotian Continental Rise. // J. Geophys. Res. 1983. № 12. P. 7647-7666.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЧВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ГОРНО-
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА «ПЕЧЕНГАНИКЕЛЬ» НА
КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

Самсонова В.В., Копщик С.В., Перов Н.С., Родионова В.В.

*Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова,
кафедра магнетизма*

Введение

При работе комбинатов, связанных с добычей и переработкой тяжелых металлов, в атмосферу выбрасывается большое количество пыли, содержащей эти металлы и их соединения. Такие выбросы оказывают негативное воздействие на экосистемы и могут приводить к деградации почв и формированию техногенных пустынь [1, 2].

Перед многими индустриальными странами стоят проблемы рекультивации загрязненных территорий. В первую очередь это связано с потребностями постоянно развивающегося градостроительства, нуждающегося в расширении жизненного пространства, часто сопровождаемого разрушением «зеленых поясов» - лесных и парковых территорий. Очистка загрязненных земель и возможность их повторного использования важны не только для борьбы с загрязнением окружающей среды, но и для сокращения масштабов уничтожения живой природы.

Для исследования загрязненных территорий (обнаружения загрязнений и характеристики их уровня) используют, помимо химических и биологических, магнитные методы измерения. Они могут дать подробную информацию о составе, форме и размере частиц ферромагнитных загрязнений (наиболее часто встречающиеся - окиси железа) [3, 4]. Магнитные методы так же являются дешевыми и быстрыми в проведении по сравнению с химическими анализами образцов почв. Преимущество магнитной диагностики также в том, что ее можно проводить не только в лаборатории, но и непосредственно на месте исследования.

Исследование магнитных свойств почв, индикация загрязнения - первый этап на пути решения экологической проблемы. На этом этапе важно проанализировать и сопоставить магнитные свойства образцов экологических объектов с их химическими и биологическими свойствами. Зная параметры связи магнитных свойств и типа загрязнения, можно оперативно определить методы эффективного восстановления территории.

Образцы, методика измерений и постановка задачи

В данной работе были исследованы образцы иллювиально-железистых подзолов Кольского полуострова [2, 5], взятые на разном расстоянии (1, 8, 41 км) от горно-металлургического комбината «Печенганикель» (Рис. 1) из органогенного слоя (подстилка) или минерального (иллювиального) горизонта. Каждый образец был подготовлен одним из четырех способов: размол на лабораторной мельнице со стальными ножами, просев через алюминиевое сито с отверстиями размерами 2 мм, размол на мельнице со стальными шарами, размол на мельнице с агатовыми шарами. Размол органогенных образцов осуществлялся с целью их гомогенизации.

Целью данной работы было установить связь между магнитными свойствами проб почв, способом пробоподготовки и расстоянием до источника загрязне-

ния. В данной работе были исследованы: влияние метода предварительной обработки на магнитные свойства образцов; зависимость магнитных свойств образцов почв от расстояния до комбината. Измеренные температурные зависимости магнитного момента образцов почв позволили сделать предположения о типе ферромагнитных включений в образцах почв.



Рис.1. Горно-металлургический комбинат «Печенганикель». Кольский п-ов, Мурманская обл., Печенгский р-он, г. Заполярный и пос. Никель (googlemaps).



Рис.2. Образцы почв: слева – исходный материал, справа – упакованный для измерений.

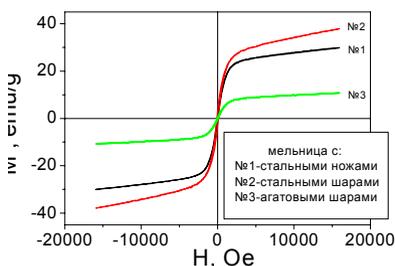


Рис.3. Петли гистерезиса образцов почв, обработанных разными методами:

- № 1 – стальными ножами,
- № 2 – стальными шарами,
- № 3 – агатовыми шарами.

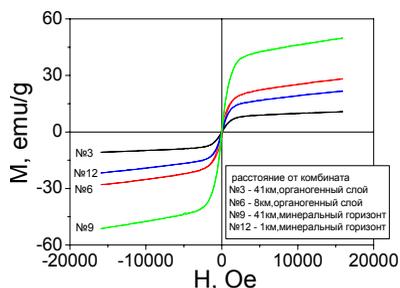


Рис.4. Петли гистерезиса образцов почв, обработанных на мельнице с агатовыми шарами, взятых на разных расстояниях от комбината и различных глубинах:

- № 3 – 41 км, органогенный слой,
- № 6 – 8 км, органогенный слой,
- № 9 – 41 км, минеральный горизонт,
- № 12 – 1 км, минеральный горизонт.

Измерения петель гистерезиса и температурных зависимостей магнитного момента проводились на вибрационном магнитометре (LakeShore, 7400 System) в магнитных полях до 1,6 Тл, при температурах от 80 до 450 К. Для исследования образцы помещались в полиэтиленовые пакетики размером 5 мм*10 мм, уплотнялись (для минимизации перемещения частиц внутри пакетика), взвешивались и запаивались (Рис. 2).

Результаты и обсуждения

Исследования магнитных свойств различных проб почв (всего 12) при комнатной температуре показали, что все образцы являются ферромагнитными с коэрцитивной силой H_C не превышающей 100 Ое. На Рис. 3. представлены петли гистерезиса трех образцов органогенного горизонта почв, взятых на расстоянии 41 км от медно-никелевого комбината и обработанных разными методами.

Из рисунка видно, что образцы № 1 и № 2, обработанные на мельнице со стальными ножами и шарами, соответственно, имеют большую намагниченность насыщения, чем образец № 3, обработанный на мельнице с агатовыми шарами. Это говорит о том, что метод подготовки образцов влияет на их магнитные свойства и использование агатовых (неферромагнитных) шаров позволяет получить больше информации об исходном образце почвы.

Нами обнаружена зависимость магнитных свойств образцов почв от расстояния до медно-никелевого комбината. На Рис. 4. представлены петли гистерезиса четырех различных образцов, обработанных на мельнице с агатовыми шарами и взятых на расстояниях 1, 8, 41 км. Образцы № 3 и № 6 взяты в органогенном слое на расстоянии 41 км и 8 км, соответственно. Образцы № 9 и № 12 – в минеральном горизонте на расстоянии 41 км и 1 км, соответственно. Из рисунка видно, что на большом расстоянии от комбината (41 км) количество ферромагнитных включений в органогенном слое гораздо меньше, чем в минеральном горизонте. По нашим предположениям, это обусловлено природной аккумуляцией железосодержащих минералов в иллювиальном горизонте, характерной для подзолов. На более близком расстоянии от комбината (1 и 8 км) количество ферромагнитных включений в органогенном и минеральном слоях примерно одинаковы – намагниченности насыщения для образцов № 6 и № 12 равны 28 и 22 emu/g, соответственно. Это можно объяснить тем, что вблизи комбината поверхностный слой почв загрязняется гораздо интенсивнее, и техногенно обусловленная намагниченность проб почв из органогенных горизонтов достигает природного уровня, характерного для иллювиально-железистых горизонтов подзолов.

Также нами были измерены при различных температурах петли гистерезиса образца почвы № 6, обработанного на мельнице с агатовыми шарами. Коэрцитивная сила исследованного образца оказалась равной $H_C=100$ Ое во всем диапазоне температур. На Рис. 5 можно увидеть, что наклон части петли, соответствующей парапроцессу, тем меньше, чем больше температура. Такое поведение характерно для магнетиков в области температур, выше температуры Кюри.

Температурная зависимость ZFC-FC образца почв № 6 (обработанного на мельнице с агатовыми шарами) была получена в магнитном поле 500 Э с целью оценить состав ферромагнитных включений, содержащихся в образце почвы. Zero field cooling-field cooling (охлаждение без поля-охлаждение в поле) – это режим измерений, при котором образец сначала размагничивается и затем охлаждается. При низкой температуре задается магнитное поле, после чего измеряется температурная зависимость $M(T)$ для образца почв № 6 представлена на Рис. 6. При температуре 120 К мы видим резкое уменьшение величины магнитного момента при понижении температуры. Такое изменение момента, характерное для фазового перехода в магнетите, происходит при температурах, соответствующих переходу Вервея [6], и, следовательно, можно сделать предположение о наличии в образце частиц Fe_3O_4 оксида железа. При температуре 230 К также происходит резкое уменьшение величины магнитного момента, что, предпо-

ложительно, соответствует фазовому переходу Морины в оксидах железа Fe_2O_3 [7]. По полученной зависимости $M(T)$ можно определить температуру блокировки – 330 К, что позволит в дальнейшем, определив форму частиц, оценить их размеры.

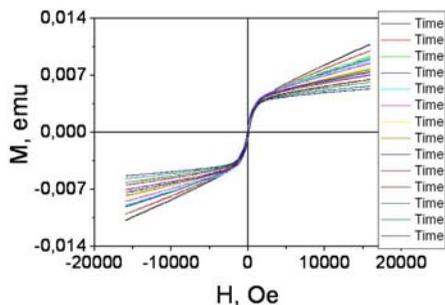


Рис.5. Петли гистерезиса образца почвы № 6, обработанного на мельнице с агатовыми шарами, измеренные при разных температурах.

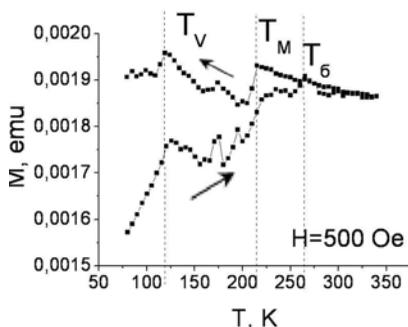


Рис. 6. Температурная зависимость (ZFC-FC) магнитного момента образца почвы № 6, обработанного на мельнице с агатовыми шарами.

Заключение

В результате исследований магнитных свойств образцов почв с Кольского полуострова было установлено, что между магнитными свойствами образцов почв и расстоянием от медно-никелевого комбината, на котором были взяты образцы, существует корреляция. Установлено также влияние способа подготовки исходных проб почв на их магнитные свойства и показано, что для повышения достоверности результатов о составе загрязняющих веществ необходимо использование шаровых мельниц с агатовыми шарами. Результаты исследований дают основание предположить значительное загрязнение исследованных почв оксидами железа αFe_2O_3 и αFe_3O_4 .

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 11-03-00501-а и № 11-02-90493-Укр_ф_а

Литература

1. Г.А. Акимова, А.П. Кузьмин, В.В. Хаскин, Экология. Природа - человек – техника, Юнити, Москва 2001, 343 с.
2. S. Koptsik, G. Koptsik, S. Livantsova, L. Eruslankina, T. Zhmelkova, Zh. Vologdina. J. Environ. Monit. 5 (2003) 441–450.
3. Armin Schmidt, Richard Yarnold, Matt Hill, Mike Ashmore, Journal of Geochemical Exploration 85 (2005) 109–117.
4. Hana Fialova, Gunter Maier, Eduard Petrovsky, Ales Kapicka, Tetyana Boyko, Robert Scholger, Journal of Applied Geophysics 59 (2006) 273–283.
5. Г.Н. Копчик, Н.П. Недбаев, С.В. Копчик, И.Н. Павлюк, Почвоведение №8 (1998) 988-995.
6. http://www.nanometer.ru/2007/12/24/1198497146390_5498.html
7. http://www.femto.com.ua/articles/part_1/2361.html

МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОБЛАЧНОСТИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ В МОСКВЕ

Н.С. Сидоренков, Т.С. Жигайло, Е.И. Незваль, А.И. Неушкин,
Б.Г. Шерстюков

В статье проверяется реальность опубликованного ранее предположения о том, что взаимодействия гравитационных лунно-солнечных приливов с радиационными условиями в атмосфере (из-за изменения количества облачности) создают колебания аномалий температуры воздуха с лунными периодами. Собраны и проанализированы ряды среднесуточного количества общей облачности и продолжительности солнечного сияния за каждый день с 1966 г. по 2010 г. и ряды сумм продолжительности солнечного сияния за каждый месяц с 1955 г. по 2010 г. в Москве. Показано, что многолетние изменения продолжительности солнечного сияния объясняют 35 летние биения температуры воздуха.

Введение

В статье (Сидоренков, Жигайло, 2011) было показано, что в изменениях температуры воздуха имеется не только обычный годовой период, обусловленный колебанием склонения Солнца в течение тропического года (365,24 сут), но и лунный 355 суточный годовой период, обусловленный периодическим изменением приливных сил с этим периодом. В результате сложения этих двух колебаний с близкими частотами амплитуда результирующего колебания периодически изменяется во времени с периодом 35,2 лет, наблюдается явление биения близких частот. Биения проявляются не только у температуры воздуха, но и у других гидрометеорологических характеристик.

Биения температуры воздуха

Биения – это периодическое изменение амплитуды результирующего колебания. Когда фазы суммируемых колебаний с близкими частотами совпадают, их парциальные амплитуды складываются, и амплитуда результирующего колебания становится максимальной. Затем фазы колебаний постепенно расходятся, и амплитуда результирующего колебания уменьшается. Она минимальна при разности фаз, равной 180° , когда амплитуды суммируемых колебаний вычитаются.

На рис. 1 воспроизведена модель биений температуры воздуха с параметрами близкими к московским. Амплитуды солнечного годового (365,24 сут) и лунного годового (355 сут) колебаний равны соответственно 15° и 5° , а среднегодовая температура составляет 5° .

В формуле рис.1 время t в сутках отсчитывается от 1 января 1972 года. Этот момент принят за начальный, потому что в 1972 г. однозначно (без повторов) наблюдалось аномально жаркое лето и холодная зима, то есть фазы солнечного и лунного годовых колебаний совпадали. Рис. 1 изображает результирующее колебание T с 1937 по 2012 г. В 1972 г. фазы «солнечного» (365 сут.) и «лунного» (355 сут.) годовых колебаний температуры T совпали, поэтому амплитуды этих

двух колебаний сложились $15^\circ+5^\circ=20^\circ$, и амплитуда результирующего колебания T составила примерно 20° . Поскольку среднегодовая величина T равна 5° , постольку среднесуточная температура в июле достигала 25° , а в январе опускалась до -15° . Поэтому лето 1972 г. на европейской территории России (ЕТР) было аномально жарким, а зима холодной. В последующие годы фазы колебаний T расходились, и амплитуда результирующего колебания T постепенно уменьшалась. В 1990 г. разность фаз достигла 180° , и амплитуда уменьшилась до минимума $15^\circ-5^\circ=10^\circ$. Зима стала теплой, а лето прохладным. С 1991 по 2007 г. фазы колебаний T сходились, амплитуда постепенно увеличивалась и в 2007 г. она снова достигла максимального значения 20° .

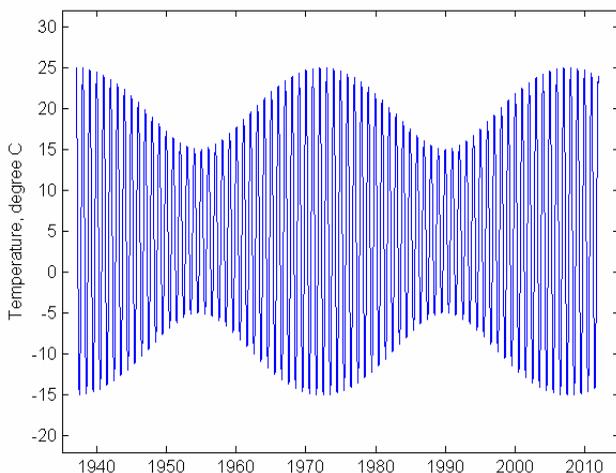


Рис. 1. Модель биений температуры воздуха (T) с двумя гармониками:

$$T = 5 + 15 \cos 2\pi t / 365 + 5 \cos 2\pi t / 355.$$

Итак, при сближении фаз солнечного и лунного годовых колебаний T результирующая амплитуда T увеличивается, а при расхождении фаз — уменьшается. Из-за такого хода температуры в тридцатые, семидесятые годы XX века и в первое десятилетие XXI века на ЕТР часто отмечались холодные зимы и жаркие летние сезоны (склонность к «континентальному» климату), а в пятидесятые и девяностые годы XX века серьезные морозы и жаркие летние сезоны происходили реже обычного (склонность к «морскому» климату).

В работе (Сидоренков, Жигайло, 2011) проанализированы столетние ряды наблюдений температуры воздуха на метеостанциях ЕТР с суточной дискретностью (по данным ВНИИГМИ МЦД (<http://aisori.meteo.ru/ClimateR>), и показано, что холодные зимы и жаркие летние сезоны наблюдались в годы близкие к 2010 г., 1972 г., 1936/1938 г. и 1901 г. Теплые зимы и прохладные летние сезоны были в годы близкие к 1990 г., 1954 г. и 1919 г.

Механизм формирования 35 летних колебаний климата

За счет чего же холодное небесное тело, Луна может влиять на температуру воздуха и приводить к изменениям климатических условий от «континентальных» до «морских» при неизменности физико-географических условий местности? Ответ очевиден. Это может происходить из-за изменения количества облачности.

При ясной погоде днем атмосфера разогревается солнечной радиацией, а ночью выхолаживается за счет инфракрасного излучения. Летом день длится существенно дольше ночи, максимальна и полуденная высота Солнца над горизонтом. Поэтому летом при ясной погоде атмосфера ото дня ко дню разогревается солнечной радиацией, и в итоге наблюдаются положительные аномалии температуры. Зимой день короткий, ночь длится очень долго, а полуденная высота Солнца над горизонтом минимальна. Поэтому зимой при ясной погоде атмосфера ото дня ко дню выхолаживается за счет инфракрасного излучения и как следствие наблюдаются отрицательные аномалии температуры.

Итак, при отрицательной аномалии облачности в течение года лето должно быть жарким, а зима – холодной. Как отмечалось выше такие аномалии температуры наблюдались в годы близкие к 2010 г., 1972 г., 1936/1938 г. и 1901 г. Значит, в интервалы времени близкие к этой последовательности лет должны наблюдаться отрицательные аномалии количества облачности.

При облачной погоде значительно уменьшается поступление солнечной радиации днем, но зато ночью существенно сокращаются потери тепла за счет инфракрасного излучения. Поэтому при облачной погоде знаки аномалий температуры воздуха изменяются на обратные: летом преобладают отрицательные аномалии, а зимой – положительные. Итак, при положительной аномалии облачности в течение года лето должно быть прохладным, а зима – теплой. Такие условия наблюдались в годы близкие к 1990 г., 1954 г. и 1919 г. Значит, в интервалы времени близкие к этой последовательности лет должны наблюдаться положительные аномалии количества облачности.

Чтобы проверить реальность изложенного выше механизма формирования биений годовых колебаний температуры мы пытались найти длительные ряды наблюдений за облачностью с суточной дискретностью. Однако выяснилось, что с 1935 г. по 1965 г. данные об облачности во ВНИИГМИ МЦД есть только в кодах, из которых невозможно получить средний бал облачности за сутки. С помощью Заведующей метеорологической обсерватории МГУ Е.И. Незваль и Главных научных сотрудников ВНИИГМИ МЦД А.И. Неушкина и Б.Г. Шерстюкова мы получили ряды среднесуточного количества общей облачности в баллах и продолжительности солнечного сияния за каждый день с 1966 г. по 2010 г. по наблюдениям обсерватории МГУ. По наблюдениям метеостанции ВВЦ (индекс 27612) удалось получить ряды сумм продолжительности солнечного сияния за каждый месяц с 1955 г. по 1990 г. Продолжительность солнечного сияния измеряется по записям гелиографа и является объективной характеристикой количества облачности на небе в дневное время.

Количество облачности и продолжительность солнечного сияния имеют ярко выраженный годовой ход. Чтобы отфильтровать его мы вычислили скользящие средние за 365 суток величины балла общей облачности и продолжительности солнечного сияния на метеорологической обсерватории МГУ (рис. 2).

Средний за 45 лет бал общей облачности составляет 7,7. Он колеблется от 6,6 в 1972 г. до 8,3 в 2009 г. Проявляется положительный линейный тренд. За 45 лет бал облачности увеличился на 0,7.

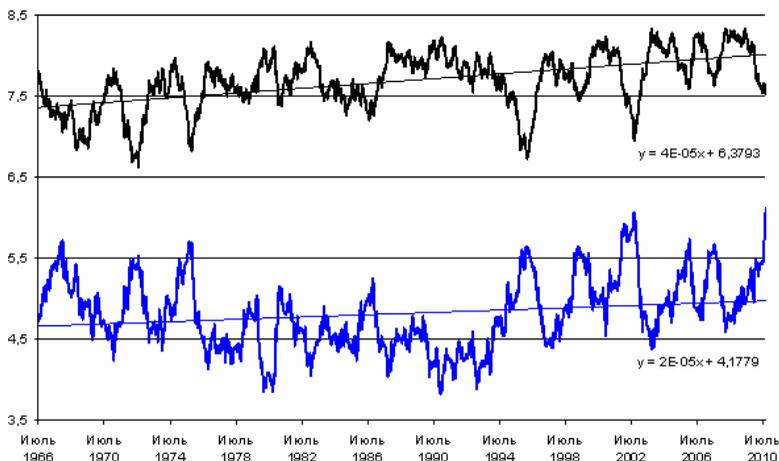


Рис 2. Скользящие среднегодовые величины суточного количества общей облачности в баллах (вверху) и продолжительности солнечного сияния в часах (внизу).

Средняя за 45 лет продолжительность солнечного сияния составляет 4,8 часа в день. Проявляется положительный линейный тренд. Чем больше бал облачности, тем меньше должна быть продолжительность солнечного сияния. Выявленные в рядах облачности и продолжительности солнечного сияния равнозначные тренды противоречат этой физической закономерности. Это говорит о ненадежности использования балла облачности в качестве количественной характеристики общей облачности. Поэтому обратимся к объективным данным продолжительности солнечного сияния.

На рис. 2 видно, что положительные аномалии солнечного сияния преобладали с 1966 г. по 1976 г. и с 1995 г. по 2010 г., отрицательные аномалии наблюдались с 1976 г. по 1994 г. Максимальная продолжительность солнечного сияния (6,1 час) отмечалась в 2010 г. и 2002 г., а минимальная около 3,8 час – в 1990–1993 гг. В годы с жаркими летними сезонами и холодными зимами средняя продолжительность солнечного сияния за день была примерно на 2 часа (42%) больше, чем в годы с прохладными летними сезонами и теплыми зимами.

По наблюдениям станций ВВЦ и МГУ были вычислены месячные суммы продолжительности солнечного сияния с 1955 г. по 2010 г. Они представлены на рис.3. Максимальные месячные суммы летом флуктуируют от года к году в диапазоне от 234 в июне 1962 г. до 405 в июне 1999 г. В жарком июле 2010 г. продолжительность солнечного сияния была 396 час (по рейтингу это второе значение). Минимальные суммы зимой изменяются от 0 в декабре 1968 до 32 в декабре 1978 г. и январе 2003 г. Имеется слабый положительный линейный тренд, в результате которого за 55 лет месячные суммы солнечного сияния увеличились на 5,8 часа (4%).

Отмечается заметное уменьшение амплитуд годовых колебаний в интервале времени с 1976 г. по 1998 г. и существенное увеличение их в предшествующие годы (с 1963 г. по 1975 г.) и последующие годы (с 1999 г. по 2011 г.).

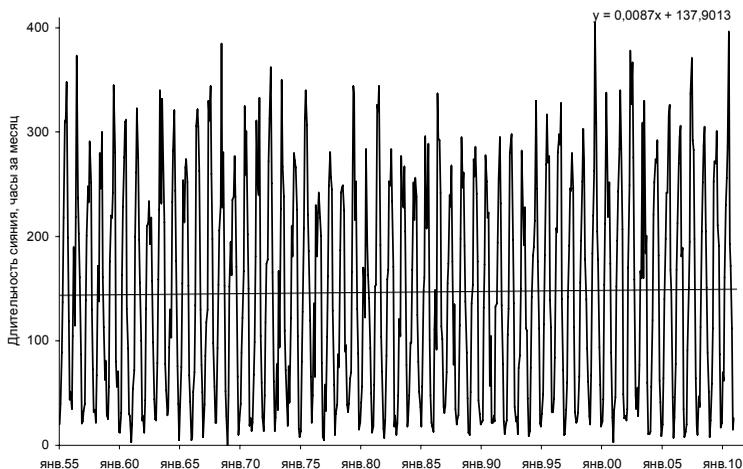


Рис. 3. Ход месячных сумм продолжительности солнечного сияния в Москве с 1955 г. по 2010 г.

По месячным суммам продолжительности солнечного сияния мы вычислили скользящие средние за 12 месяцев суточные продолжительности солнечного сияния в Москве с 1956 г. по 2010 г. (рис. 4).

Средняя за 55 лет продолжительность солнечного сияния по месячным данным также как и по суточным данным (рис. 2) составляет 4,8 часа в день. Проявляется положительный линейный тренд (примерно 0,25 часа за 54 г.). На рис. 4 видно, что положительные аномалии солнечного сияния преобладали с 1963 г. по 1975 г. и с 1995 г. по 2010 г., отрицательные аномалии наблюдались с 1956 г. по 1962 г. и с 1976 г. по 1994 г. Такой ход свидетельствует о существовании генерируемого Луной 35 летнего цикла в продолжительности солнечного сияния, а значит и количества облачности. Максимальная продолжительность солнечного сияния (5,9 час.) отмечалась в 2002 г., а минимальная около 3,9 час. — в 1990 г. и 1993 г. В годы с жаркими летними сезонами и холодными зимами средняя продолжительность солнечного сияния за день была примерно на 1,5 часа (31%) больше, чем в годы с прохладными летними сезонами и теплыми зимами.

Итак, многолетний ход продолжительности солнечного сияния коррелирует с изменением годовой амплитуды температуры воздуха, и тем самым подтверждает предположение о том, что взаимодействие гравитационных лунно-солнечных приливов с радиационными условиями в атмосфере (из-за изменения количества облачности) создают колебания суточных и годовых аномалий температуры воздуха с лунными периодами и с амплитудами, зависящими от физико-географических условий местности.

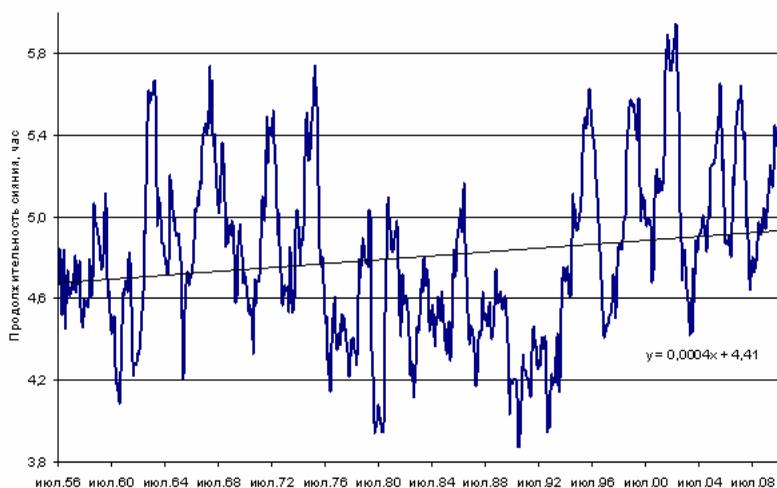


Рис 4. Скользящие средние за 12 месяцев суточные продолжительности солнечного сияния в часах в Москве.

Положительный линейный тренд солнечного сияния тоже хорошо согласуется с заметным ростом температуры воздуха на ЕТР за последние 40 лет. Так что наблюдающееся с 1972 г. потепление, возможно, связано с увеличением продолжительности солнечного сияния.

Таким образом, влияние лунно-солнечных приливов на радиационные условия в атмосфере и океане является основным механизмом вынужденной синхронизации атмосферных процессов колебаниями лунно-солнечных приливных сил, рассмотренной в работе (Сидоренков, Суменова, 2010).

Бытует мнение, что эффекты гравитационных приливов должны быть однозначными на глобальных пространственных масштабах. Наш многолетний опыт свидетельствует о том, что в моменты экстремумов приливных сил в оболочках Земли действительно почти везде наблюдаются изменения, но знаки этих изменений везде различные. Проявление луно-солнечных приливов в атмосфере имеет локальный характер. Происходит это потому, что приливные волны, которых в современных разложениях приливного потенциала выделяют уже до 28000 составляющих, двигаясь в атмосфере, отражаются от орографических препятствий, барических и термических неоднородностей интерферируют между собой, создавая пеструю интерференционную картину. Работы по ее изучению не проводились. Судя по результатам изучения океанских приливов, в атмосфере могут существовать узловые амфидромические точки, (точки, в которых высота прилива в любой момент времени равна нулю), где приливные колебания отсутствуют, и пучности, где приливы усиливаются в десятки раз. Скорость движения приливных волн может, как увеличиваться, так и замедляться в зависимости от траекторий движения и состояния атмосферы и океана. Поэтому оптимальные аналоги, как правило, осуществляются с некоторыми непредсказуемыми сдвигами во времени.

Выводы

Влияние лунно-солнечных приливов на облачность и через нее на радиационные условия в атмосфере и океане является основным механизмом формирования колебаний температуры воздуха с лунными периодами.

Сложение колебаний гидрометеорологических характеристик с периодами солнечного (365 суток) и лунного (355 суток) года порождает основной 35-летний цикл биений, в результате которого климат постепенно изменяется от «континентального» (при совпадении фаз) до «морского» (при расхождении фаз на 180°).

Литература

1. Н.С. Сидоренков, Т.С. Жигайло. Астрономические причины аномально жарких летних сезонов. В сборнике научных трудов «Физические проблемы экологии (экологическая физика)». Под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева. – Москва, МАКС Пресс, 2011, № 17, С. 392–407.
2. Н.С.Сидоренков, К.А. Сумерова, Синхронизация вариаций атмосферной циркуляции колебаниями лунно-солнечных приливов и подбор аналогов для долгосрочных прогнозов погоды. Труды Гидрометцентра России. – 2010. - Вып. 344. – С. 238-251.

ИННОВАЦИОННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕСУРСОВ ГИДРОСФЕРЫ

Соловьев Д.А.

*Учреждение Российской академии наук Институт Океанологии
им. П.П.Ширшова РАН*

В настоящее время инновационные технологии, обеспечивающие качественный рост эффективности использования ресурсов гидросферы, находятся в стадии формирования (для них ожидается быстрое внедрение новых технологических решений) и они приобретают все большую актуальность для будущего развития энергетики.

Среди перспективных инновационных технологий использования ресурсов гидросферы, прежде всего, можно выделить три основных направления:

- широкое применение водородных технологий накопления и передачи энергии,
- создание эффективных опреснительных установок,
- использование энергии синтеза биомассы (микроводорослевые энергосистемы).

Важным элементом их успешной практической реализации является создание энергоустановок, основанных на одновременном, совместном использовании различных технологических решений и других видов ВИЭ. Такой подход по созданию и продвижению комплексных технологических решений, в конечном счете, будет обеспечивать устойчивый спрос и востребованность новых технологий на рынке гидросферной энергетики.

По прогнозу МЭА [1] данные направления применения энергетических технологий получат мощный импульс развития к 2030 г. При этом в ближайшем

будущем доля энергии, получаемой за счет ресурсов Мирового океана, будет существенно возрастать, а ее стоимость снижаться [2]. Так, к примеру, на рис. 1. видно, что стоимость 1 кВт установленной мощности, для морских ветроэнергостанций в 2030 г. будет примерно на 30%.

Становится очевидным, что, в конечном счете, проблема заключается не в возможности извлечения из океана энергии в различных формах, а в экономической оправданности этого процесса, с тем, чтобы найти пути (технологии) экономически выгодной утилизации получаемой энергии. Поэтому, при разработке новых технологий ее преобразования, основное внимание следует уделять экономическим аспектам их применения.

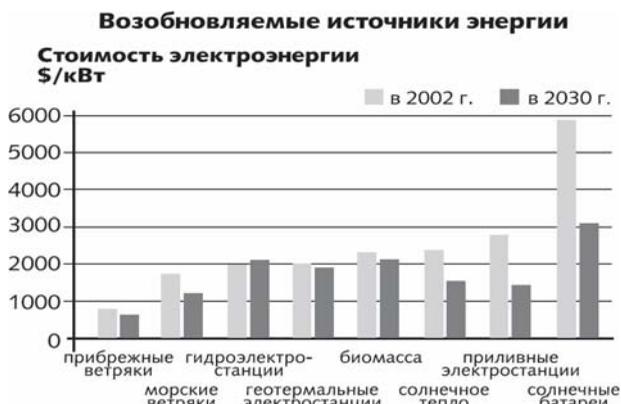


Рис. 1. Сравнительная стоимость электроэнергии основных ВИЭ гидросферы и других ВИЭ [2].



Рис. 2. Технологии утилизации электроэнергии, вырабатываемой за счет использования ресурсов гидросферы.

На сегодняшний день, помимо непосредственного опреснения морской воды, существуют уже вполне отработанные технологии утилизации электроэнергии, вырабатываемой морскими энергетическими установками (рис. 2.). На перерабатывающих объектах, размещаемых, в том числе на морских платформах с выработанными нефтяными скважинами, можно осуществлять переработку морепродуктов в продукты питания и сырье для технических нужд, минерального сырья и полезных ископаемых для дальнейшего промышленного использования. Среди задач, перспективных с точки зрения использования вырабатываемой электроэнергии, особое место занимает возможность организации крупномасштабного электролизного производства водорода на основе электролиза морской воды.

1. Водородные технологии и приливная энергетика.

Большие перспективы открывает идея использования морских установок для получения из морской воды водорода, запасы которого в океане практически неисчерпаемы. Полученный водород может накапливаться в огромных подводных резервуарах, а затем транспортироваться по трубам к местам потребления. Водород решит проблему получения самого эффективного и «чистого» топлива для стационарных и транспортных энергетических установок, для теплоснабжения городов и других задач. Водород как энергоноситель обладает уникальными физико-химическими свойствами, позволяющими преобразовывать теплоту его сгорания в работу с КПД, существенно превышающим КПД стационарных и транспортных энергоустановок с использованием традиционных топлив. Это подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями, выполненными для автомобильных и авиационных двигателей различных типов, исследованиями процессов горения водорода, теоретическими разработками. Однако непосредственная замена водородом природных топлив в эксплуатируемых энергоустановках в – большинстве случаев (например, в современных ГТУ или в топках котельных агрегатов) не может быть достаточно эффективной, поскольку при этом, как правило, не реализуются все преимущества водорода, а затраты на его получение из воды выше стоимости природного газа и нефтяных топлив. Полностью преимущества водорода как энергоносителя удастся реализовать только в том случае, если будет разрабатываться новая техника, специально предназначенная для работы на водороде. Водород как искусственный энергоноситель с примерно одинаковой и высокой эффективностью может быть использован в различных отраслях промышленности (энергетике, химии, металлургии, транспорте и т. д.) для вытеснения природных жидких и газообразных топлив ядерной энергией и углем. Это уникальное его свойство особенно проявляется при создании энерготехнологических комплексов различных типов. Полностью преимущества водорода выявятся, конечно, только в результате соответствующего системного технико-экономического анализа. Этот анализ, однако, должен проводиться с учетом новых возможностей и показателей перспективной техники, которые могут быть достигнуты при применении водорода, и, на наш взгляд, прежде всего должен быть направлен на выявление важнейших задач создания такой новой техники. Стоит отметить, что на пути использования водорода стоит немало технических преград. Так, например, для

хранения и транспортировки водород придется охладить до температуры $-263\text{ }^{\circ}\text{C}$, что потребует обеспечить сверхэффективную теплоизоляцию.

Циклическая приливная энергия может быть эффективно использована и с помощью потребителя – регулятора, в качестве которого наиболее целесообразно применять водород. Либо необходим подбор соответствующих производств, способных экономично работать в прерывистом режиме и производственный процесс которых легко поддается автоматизации. Требования к таким производствам с небольшим числом часов использования – низкая трудоемкость, минимальная капиталоемкость и возможность складирования продукции. Для снижения затрат при передаче электроэнергии целесообразно размещение такого потребителя поблизости от малообжитых участков побережья Мирового океана с высокими приливами, где имеется значительная концентрация приливной энергии, которая может сочетаться с энергоемким потребителем-регулятором (например, Пенжинский залив на Охотском побережье России).

На сегодняшний день, на первый план выходят экономические вопросы, связанные с энергозатратами на сжижение и стоимостью производства водорода. По оценке американской национальной технической академии (National Academy of Engineering) текущая оптовая цена сжатого водорода при крупномасштабном производстве и транспортировке по трубопроводам — $\$2/\text{кг}$, перспективная — на 40 центов ниже. Энергетически один кг водорода эквивалентен галлону бензина, текущая средняя оптовая цена которого — $\$2,19/\text{гал}$ (см. рис.).

На автозаправках США розничная стоимость водорода, полученного преобразованием природного газа, — $\$3,50/\text{кг}$ и $\$6,30/\text{кг}$ — для электролитического (себестоимость процесса $\$6\text{--}\7 за килограмм водорода при использовании электричества из промышленной сети; $\$7\text{--}\11 за килограмм водорода при использовании электричества, получаемого от ветрогенераторов; $\$10\text{--}\30 за килограмм водорода при использовании солнечной энергии).

Перспективная розничная цена водорода — $\$2,3/\text{кг}$ и $\$3,9/\text{кг}$ соответственно. В настоящее время средняя оптовая стоимость водорода, произведенного методом конверсии природного газа, составляет около $1,5\text{--}2,0\text{ } \$/\text{кг}$.

В промышленных условиях удельные расходы при электролизе воды на 1 кг водорода составляют: электроэнергии – $55\text{--}60\text{ кВт}\cdot\text{ч}$; воды – 9 кг; кислорода – 8 кг; выбросов CO_2 – 41 кг.

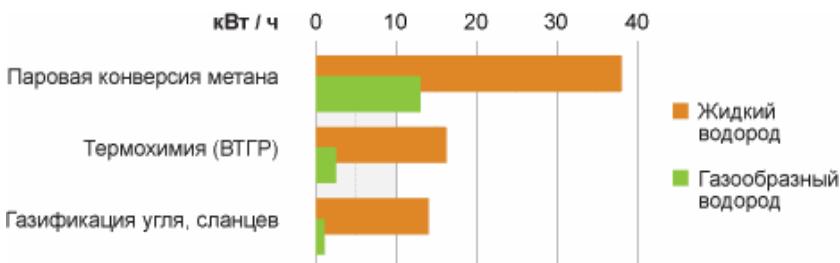


Рис.3. Затраты энергии на производство жидкого и газообразного водорода.

Для производства 100 норм. м³/час водорода методом электролиза необходимо чтобы мощность питания электроэнергией от электростанции составляла величину 400 кВт, при этом расходе воды будет - 78 л/час.

В настоящее время для разложения воды и получения водорода в основном применяется водно-щелочной электролиз.

Затраты энергии на сжижение водорода и кислорода превышают затраты энергии на его производство приблизительно в 4,5-5 раз и могут составить величину до 25 % от количества энергии, содержащегося в самом сжиженном газе.

Сравнение энергозатрат на производство газообразного и жидкого водорода показано на рис.3.

2. Пути решения проблемы нехватки пресной воды и технологии опреснения

Второе важнейшее направление использования ресурсного потенциала гидросферы - это получение пресной воды. Доступные для использования мировые ресурсы пресной воды оцениваются примерно в 24 тыс. км³. На рис.4 показан рост потребления воды в XX веке и сценарии его роста на ближайшие десятилетия, а также потери воды в результате загрязнения и иных антропогенных воздействий.

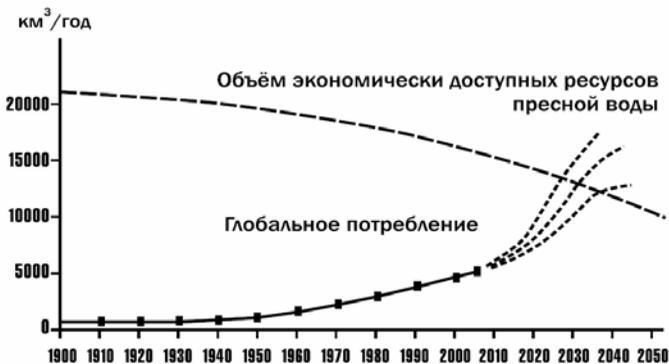


Рис. 4. Потребление воды и сокращение ее ресурсов вследствие антропогенных причин [4].

По прогнозу ООН [3], к 2025 г. около 5,5 млрд человек может испытывать водный стресс. За прошедшие 100 лет потребление воды увеличилось в 6 раз, а прирост населения – в 2 раза. Расчеты ООН свидетельствуют о том, что напряженность ситуации сохранится в ближайшем будущем. Мировое хозяйство в целом к 2030 г. станет поглощать примерно 8 тыс. км³ воды (20 – 30 % полного стока), а сточные воды в объеме 2 тыс. км³ будут загрязнять 8,5 тыс. км³, что равно 21 % полного и 61 % устойчивого стока.

К основным способам устранения проблемы дефицита пресной воды можно отнести:

1. Экспорт воды
2. Создание искусственных водоемов.

3. Экономия расхода воды.
4. Опреснение морской воды или соленой воды из подземных источников.
5. Конденсация воды из атмосферы.

Выработка пресной воды в мире растет непрерывно и высокими темпами (рис. 5). Так, если в 1980 г. опреснение составило 5 млн. м³/сут., то в 2000 г. получили около 25 млн. м³/сут. В 2009 эта величина составила порядка 55 млн. м³/сут. Распределение количества получаемой воды по регионам неравномерно. На Средний Восток приходится 60 %, Северную Америку – 13 %, Европу – 10 %, Африку – 7 %, на остальной мир – 10 %. На страны СНГ выпадает всего 0,6 % от общего объема выработки опресненной воды в мире.

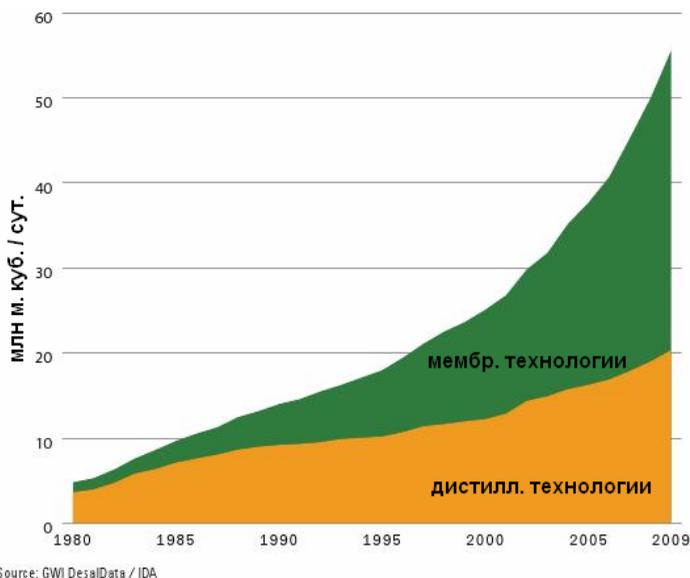


Рис. 5. Рост опреснения морской воды в мире [5].

В настоящее время пресную воду получают в основном из морской воды, при этом для широкомасштабного производства используются эффекты дистилляции и мембраны. К мембранным методам относятся: электродиализ и обратный осмос. К дистилляционным методам относятся: многоступенчатые дистилляционные системы, системы многократного вскипания и механической декомпрессии.

Цена 1 м³ пресной воды на крупных установках для дистилляционного метода составляет в зависимости от мощности установки 2,0 – 0,5 долл./м³, для электродиализа и обратного осмоса – 0,3 – 0,2 дол./м³ при солёности 2 – 4 г/л.

3. Гидросферные биотехнологии.

Значительный импульс в своем развитии в последние годы получило такое направление использования ресурсов гидросферы, как гидросферные биотехнологии. Это связано с тем, что биота - наиболее доступная для энергетической трансформации и быстро возобновляемая часть биомассы

гидросферы – морской фитопланктон, состоящий в основном из диатомовых водорослей.

Уже сейчас достигнут значительный прогресс в технологии массового культивирования микроводорослей в таких странах, как Япония, ФРГ, Израиль, Франция, США, Мексика и Россия. Культивирование производилось как в специально построенных для этой цели установках (фотобиореакторах), так и в естественных водоемах. В этих странах была получена следующая средняя продуктивность: в США 30 г/м² в день, Японии – 12 г/м² в день, Израиле – от 10 до 40 г/м² для зимних и летних условий соответственно.

В зависимости от целей использования культивируются различные микроводоросли. Некоторые из них в процессе метаболизма продуцируют углеводы, которые можно использовать для получения газообразного, жидкого или твердого топлива.

На практике обычно используются следующие технологии переработки полученной биомассы с целью получения энергии:

1. Прямое сжигание для непосредственного получения теплоты;
2. Пиролиз (сухая перегонка), направленный на получение газообразного топлива (преимущественно водорода);
3. Спиртовая ферментация с целью получения из биомассы этилового спирта (этанол);
4. Анаэробное сбраживание, являющееся наиболее перспективным средством получения топлива из органической массы. В результате действия анаэробных бактерий из биомассы получают биогаз, состоящий в основном из метана (50 – 80 %) и двуокси углерода (20 – 50 %) со следами сероводорода, аммиака и других веществ.

На данном этапе развития технологии, стоимость переработки 1 тонны водорослей в биотопливо составит примерно 4300 долларов США. Но, в ближайшее время ожидается снижение этой цифры до 10 раз при этом, из тонны водорослей можно получить примерно 1 млн. литров биотоплива.

Управление перспективных исследовательских программ (DAPRA) США подтвердило, что ее исследователи достигли себестоимости 2\$ за галлон (\$ 0.53 за литр) биотоплива из водорослей и движется к планке в 1\$ за галлон (\$ 0.27 за литр - примерно 8 рублей за литр).

Литература

1. Energy Technology Perspectives 2010 <http://www.iea.org/>
2. IEA, "Costs for Different Renewables," (BBC News, 2004).
3. Организация Объединенных Наций (ООН) www.un.org/ru/
4. В.И. Данилов-Данильян. Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России. Данилов-Данильян В.И. Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России. М.: ООО «Типография ЛЕВКО», Институт устойчивого развития/Центр экологической политики России, 2009. 88 с.
5. GWI DesalData/ IDA <http://www.idadesal.org/>

УДК 551.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНОСА
ПРИМЕСЕЙ В СОСТАВНОМ ВИХРЕЕ.В. Степанова¹, Т.О. Чаплина², Ю.Д. Чашечкин¹, А.И. Петренко²¹Институт проблем механики РАН²Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова**Аннотация**

Выполнен цикл экспериментальных исследований переноса маркирующих примесей, как растворимых (раствор красителя), так и нерастворимых (различные типы масел) в составном вихре, взаимодействующим со свободной поверхностью. Опыты позволили промоделировать важные особенности динамики разливов нефти в океане, которые трансформируются в вытянутые нитевидные рукава спиральной или нерегулярной формы. Картины таких течений в лабораторных установках качественно подобны наблюдаемым в океане и в распределении разлившейся нефти, и в расположении мусора или битого льда.

Введение. В динамике природных систем большое внимание уделяется изучению периодических течений – вихрей и волн, как структурированным элементам, так и механизмам переноса вещества. Развитие методов дистанционного зондирования способствовало получению большого числа впечатляющих изображений вихревых течений в атмосфере и океане с выраженными спиральными рукавами, разделенными полосами базового вещества [1-3]. Выраженные спиральные рукава регистрируются как в установившихся течениях, так и в нестационарных, созданных волнами цунами после сильного землетрясения [4]. Однако, в силу крупномасштабности и нестационарности изучаемого процесса, отсутствие надежных методов предсказания локализации вихрей изучение их динамики и влияния на перенос вещества в природных условиях затруднено. Перенос примесей вихревыми течениями до сих пор остается недостаточно изученным, что не позволяет построить полные математические модели, которые могли быть применимы при расчете последствий экологических катастроф, подобных разливу нефти в Мексиканском заливе.

Визуализация кольцевой и спиральной структуры вихревых течений в лабораторных условиях осуществляется с помощью растворимых красителей, дыма [5] и мелкодисперсных частиц в методе электролитической преципитации [6].

В последнее время изучается перенос примеси из пятна, помещенного на свободную поверхность составного вихря [7]. Образование спиральных структур наблюдалось не только в равномерно При моделировании переноса и растворимых (смешивающихся) [8], и нерастворимых примесей (различных видов масел [8]) компактное пятно на поверхности вихря трансформируется в спиральные рукава, разделенные полосами чистой воды. Такая пространственная структура качественно соответствует наблюдаемой в природных условиях, что указывает на возможность систематических исследований динамики переноса несмешивающихся и несмешивающихся примесей в лабораторных условиях, обеспечивающих воспроизводимость начальных условий.

Целью данной работы является моделирование процесса распространения переноса смешивающейся и несмешивающейся примесей в составном вихре, который создается равномерно вращающимся диском в цилиндрическом контейнере.

1. Экспериментальная установка. В данном исследовании рассматривается установившееся вихревое течение, индуцируемое вращающимся диском в цилиндрическом контейнере. Экспериментальный стенд представляет собой бассейн из прозрачного полиметилметакрилата, выполненный в виде параллелепипеда размерами $63.6 \times 44.6 \times 70.0$ см³ без верхней грани (1 на рис. 1).

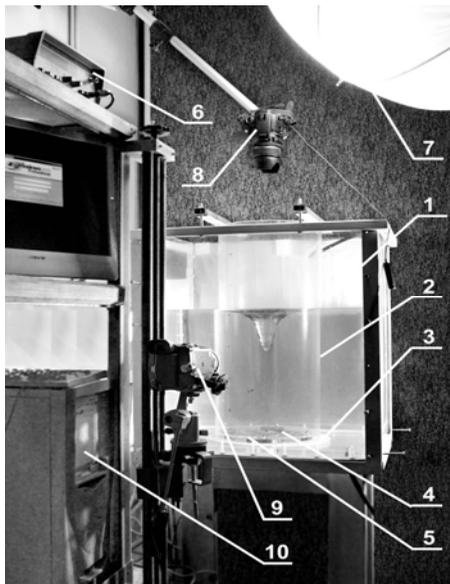


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки «Вихревые течения с кручением» (ВТК).

Рабочий контейнер 2 диаметром 29,4 см, скрепленный с бассейном прижимной арматурой, опирался на резиновое кольцо-прокладку 3 для уменьшения перетока. В центре контейнера на валу электродвигателя жестко закреплялся индуктор течения (диск) 4, составляющий единую плоскость с фальш-дном 5. Частота вращения диска измерялась частотомером 6 с помощью оптического датчика и регулировалась в пределах от 200 до 2000 об/мин.

Бассейн заполнялся до заданного уровня дегазированной водопроводной водой комнатной температуры. Освещение рабочего объема жидкости производилось прожекторами, снабженными регуляторами мощности и рассеивателями света в форме полупрозрачного зонта 7. Оптическая регистрация картины течения велась одновременно сверху фото- или видеокамерой 8 и сбоку камерой 9, закрепленной на вертикальном штативе. Изображения записывались на жесткий диск ПК 10.

Поддержание неизменными условий эксперимента (глубины слоя жидкости, размеров и частоты вращения диска, диаметра цилиндрического контейнера), обеспечивало воспроизводимость картины вихревого течения в широком диапазоне режимов. Открытая свободная поверхность позволяла применять широкий набор маркеров и контролировать условия их введения. В качестве растворимых маркеров использовались анилиновые чернила различных цветов, нерастворимым маркером служило рафинированное подсолнечное масло.

2. Параметры изучаемого течения. Особенность установки – открытая свободная поверхность, позволяющая вносить примесь в выбранную область, не возмущая картины течения. Прозрачные стенки и открытая поверхность позволяют одновременно изучать и вихревую, и волновые компоненты, как в толще, так и на свободной поверхности жидкости. Схема изучаемого течения, в которой отмечены только крупномасштабные компоненты, показана на рис. 2, а). Глобальное вращение жидкости в контейнере с угловой скоростью ω_c вокруг вертикальной оси I возникает вследствие эффекта увлечения жидкости вращающимся диском (граничные условия прилипания). Тороидальный вихрь с круговой осью II, охватывающей ось I, в котором частицы жидкости вращаются с локальной угловой скоростью ω_l , формирует вихревую пелену, сходящую с кромки диска. Отходящее течение поднимается у стенки контейнера, замыкающее компенсационное течение погружается в центре бассейна. Возникающее сложное пространственно неоднородное течение, в котором частицы жидкости движутся по спиральным и винтовым траекториям, характеризуется локальной частотой $\omega = \omega_c + \omega_l$.

На поверхности жидкости, вовлеченной в сложное вихревое течение всегда существует, пусть и небольшая, поверхностная каверна, форма которой определяется совместным действием инерционных, гравитационных, центробежных сил (рис. 2 б).

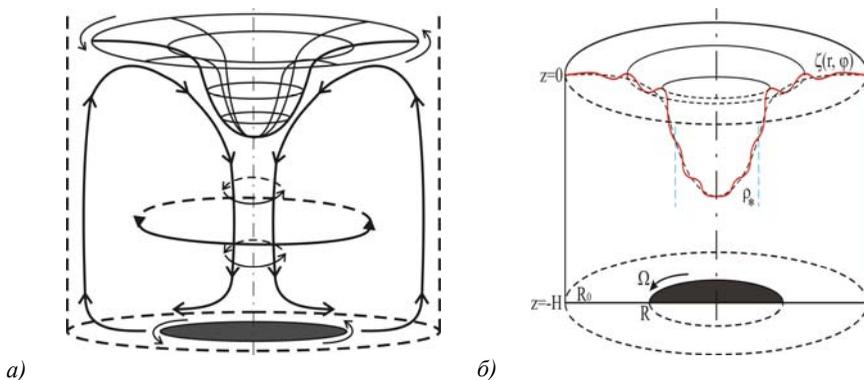


Рис. 2. Схема течения, возникающего в цилиндрическом контейнере под действием диска: а – общий вид, б – центральное сечение свободной поверхности составного вихря.

Стенки каверны искажаются волнами различного вида (инерциальными, гравитационными, капиллярными), амплитуда и длина которых зависят от условий опытов [9]. Совпадение характерных частот различных типов волн может привести к возникновению резонансных эффектов. В картине течения в контейнере выделяют крупные и тонкоструктурные элементы.

Качественное описание сложных вихревых течений обычно проводится методами теории подобия, размерности или масштабного анализа. Учитывая геометрию задачи, рассмотрение ведется в цилиндрических координатах, где вертикаль-

ная ось Z направлена против действия силы тяжести и совпадает с осью контейнера, свободная поверхность в невозмущенном состоянии совпадает с плоскостью $Z = 0$ (см. рис. 2 б). Возмущение уровня свободной поверхности жидкости описывается функцией смещения $\zeta(r, \varphi, t)$.

Положение центра поверхностной каверны, которое может не совпадать с осью контейнера Z , и ее глубина зависят от значений всех параметров задачи: толщины слоя жидкости H , радиуса контейнера R_0 , радиуса R и частоты Ω вращения диска, ускорения свободного падения g , плотности ρ , кинематической вязкости ν и коэффициента поверхностного натяжения σ жидкости. Отношения указанных величин формируют традиционный набор безразмерных параметров, включающий числа Рейнольдса $Re = (R^2\Omega)/\nu$, Фруда

$Fr = (R^2\Omega^2)/gH$, а для двухслойной среды (вода-масло) – также числа Бонда

$Bo = gH^2(\rho_1 - \rho_2)/\sigma$ и Атвуда $A = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$, где ρ_1 и ρ_2 – плотности состав-

ляющих жидкостей. Изучаемые в данных опытах течения характеризуются числами Рейнольдса в диапазоне $5000 \div 50000$, Фруда $50 \div 1800$, Атвуда – $0.009 \div 0.2$, Бонда – $1 \div 4.5$. Такие значения вполне соответствуют параметрам океанических течений, что позволяет предположить схожесть результатов лабораторного моделирования с натурными данными.

Во множество безразмерных параметров задачи, помимо динамических отношений также входят отношения линейных размеров: радиуса и высоты контейнера $\xi_H = R/H$ и коэффициент заполнения дна бассейна $\xi_0 = R/R_0$. При значениях $\xi_H \ll 1$ контейнер считается мелким, а при $\xi_H \gg 1$ – глубоким.

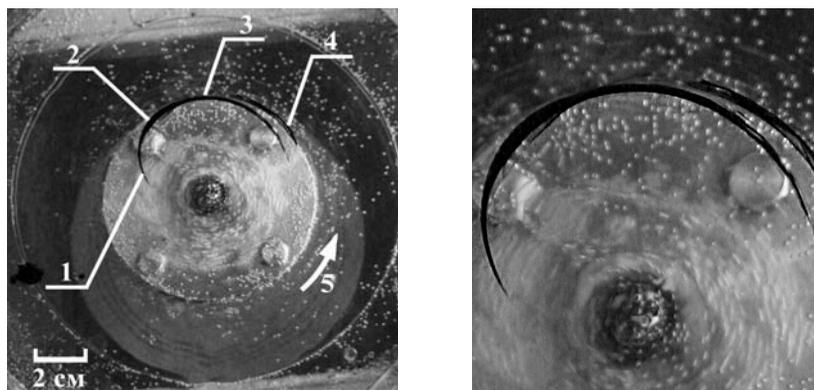
Многообразие характерных размерных и безразмерных параметров задачи свидетельствует о сложности и нестационарности изучаемого течения, что учитывалось при разработке методики эксперимента и конструкции экспериментальной установки.

3. Структурная устойчивость картины переноса растворимой примеси из пятна на поверхности составного вихря.

В серии опытов, проведенных с растворимым маркером, прослежена деформация пятна на поверхности составного вихря в спиральные рукава [10]. Для демонстрации структурной устойчивости картины течения на рис. 3 приведены фотографии картины течения с двумя последовательными каплями чернил, упавшими из фиксированного дозатора с задержкой $t = 0.1$ с (краситель – черные анилиновые чернила, высота падения и объем капли – 4 см, 0.1 мл). В нижней части рисунка указан масштаб изображения.

Обе капли трансформировались в вытянутые спиральные рукава (1 – циклоническая часть внутренней спирали, 2 – место падения капли, 3 – антициклоническая часть внутренней спирали, 4 – антициклоническая часть внешнего рукава, 5 – направление вращения диска). Остатки пятна образовали утолщение (3.5 мм) на внутреннем рукаве спирали 2 (рис. 3, а), которое соответствует смещенному на-

чальному положению пятна красителя на свободной поверхности. Большую длину имеет циклонический рукав первой капли, развивающийся в направлении основного вращения поверхности жидкости, его край смещен к мгновенному центру вращения (рис.3, а, кривая 1), толщина плавно убывает от 1.5 до 1.3 мм. Длина утончающегося антициклонического рукава 2.2 см, толщина – от 3 мм до 1.5 мм. Внешний (антициклонический) рукав более короткий и толстый. Детальная структура разделенных рукавов показана рис. 3, б. На этапе активного формирования структуры ширина полосы чистой воды, разделяющей рукава, уменьшается.



а)

б)

Рис. 3. Вытягивание спиральных рукавов из пятен красителя на поверхности вращающейся жидкости ($H = 10$ см, $\Omega = 100$ об/мин, $R = 7,5$ см): а) – распределение красителя спустя 1 с после соприкосновения капли с поверхностью; б) – часть изображения в увеличенном масштабе.

Отмеченные особенности начальной эволюции процесса переноса красителя из пятна, возникающего при падении капли чернил на поверхность составного вихря, сохраняются и на больших временах (рис. 4, маркер – фиолетовые анилиновые чернила, начальное положение – 1). Точка падения капли располагается на расстоянии 3.5 см от центра вращения свободной поверхности. Форма пятна, наблюдаемого спустя 1 с (угловой размер структуры относительно центра вращения свободной поверхности – 76° , радиальное положение – 2.6 ± 3.9 см), свидетельствует о частичном погружении маркера в центре и вытягивании в спиральные рукава (рис. 4, а).

Формирование первого витка спирали после попадания капли на свободную поверхность происходит достаточно быстро (рис. 4, б), спустя всего $t = 2$ с ($\tau = t/T_r = 6$, где T_r – время одного оборота диска). Здесь угловое положение края спирального рукава смещено относительно начального положения пятна на 200° . К моменту $t = 27$ с ($\tau = 81$) наблюдаются 5 полных витков спирали, эксцентриситет охватывающего овала ($\varepsilon = \sqrt{1 - (A_r/A_R)^2}$, где A_R и A_r – максимальные и минимальные размер овала, занятого спиральной структурой) составля-

ет $\varepsilon = 0.44$ (рис. 4, в), толщина спиральных рукавов немонотонно меняется в интервале от 0.7 до 2.7 мм.

На периферии течения меняется направление эволюции рукава, появляются области возвратного течения (участок кривой 2 на рис. рис. 4, г), свидетельствующие о сложной структуре составного вихря. Эксцентриситет огибающей центральной части спиральной структуры в данном случае составляет $\varepsilon = 0.42$, внешней части – 0.44, толщина рукавов составляет от 0.6 до 2.0 мм.

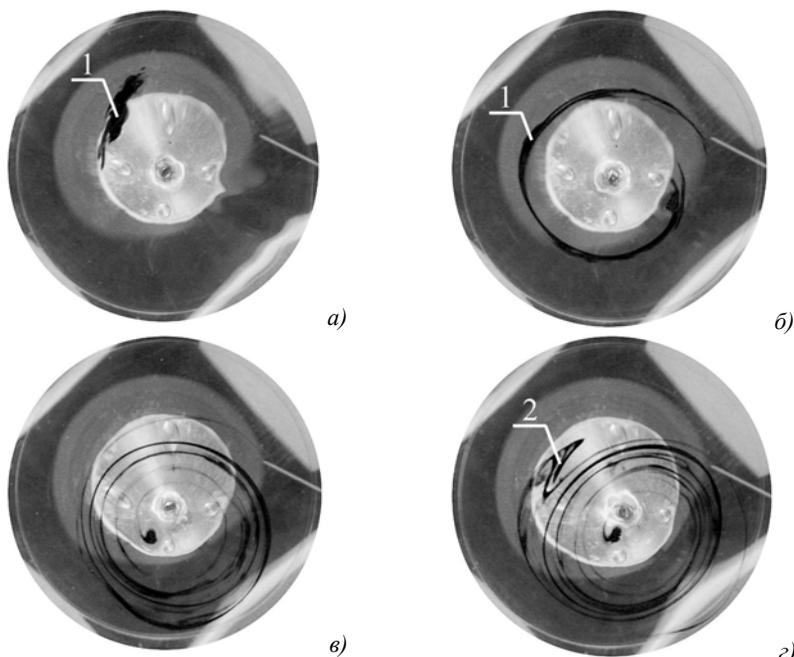


Рис. 4. Изменение области, занятой спиральными рукавами на поверхности составного вихря: а-г) – $t = 1, 12, 27, 29$ с,

($H = 40$ см, $\Omega = 190$ об/мин, $R = 7.5$ см).

4. Геометрия вихревого течения с добавлением масла. В проведенных опытах пятно маркирующей жидкости (подсолнечное или касторовое масло) заданного объема V_k помещалось на поверхность покоящейся воды. Подсолнечное масло – наиболее легкое и характеризуется наименьшим значением коэффициента поверхностного натяжения, касторовое масло более вязкое и плотное.

Всего выполнено более 100 опытов, которые позволили выделить следующие общие закономерности переноса масла из первоначально компактного пятна в толщу и по свободной поверхности жидкости.

В толще жидкости большая часть примеси собирается в масляное тело в окрестности оси вращения (рис. 5). Как и в случае растворимой примеси, масло на

поверхности жидкости формирует спиральные рукава, разделенные полосами чистой воды (рис. 6). Геометрические параметры структуры: размеры и форма рукавов, положения контактных поверхностей – зависят от радиуса и угловой скорости вращения диска, глубины слоя воды H и количества примеси V_k [7].

При умеренных скоростях вращения диска 30 мл подкрашенного подсолнечного масла практически полностью собираются в масляное тело в окрестности оси вращения. Высота масляного тела на оси вращения меньше полной глубины каверны, часть которой оказывается покрытой сравнительно тонкой масляной пленкой (рис. 5, *a*). Масляное тело в условиях данного опыта оконтурено двумя поверхностями вращения, центральные сечения которых близки к параболическим. Плавные нерегулярности формы медленно перемещаются к нижней части масляного тела. При большом увеличении в изображении различается регулярная система наклонных полос, свидетельствующая о существовании тонкоструктурных периодических возмущений границы масляное тело – вода.

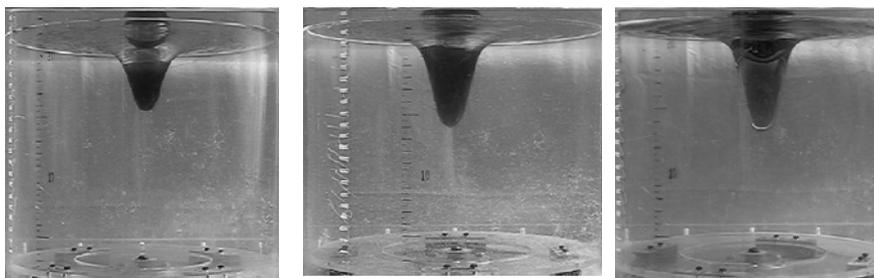
*a)**б)**в)*

Рис. 5. Формы осевого сечения поверхности жидкости на близких частотах ($R = 7.5$ см, $H = 40$ см): *a* - *в*) $\Omega = 320, 310, 320$ об/мин, $V_k = 30, 90, 150$ мл.

С увеличением добавленного объема масла до $V_k = 90$ мл увеличиваются как высота масляного тела, так и глубина прогиба свободной поверхности (рис. 5, *б*). Линия верхней границы масляного тела неровная, что указывает на увеличение амплитуды возмущений формы каверны.

При дальнейшем увеличении объема масла ($V_k = 150$ мл) высота масляного тела и глубина центральной каверны в целом практически не изменились, увеличился диаметр нижней части тела и диаметр контактной линии масло-вода на поверхности каверны (рис. 5, *в*). В этом случае четко выражен прогиб поверхности масло-воздух.

Масляное пятно в центре каверны составного вихря деформируется в несимметричную структуру, из которой вытягиваются спиральные рукава. Размеры рукавов, скорость их образования зависят от всех параметров эксперимента.

На фотографиях свободной поверхности отчетливо выделяется окружность, соответствующая линии контакта масляного тела с каверной (рис. 6). К масляному телу примыкает сплошная пленка масла угловатой формы, от внешнего края кото-

рой отходят многочисленные узкие спиральные рукава. Спиральные рукава и группа масляных пятен разделены тонкими полосами чистой воды (рис. 6, а).

С увеличением порции масла растут объем масляного тела и радиус линии контакта, а также площадь сплошной масляной пленки (рис. 6, б). При этом сама пленка становится неоднородной, на ней наблюдаются утолщенные валики спиральной формы. Внешний край масляной пленки также разбит на спиральные рукава и отдельные пятна.

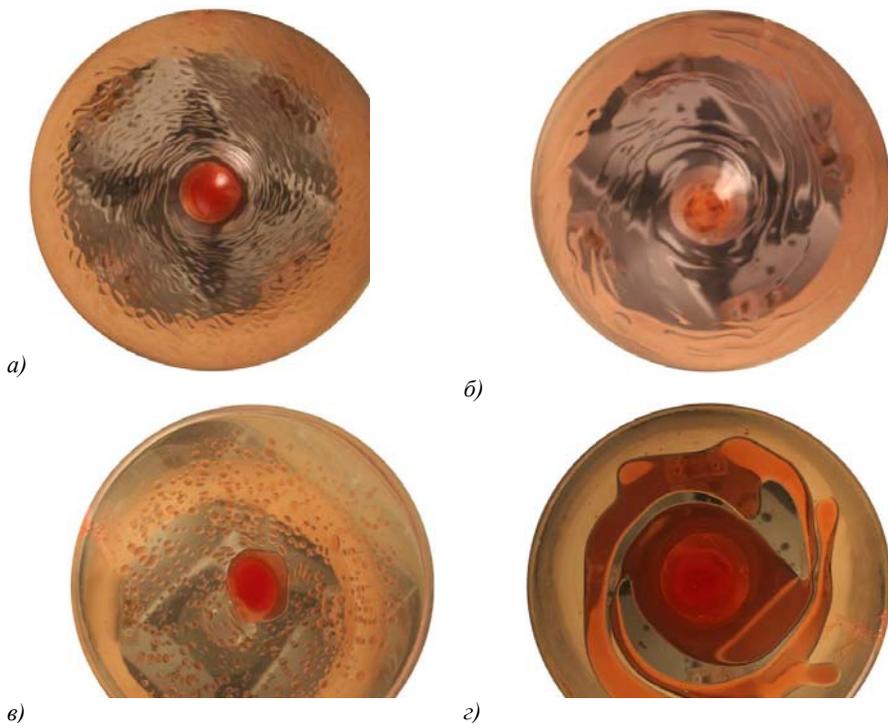


Рис. 6. Эволюция формы пятна подсолнечного масла в составном вихре ($R = 7.5$ см): а) $H = 20$ см, $\Omega = 310$ об/мин, $V_k = 90$ мл, б) $H = 20$ см, $\Omega = 320$ об/мин, $V_k = 150$ мл, в) $H = 40$ см, $\Omega = 310$ об/мин, $V_k = 30$ мл, г) $H = 20$ см, $\Omega = 260$ об/мин, $V_k = 1500$ мл.

При увеличении глубины жидкости до 40 см линия контакта масляного тела и каверны приобретает эллиптическую форму (рис. 6, в). Внешняя кромка масляной пленки в данных условиях непрерывна. Спиральные рукава на всем протяжении разбиты на отдельные капли. Площадь свободной поверхности жидкости здесь существенно больше, чем для таких же условий эксперимента при глубине жидкости 20 см, то есть большая часть примеси собирается в масляное тело.

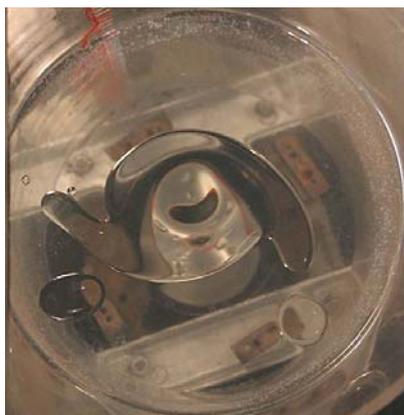
К диаметрально противоположным угловым точкам масляной пленки почти прямоугольной формы примыкают два спиральных рукава нерегулярной толщины и формы (рис. 6, з). Вся конфигурация вращается в направлении угловой скорости вращения диска, при этом спиральные рукава ориентированы во встречном направлении.

5. Сравнение картин течения в природных и лабораторных условиях.

Пятна с внешними нитевидными структурами наблюдаются во многих природных водных системах, которые подверглись загрязнению легкими несмешивающимися примесями, такими как мазут, нефть и другие. Как видно на рис. 7, пятна нефти на поверхности акватории и возникающие в ходе эксперимента формы масляного пятна на поверхности составного вихря имеют ярко выраженное сходство, что позволяет предположить подобие механизмов формирования и перераспределения поверхностных масляных загрязнений. Подобие форм распределения пятен нефти указывает на возможность существования универсальных механизмов формирования и перераспределения поверхностных масляных загрязнений.



а



б

Рис. 7. Несмешивающиеся жидкости на поверхности воды: а – фрагмент изображения MODIS Terra, изображение от 29 апреля 2010 в 16:50 UTC [11];

б – пятно подсолнечного масла на поверхности составного вихря ($R = 7.5$ см, $H = 40$ см, $V_k = 90$ мл, $\Omega = 160$ об/мин).

Заключение

Проведенные опыты показали, что компактное пятно, как смешивающейся (анилиновые чернила) с основной жидкостью, так и несмешивающейся (подсолнечное масло) примеси, внесенное на поверхность вращающейся жидкости, трансформируется в спиральные рукава. Основное течение и направление роста спиральных рукавов ориентированы в противоположные стороны. Рост спиральных рукавов происходит во всем диапазоне исследованных параметров течения.

Размеры и темп эволюции спиральных структур зависят от всех параметров эксперимента (радиуса и скорости вращения диска, глубины жидкости, количества примеси).

Во всех проведенных экспериментах примесь не может считаться пассивной, смещения отдельных окрашенных полос, положения капель масла и ориентация спиральных рукавов не отражают картину течения в составном вихре.

Все наблюдаемые картины течения устойчиво воспроизводятся в пределах точности опытов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки России (Госконтракт № 16.518.11.7059), Грант Президента РФ МК-4650.2011.1.

Литература:

1. <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/>
2. <http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/iotd2.html>
3. Актуальные проблемы механики: физико-химическая механика жидкостей и газов: сб. трудов / отв.ред. С.Т. Суржиков; Ин-т проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. – М.: Наука. 2010. (349 с.) ISBN 978-5-02-037459-1, Моделирование течений стратифицированных и вращающихся жидкостей. Сборник трудов. С. 277-348.
4. <http://www.liveinternet.ru/users/4181418/post155955062/>
5. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986. 182 с.
6. Nonji H. Vortex motions in a stratified wake flows // Fluid Dyn. Res. 1988. V. 3. No. 1 - 4. P. 425 - 430.
7. Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Анизотропный перенос примеси в составном вихре // Доклады АН. 2008. Т. 423, № 4. с. 474-478.
8. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Моделирование морских разливов нефти в лабораторных условиях //Физические проблемы экологии (Экологическая физика). Сб. научн. тр. МГУ. М.: Макс Пресс. 2011. Вып. 17.
9. Чашечкин Ю.Д. и др. Механика свободных стратифицированных течений // Препринт ИПМех РАН № 876, 2008. Москва. 2008. 128 с. стр. 84-95. Картина вихревых течений, индуцированных вращающимся диском в цилиндрическом контейнере.
10. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Деформация компактного масляного пятна в каверне составного вихря. 2010. ДАН. Т. 432. № 2. с. 185-189.
11. Чаплина Т.О., Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Перенос масла в составном вихре. Изв. РАН: МЖГ. № 2. 2011. С. 52-64.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБРЕЖНЫХ ВОД В РАННЕВЕСЕННИЙ ПЕРИОД И ВОД ХОЛОДНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ

Степанова О.Б.^{1,2}, Чубаренко И.П.¹

¹Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН,

²Московский физико-технический институт

На основе данных натурных измерений в 2004–2008 гг. (рейсы 60, 62, 68, 75, 78, 87, 93 и 95 НИС «Профессор Штокман») проводится детальный анализ вертикальной термохалинной структуры и сравнение температуры, солёности и плотности вод в марте над прибрежными подводными склонами и в июле внутри холодного промежуточного слоя (ХПС) в юго-восточной Балтике. Выяснено, что плотность прибрежных вод в марте попадает в диапазон плотностей вод ХПС, формирующегося в летний период. Путём сравнения характеристик вертикальной термохалинной структуры вод после зим различной суровости показано, что ранневесенний каскадинг более плотных вод вниз по склону, возникающий при прогреве поверхностных вод от минимальных зимних температур до температуры максимальной плотности, является эффективным механизмом вентиляции области пикноклина Балтийского моря.

Введение

Термохалинная структура вод крупных природных водоёмов является одновременно и результатом совместного действия многих факторов, и тем общим фоном, который предопределяет особенности развития каждого из них. Поэтому изучение процесса формирования термохалинной структуры оказывается основным звеном физического описания термогидромеханики бассейна, актуальным как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

В морях с резким пикноклином, каким является и Балтийское море, особой динамичностью в общей термохалинной структуре отличаются промежуточные слои. Во многих внутренних и средиземных морях особое внимание привлекают возникающие над постоянным пикноклином *холодные промежуточные слои* (ХПС): их аномально низкие температуры позволяют со значительной долей уверенности предполагать время, место и механизм их формирования. Наряду с осенне-зимней вертикальной конвекцией, причиной возникновения холодных прослоек считается стекание по склонам вод, охлаждённых на мелководьях, а также в центрах крупномасштабных вихрей. В результате теплообмена с атмосферой воды над склонами и в центрах круговоротов становятся тяжелее, чем воды верхнего перемешанного слоя, но опускаться до дна им мешает солёностная стратификация. Сползание плотных вод со склонов в зимний период считается одним из основных источников холодных промежуточных вод Чёрного моря (см., например, Овчинников, Попов, 1987; Прокопов, 2000; Stanev et al., 2003), левантийских промежуточных (Овчинников, 1983; Lascaratos et al., 1999) и глубинных вод (Leaman, Schott, 1991) Средиземного моря; его эффективность экспериментально подтверждена в бассейнах самых разных масштабов – от океана (Ivanov et al., 2004; Соснин, Богданов, 2008; Killworth, 1977) до озёр (Wüest et al., 2005; Fer et al., 2002). В Балтийском же море вопрос о возможной вентиляции

промежуточных слоёв путём адвекции вод из других регионов моря практически никогда не ставился. В данной работе мы акцентируем внимание на анализе возможности проникновения прибрежных вод Балтийского моря в область постоянного пикноклина в период ранневесеннего прогрева.

Несмотря на то, что вдольсклоновые каскады охлаждённых вод многократно наблюдались и в океане, и в морях, и в пресноводных озёрах, о работе этого механизма обмена известно по-прежнему немного. Ситуация в Балтийском море в этом отношении и типична, и уникальна. Анализ среднесезонных данных показывает (Козлова, 2010), что воды ХПС Балтики весной во многих районах моря холоднее вод на поверхности в данном месте в зимнее время, то есть балтийский ХПС, как и многие другие, имеет (хотя бы частично) адвективное происхождение. Уникальность же его состоит в том, что Балтика – солонатовое море, и температура воды в его поверхностных слоях обычно опускается за зиму ниже температуры максимальной плотности (T_{md}); в пределах ХПС воды сохраняют температуру $T < T_{md}$ до мая-июля (значение T_{md} зависит от солёности и давления, и для вод верхнего слоя Балтийского моря составляет 2.3 ± 2.5 °C).

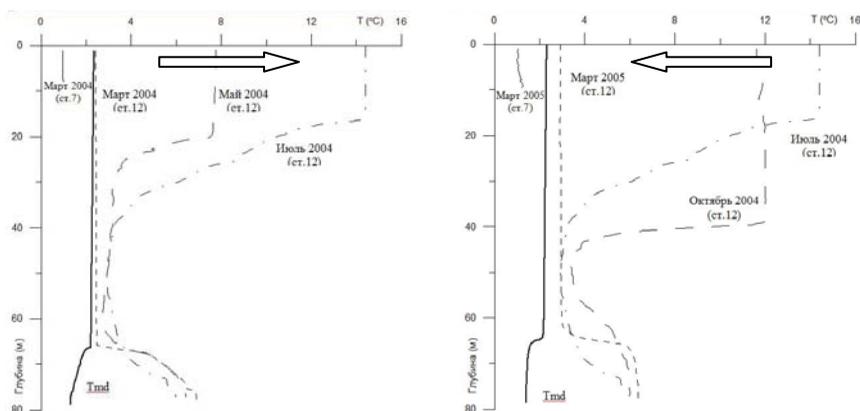


Рис. 1. Сезонная эволюция вертикальных профилей температуры воды в юго-восточной части Балтийского моря по измерениям с НИС «Профессор Штокман» (ст. 12, см. рис. 2): (а) в фазе прогрева (рейсы ПШ-59, 60, 62, март – июль 2004 г.) и (б) в фазе охлаждения (июль 2004 г. – март 2005 г.). Сплошной линией показан профиль температуры максимальной плотности, вычисленной для профиля солёности в марте (2004 и 2005 г., соответственно) с учётом влияния давления.

Рассмотрим годовой цикл изменений вертикального профиля температуры воды в юго-восточной части Балтийского моря (рис. 1а,б). К концу зимнего периода, под влиянием интенсивного ветро-волнового перемешивания и охлаждения верхнего слоя моря и с развитием вертикальных конвективных движений формируется мощный квазиоднородный слой, достигающий глубин порядка 70 м (см. профили для марта 2004 и 2005 гг.). Температура воды в верхнем квазиоднородном слое составляет в среднем 1–3 °C (Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, 1992), причём у берегов она может понижаться до 0 °C

на поверхности и ниже. В этот период температура глубинной воды выше температуры верхнего слоя и составляет 4–6 °С. Температура максимальной плотности (профили T_{md} для марта 2004 и марта 2005 гг. приведены на рис. 1) в верхнем (однородном по солёности) слое составляет 2.3-2.4 °С. После суровых и нормальных зим температура воды оказывается ниже T_{md} во всём верхнем слое. После мягких и тёплых зим, температура воды в глубокой части может оставаться выше T_{md} в течение всей зимы, но у берега (ст. 7 рис. 1) она опускается ниже T_{md} практически в любую зиму. На вертикальных профилях температуры воды для мая, июля и октября (рис. 1) хорошо виден ХПС на глубинах от 20 до 65 м. Вопрос о происхождении его вод до сих пор открыт, и дальнейший анализ призван прояснить, не могли ли они быть сформированы над ближайшими шельфами и подводными склонами при ранневесеннем прогреве.

Физический механизм формирования более плотных вод при прогреве в весенний период в пресных и солоноватых водах такой же, как и в океане при сезонном осенне-зимнем охлаждении (явление, известное как *cascading from the shelf*). Имея после зимнего периода температуру $T < T_{md}$, воды при весеннем прогреве (приближаясь к T_{md} снизу) становятся тяжелее, что вызывает вертикальную конвекцию и формирование верхнего квазиоднородного слоя (ВКС). В это время воды на шельфе, прогретые тем же количеством пришедшего тепла до более высоких температур (но всё ещё ниже T_{md}), оказываются тяжелее вод ВКС открытого моря (при равной солёности), что позволяет им скатываться по склону в глубокую часть моря до уровня, близкого по плотности. Так происходит до тех пор, пока температура воды не превысит T_{md} ; после перехода через T_{md} вода при прогреве становится только легче, остаётся в верхнем слое – формируя напрямую летнюю термическую стратификацию.

Следует заметить, что потоки тепла как при «весеннем прогреве», так и при «осеннем выхолаживании» реально изменяются не только (и не столько) в сезонном цикле, сколько в суточном, и «весенний (сезонный) прогрев» означает реально лишь то, что приток тепла в воду устойчиво превышает в суточном цикле его потери. Поэтому, строго говоря, каскадинг более плотных вод вниз по склону (равно как и их подъём вдоль склона) присутствует в суточном цикле всегда – либо в фазе ночного охлаждения (если температура воды $T > T_{md}$), либо в фазе дневного прогрева (если $T < T_{md}$), т.е. в те периоды, когда внешние условия теплообмена обеспечивают отрицательный поток плавучести в верхний слой, $B < 0$. Однако обменные течения такой природы очень инертны и - при масштабах прибрежной зоны моря в десятки километров – установление горизонтального конвективного обмена между прибрежной и глубокой частью происходит со значительной задержкой, сопоставимой по длительности с самим суточным циклом. Как следствие, на глубинах более 10-15 м (при типичных величинах естественных потоков плавучести) циркуляция ещё не успевает развиться до состояния, соответствующего максимальному отрицательному потоку плавучести через поверхность – как внешние условия уже сменяются на обратные, и ещё не развившиеся течения тормозятся вновь возникшим и нарастающим градиентом давления противоположного знака. Поэтому в суточном цикле, более-менее равновесном в смысле потоков тепла/плавучести, действие соответствующей дневной/ночной циркуляции вод ограничивается некоторой областью в прибрежной зоне. Но если это равновесие устойчиво нарушается изо дня в день –

то обменные течения соответствующего знака день за днём поддерживаются и в глубокой части. Таким образом, эффективность проникновения в глубокую часть моря более плотных вод, сформированных над шельфами и подводными склонами моря, оказывается значительно больше при сезонных, а не при суточных колебаниях потоков тепла.

С точки зрения вентиляции возможно более глубоких слоёв, «весенний» каскадинг очевидно должен обладать большей эффективностью, чем «осенний» по целому ряду причин. Во-первых, весной значительно больше толщина ВКС (см. профили для марта и для октября на рис. 1б: толщина ВКС составляет 40 и 65 м, соответственно) – следовательно, «более плотные по отношению к ВКС воды», формирующиеся в прибрежной зоне, весной потенциально могут проникать значительно глубже. Во-вторых, собственно плотность вод ВКС весной несколько больше, чем осенью; так, в рассматриваемом районе, согласно среднесезонным данным (Janssen et al., 1999), солёность марте примерно на 0.1 промилле выше (!), чем в ноябре (7.4-7.5 psu против 7.3-7.4 psu), а температура воды в марте практически равна температуре максимальной плотности. И, в-третьих, теплопотоки в весеннее время несколько выше, чем в осеннее.

Основной задачей данной работы является анализ данных натуральных измерений, проводившихся в прибрежной зоне юго-восточной части Балтийского моря в период ранневесеннего прогрева после зим различной суровости, и последующее сопоставление свойств прибрежных вод со свойствами вод, наблюдаемых внутри холодного промежуточного слоя в тёплый период, когда ХПС уже отчётливо выделяется.

Натурные данные

В работе анализируются данные гидрофизических исследований, выполненных в прибрежной (станция 7) и глубоководной (станции 12 и 22) зоне юго-восточной части Балтийского в различные сезоны (март, май, июль, октябрь) с 2004 по 2008 гг. (8 рейсов НИС «Профессор Штокман»: ПШ-60, 62, 68, 75, 78, 87, 93 и 95). Карта района, поле глубин и положение станций приведены на рис. 2. Исследования выполнялись в рамках экологического мониторинга по программе ООО «ЛУКОЙЛ-КМН». Для анализа использованы данные вертикальных STD-зондирований, выполненные с помощью STD зонда Neil Brown Mark III и имеющие разрешение по вертикали 0.1-0.2 м. Точность измерений, обеспечиваемая прибором, такова: давление – 0.5децибар / температура – 0.005°C / электропроводность – 0.005; / частота сбора данных – 33 Гц / постоянная времени «быстрого» датчика температуры 0.03 сек.

Результаты анализа и обсуждение

Определение ХПС.

Прежде всего, формально определим, что такое ХПС. Для этого рассмотрим вертикальные профили температуры воды и плотности в глубокой части моря (где вертикальная термохалинная структура не искажена возможным влиянием близких берегов) в начале тёплого периода (когда ХПС наиболее ясно выражен и ещё не сильно модифицирован имеющейся динамикой вод). Примером может служить профиль для мая 2004 г. (рис. 1а). Формально будем считать Холодным Промежуточным Слоем слой от глубины, где температура имеет максимальный

отрицательный градиент по вертикали (термоклин) - до глубины, где температура имеет максимальный положительный градиент по вертикали (анти-термоклин). При всех недостатках этого формального подхода, он позволяет довольно легко выделять ХПС на профилях различной степени сложности. Всего было рассмотрено 11 вертикальных STD-профилей, полученных в рейсах ПШ-60, 62, 68, 78, 87, 95 и содержащих в своей структуре холодный промежуточный слой. Они представляют характеристики вод юго-восточной Балтики в весенне-летний период 2004-2008 годов. При анализе плотность воды в зависимости от температуры, солёности и давления $\rho(t, S, p)$ вычислялась по формуле Chen & Millero (UNESCO, 1981), которая применима в диапазоне температуры от -2°C до 40°C , солёности – от 0 до 42 psu, давления – от 0 до 1000 бар.

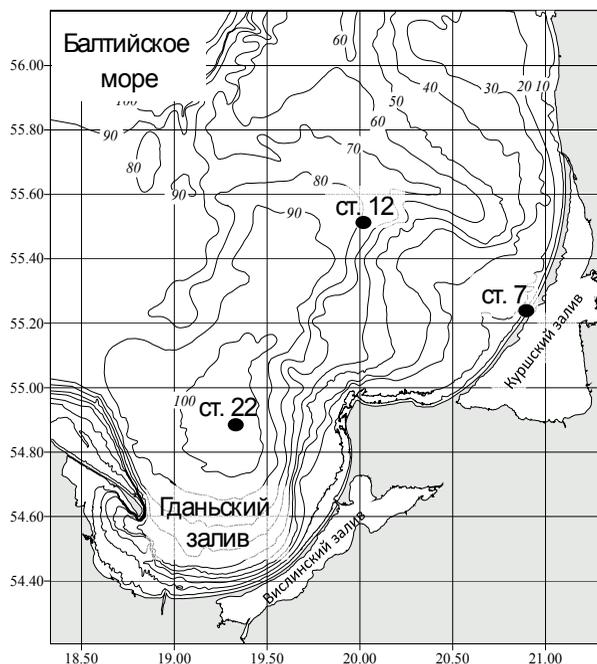


Рис. 2.
Поле глубин в юго-восточной части Балтийского моря и расположение станций 7, 12 и 22 экологического мониторинга «ЛУКОЙЛ-КМН».

Границы и мощность ХПС.

Глубина залегания основного термоклина на рассмотренных профилях изменялась от 12.3 до 49.5 м, с максимальным градиентом температуры по вертикали в нём от 1.5 до 6.2 $^{\circ}\text{C}/\text{м}$. Анти-термоклин располагался на глубинах 65.7-80.7 м (максимальный градиент температуры 0.4 – 1.8 $^{\circ}\text{C}/\text{м}$). Таким образом, мощность ХПС составляла от 23 м (после холодной(!) зимы 2003/4 гг. до 61 м (после тёплой(!) зимы 2004/5 гг.). Интересно, что на глубоководных станциях одного рейса, выполненных с интервалом в 3 суток, глубина залегания сезонного термоклина могла изменяться очень значительно (например, от 26 до 50 м на

станциях 12 и 22 в июле 2004 года), что меняет мощность ХПС от 47 до 23 метров. Средняя мощность по всем рассмотренным профилям составила 48 ± 10 м.

Оказалось, что положение постоянного пикноклина не совпадает с положением анти-термоклина: по рассмотренной выборке, пикноклин мог находиться и на 11 м выше анти-термоклина, и на 13 м ниже его. Это говорит о различии механизмов их формирования и поддержания: положение пикноклина обусловлено структурой поля солёности, определяемого крупномасштабными процессами, а термоклин (даже находящийся так глубоко – *под* ХПС) отражает мезомасштабный перенос тепла течениями и его диффузию, более быструю, чем у солёности).

Структура ХПС и его свойства.

Оказалось, что ХПС имеет сложную структуру по многим параметрам. Так, по плотности можно уверенно выделить однородный подслои толщины 18-59 м, где вариации плотности по вертикали менее $0.02 \text{ кг/м}^3/\text{м}$, и градиентный подслои толщины 4-30 м, в котором плотность меняется с глубиной в десятки раз быстрее. Изменение температуры воды с глубиной в пределах ХПС ещё более сложно (см. графики рис. 1 и 3): она падает с глубиной в верхней части, растёт в нижней, может иметь внутри несколько максимумов/минимумов, участков линейного роста/падения, ступенек разной величины. В некоторые годы (например, 2005, 2006) на глубинах 50-65 м существует холодный подслои с $T < T_{\text{md}}$ мощностью от 5 до 10 м. Сложность структуры однозначно говорит о том, что ХПС не может быть просто «остатком» зимней вертикальной конвекции, а в значительной мере сформирован горизонтальным транспортом.

Обобщая данные вертикальных зондирований за май-июль 2004-2007 годов, воды ХПС в ЮВБ можно охарактеризовать следующим образом:

- диапазон температуры воды (в разные годы) - от $4.7\text{-}11.6 \text{ }^\circ\text{C}$ (на верхней границе) до $3.0\text{-}6.3 \text{ }^\circ\text{C}$ (на нижней границе);

- диапазон солёности - от $7.14\text{-}7.37 \text{ psu}$ (на верхней границе) до $8.00\text{-}10.91 \text{ psu}$ (на нижней границе);

- диапазон условной плотности: от $5.42\text{-}6.04 \text{ кг/м}^3$ (на верхней границе) до $6.71\text{-}8.92 \text{ кг/м}^3$ (на нижней границе).

Минимальная температура воды ХПС по рассмотренным данным составляла $2.1\text{-}4.2 \text{ }^\circ\text{C}$, отмечалась на глубине от 51 до 71 м, и соответствовала солёности $7.36\text{-}8.02 \text{ psu}$; условная плотность в этом месте составляла $6.12\text{-}6.70 \text{ кг/м}^3$.

Средняя температура вод в пределах ХПС составляла от $2.9 \text{ }^\circ\text{C}$ (2006 г.) до $5.7 \text{ }^\circ\text{C}$ (2007); теплозапас 1 м^2 ХПС – $(4.15 \pm 12.2) \times 10^8$ Дж.

Сравнение характеристик вод в прибрежной и глубокой части ранней весной с характеристиками вод ХПС после зим различной суровости.

С целью выяснения диапазона естественной изменчивости рассматриваемых характеристик ХПС в юго-восточной Балтике и сравнения прибрежных и глубоких вод был проведён анализ данных рейсов ПШ-75,78 и ПШ-93,95, проводившихся в марте и июле 2006 и 2008 года. В качестве данных для «глубокой части» были взяты вертикальные профили станции 12 ($55^\circ 35' \text{ с.ш.}, 20^\circ 2' \text{ в.д.}$), см. рис. 2, глубина на которой составляет около 80 метров. Для характеристики прибрежных вод рассматривались профили станции 7 ($55^\circ 14' \text{ с.ш.}, 20^\circ 53' \text{ в.д.}$; см. рис. 2), где

глубина составляет 10-12 метров. Именно 2006 и 2008 года были выбраны для сравнения на основании максимального/минимального в 2004-2008 гг. значений температуры воды на поверхности в марте месяце и наличии/отсутствии прослойки с $T < T_{md}$. Так в 2006 году температура на поверхности в прибрежной зоне (ст. 7) и в глубокой части (ст. 12) опускалась ниже T_{md} (-0.305 °C и $1,733$ °C соответственно; T_{md} при наблюдавшейся солёности составляет $2.3-2.5$ °C). В 2008 году температура воды на поверхности на тех же станциях была выше T_{md} (минимальная температура составили $4,27$ °C).

Данные за более холодный **2006 г.** показывают следующее. В июле профили температуры, солёности, условной плотности и $T_{md}(S,p)$ имели вид, приведённый на рис. 3. Следуя введённому выше определению ХПС, по профилю июля определяем его характеристики: границы – от 15 м до 69 м, ядро ($\min T$) на глубине 57 м, слой от 55 м до 61 м имеет $T < T_{md}$. Остальные параметры ХПС в июле 2006 г. приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Характеристики ХПС в глубоководной части юго-восточной Балтики (ст. 12) в июле 2006 г. и в июле 2008 г.

	2006	2008
Глубина залегания термоклина [м]	14.9 (29)	25.8
$(dT/dz)_{\min}$ [°C/м]	-4.079 (-2.719)	-6.158
T [°C]	12.252 (5.03)	8.94
σ [кг/м ³]	5.14 (5.86)	5.56
S [psu]	7.32 (7.42)	7.37
Глубина залегания антитермоклина [м]	68.9	68.3
$(dT/dz)_{\max}$ [°C/м]	1.36	0.54
T [°C] / σ [кг/м ³] / S [psu]	3.8 / 7.07 / 8.89	5.0 / 7.12 / 9.0
Глубина залегания пикноклина [м]	77.3	67.2
$(dp/dz)_{\max}$	1.17	0.86
T [°C] / σ [кг/м ³] / S [psu]	6.12 / 8.51 / 10.84	4.8 / 6.8 / 8.6
Глубина квазиоднородного слоя [м]	до глуб. 61 м	до глуб. 64 м
$(dp/dz) < \dots$	0.04	0.16
T [°C] / σ [кг/м ³] / S [psu]	2.2 / 6.19 / 7.77	4.46 / 6.2 / 7.8
Мощность ХПС [М]:		
-общая (между термоклинном/антитерм.)	54 (40)	42.5
-однор./град. подслои	32/8	38/3
Теплозапас [Дж]	$5.8 \cdot 10^8$	$1.1 \cdot 10^9$
T средняя [°C]	4.54	5.08
Слой с $T < T_{md}$: от/до [м]	54.9-61.2	нет
T_{\min} [°C] / S(T_{\min}) [psu] / $\sigma(T_{\min})$ [кг/м ³]	2.08 / 7.64 / 6.09	4.24 / 7.53 / 5.98
Глубина залегания слоя с T_{\min} [м]	57.1	56

Сравним температуру, солёность и плотность вод в марте в прибрежной зоне моря (ст. 7) и в глубокой части (ст. 12) и сопоставим их со значениями в июле в пределах ХПС (ст. 12), см. рис. 3. Прежде всего отметим (см. график температуры на рис. 3а), что в момент измерений в марте месяце 2006 года прибрежные воды

значительно холоднее вод ВКС глубокой части, что говорит о продолжающемся выхолаживании; температура прибрежных вод (до $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) значительно ниже температуры поверхностных вод в открытой части ($1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$), а также уверенно ниже температуры максимальной плотности ($2.3\text{--}2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) следовательно, начало прогрева должно сопровождаться каскадингом с прибрежных подводных склонов. Далее, анализируя графики плотности (рис. 3в), отметим, что в марте плотность прибрежных вод составила 5.9 кг/м^3 , при этом в глубокой части плотность вод 60-метрового ВКС близка к 6 кг/м^3 , и оба эти значения плотности уверенно попадают в диапазон свойств ХПС: в глубокой части моря в июле - от 5.14 до 7.07 кг/м^3 .

Данные за значительно более тёплый год **2008** показывают следующую картину. В июле 2008 в глубоководной части (ст. 12) профили температуры, солёности, условной плотности и температуры $T_{md}(S,p)$ имели вид, приведённый на рис. 3. Под ХПС тогда следует понимать слой от 26 м до 78 м, ядро ($\min T$) находится на глубине 56 м, а слоя с $T < T_{md}$ в этом году не наблюдается. Остальные параметры ХПС в июле 2008 г. также приведены в Таблице 1. Видно, что после аномально мягкой зимы температура воды до самого начала весеннего прогрева остаётся заметно выше T_{md} . Во время измерений температуры прибрежных и глубоких вод (до 78 м глубины) были практически одинаковы, но солёность прибрежных вод была на 0.5 рсу ниже. Эта разность в солёности определила меньшую плотность прибрежных вод.

Тем не менее, сравнивая графики плотности для 2008 г. на рис. 3, видим, что после тёплой зимы – в 2008 г. – в марте плотность прибрежных вод составляла 5.6 кг/м^3 , а диапазон плотностей внутри ХПС в глубокой части моря в июле - от 5.56 до 7.12 кг/м^3 , то есть прибрежные воды снова оказываются по плотности внутри диапазона ХПС. При этом обращает на себя внимание такая деталь: после мягкой зимы и в отсутствие T_{md} , ХПС образовался *внутри* того слоя, который был перемешан с поверхности в ранневесенний период. Его структура по-прежнему неоднородна, что говорит о вкладе горизонтального транспорта уже после периода максимально глубокого перемешивания, но по глубине всё-таки ХПС (от 26 до 68 м) полностью вписывается в слой, который был перемешан в марте (до глубин порядка 78 м). После холодной же зимы (и охлаждения ниже T_{md}), ХПС значительной частью находится ниже мартовского перемешанного слоя. Это может быть как раз признаком ранневесеннего каскадинга при прогреве от $T < T_{md}$.

Заключение

Анализ натуральных данных показывает, что переход температуры воды через T_{md} в Балтике (как и в пресноводных озёрах – Байкале, Ладоге) сопровождается вентилицией наиболее глубоких слоёв, какие только доступны поверхностным водам по плотности. В течение весны-лета эта «горизонтальная» вентилиция от берега работает только в самых верхних слоях (дневной/ночной, синоптический прогрев/выхолаживание), осенью-зимой «каскадинг при охлаждении» сначала размывает пикноклин (осенью), а затем (после периода максимального вертикального перемешивания) «надувает» верхнюю часть будущего ХПС. И именно при ранневесеннем каскадинге при прогреве от $T < T_{md}$ – становится возможным максимально глубокое проникновение поверхностных вод, когда они вентилируют уже практически область пикноклина.

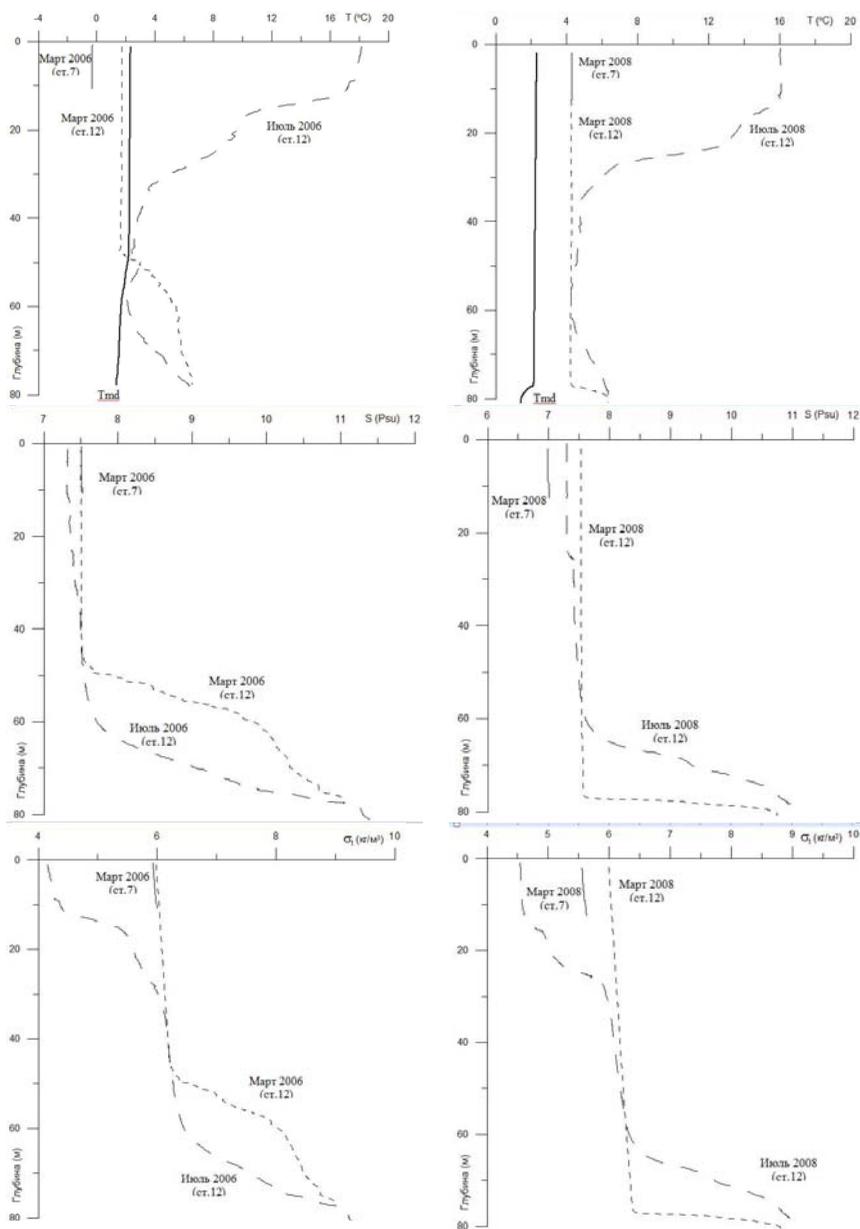


Рис. 3. Профили температуры, Tmd(S,p), солёности и плотности на станциях 7 и 12 в марте и июле 2006 и 2008 гг. (по данным рейсов ПШ-75, 78, 93, 95).

Таким образом, обнаружены факты, подтверждающие выдвигаемую гипотезу о формировании наиболее холодных вод ХПС Балтики за счёт стекания вод с ближайших шельфов и подводных склонов. Совсем необязательно эффективный «ранневесенний каскадинг» должен быть вызван *только* прогревом – мог этому способствовать ветер, общая циркуляция вод в Гданьском бассейне, внутренние волны или другие внешние факторы, для расстановки которых по приоритетам нужен дополнительный анализ. Однако факт - ранневесенний каскадинг в Балтийском море существует, эффективен и вентилирует область пикноклина – уже очевиден.

Помимо этого, проведённый анализ натуральных данных позволил сделать следующие выводы. В юго-восточной части Балтийского моря ХПС существует не менее 8 месяцев в году (с апреля по ноябрь). За это время минимальная температура в его ядре повышается всего на 1 градус (с 2.4 °С до 3.4 °С), а мощность уменьшается. По данной выборке, даже после холодной зимы (2003-2004 гг.), температура воды в ХПС Гданьского бассейна стала выше температуры максимальной плотности уже в мае.

Анализ данных для ранневесеннего периода подтверждает, что после типичных и холодных зим в марте они имеют температуру ниже температуры максимальной плотности. Характеристики вод прибрежной зоны вокруг Самбийского полуострова (температура, солёность, плотность) попадают в диапазон характеристик вод ХПС в Гданьском бассейне в летний период.

Авторы благодарят С.А.Щуку и Д.В.Дорохова за предоставление натуральных данных.

Исследования проводятся при поддержке РФФИ, проекты 09-05-00540а, 11-05-90737 моб_ст, 09-05-00446а.

Литература

1. *Козлова О.И.* 2010. Характеристики холодного промежуточного слоя в центральной части Балтийского моря после зим различной суровости. // Исслед. в России. Стр. 149-158. <http://zhurnal.gpi.ru/articles/2010/010.pdf>
2. *Овчинников И.М.* О формировании промежуточных (левантийских) вод в Средиземном море // ДАН. 1983. Т. 270. № 5. С. 1216-1220.
3. *Овчинников И.М., Попов Ю.И.* Формирование холодного промежуточного слоя в Чёрном море // Океанология. 1987. Т. 27. № 5. С. 739-746.
4. *Прокопов О.И.* Формирование структуры холодного промежуточного слоя в Чёрном море // Метеорология и гидрология. 2000. №5. С.76-85.
5. *Соснин В.А., Богданов К.Т.* О происхождении минимума солёности на промежуточных глубинах Тихого океана // ДАН. 2008. Т. 421. № 2. С. 253-255.
6. *Fer I., Lemmin U., Thorpe S.A.* Winter cascading of cold water in Lake Geneva // J. Geophys. Res. 2002. 107: 2236-2569.
7. *Ivanov V.V., Shapiro G.I., Huthnance J.M., Aleynik D.L., Golovin P.N.* Cascades of dense water around the world ocean // Progress in Oceanography. 2004. 60(1): 47-98.
8. *Janssen, F., C. Schrum, J.O. Backhaus.* A climatological data set of temperature and salinity for the Baltic Sea and the North Sea // Deutsche Hydrographische Zeitschrift. 1999. Suppl.9. 246 p.
9. *Killworth P.D.* Mixing on the Weddell Sea continental Slope // Deep-Sea Res. 1977. 24: 427-448.

10. *Lascaratos A., Roether W., Nittis K., Klein B.* Recent changes in deep water formation and spreading in the eastern Mediterranean Sea: a review // *Progress in Oceanography*. 1999. 44: 5–36.
11. *Leaman K.D., Schott F.A.* Hydrographic structure of the convection regime in the Gulf of Lions: winter 1987 // *J. Phys. Oceanogr.* 1991. 21: 575–598.
12. *Stanev E.V., Bowman M.J., Peneva E.L., Staneva J.V.* Control of Black Sea intermediate water mass formation by dynamics and topography: comparisons of numerical simulations, survey and satellite data // *J. Mar. Res.* 2003: 59–99.
13. UNESCO. 1981. The Practical Salinity Scale 1978 and the International Equation of State of Sea Water 1980 // UNESCO Technical Papers in Marine Science, 36.
14. *Wüest A., Ravens T.M., Granin N.G.* Cold intrusions in Lake Baikal: Direct observational evidence for deep-water renewal // *Limnology and Oceanography*. 2005. 50 (1): 184–196.

УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ПОЛИГОН «ВОЛГОВЕРХОВЬЕ»

А.П.Тищенко¹, Ю.А.Пирогов², Д.А.Тищенко², Н.Н.Тищенко¹

¹*Тверской государственной университет*

²*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

Учебно-научный полигон «Волговерховье» создавался по инициативе Тверского и Московского государственных университетов с целью проведения фундаментальных и прикладных научных исследований по моделированию природно-антропогенных геоэкоосистем. Одной из основных задач данного проекта являлось обеспечение студентов обоих университетов базой для практических занятий и междисциплинарных научных исследований в области геоэкологии и экологической физики [1-6].

На полигоне был развернут комплекс научно-исследовательской аппаратуры, включающей универсальный комплект метеорологического, геофизического, термометрического, радиофизического и геохимического оборудования, созданы инженерно-технические сооружения для проведения непрерывных в течение годового природного цикла измерений различных физико-химических параметров атмосферы, гидросферы, биосферы, литосферы.

Накопление и обработка всей поступающей информации производилась на рабочей компьютерной станции, расположенной в специально построенном лабораторном блоке.

Измерялись транспирационные потоки в стволах деревьев. При этом использовались 2 основных подхода.

1. Метод теплового баланса. На дереве на уровне 1,5 м устанавливались параллельно 5 плоских электродов с одной стороны и 5 - с другой. Над электродами, имевших разную полярность, и под ними на расстоянии 0,5-1 см, заглублялись по две термопары; диагонально по отношению к «блоку» электродов на расстоянии 5 см устанавливались 4 контрольные термопары. Точно такое же оборудование находилось на противоположной стороне дерева. Каждое дерево в районе расположения датчиков оборачивалось системой слоев (поролоном, алюминиевой фольгой и полиэтиленом) для обеспечения термо- и гидроизоляции.

2. Метод теплового поля. Заключается в использовании «игольчатого датчика», который представляет собой игольчатый электрод-нагреватель, установленный в центре и окруженный пятью термопарами по углам правильного пятиугольника. Шестая термопара находилась непосредственно под электродом; датчики располагались с двух сторон дерева и имели гидрозащиту. Преимущество этого метода в большей чувствительности к слабым транспирационным потокам.

Экологам хорошо известна высокая токсичность ряда тяжелых металлов, к которым относятся ртуть, свинец, олово, таллий, теллур, хром и другие. Эти металлы, а также их соединения, являются высокотоксичными в водных растворах. Так, ртуть токсична для человека при концентрации 5×10^{-3} мг/л. Водные растворы таких металлов, как никель, свинец, титан, висмут и хром токсичны для человека при концентрации около 0.1 мг/л.

Известны некоторые химические и биофизические механизмы воздействия тяжелых металлов на функционирование живых клеток и организмов [7]. К ним относятся такие, как отравление ферментов, нарушение проницаемости мембран, нарушение электронного транспорта, блокирование нервной проводимости, а также развитие цепных свободно радикальных процессов. Чтобы определить наличие и концентрацию токсичных солей тяжелых металлов в водном растворе проводятся измерения светорассеяния с изменением величины pH (путем добавления в раствор щелочи или кислоты). При этом при некотором значении pH (в так называемой изоэлектрической точке белка) измеряемая масса достигает максимальной величины, значение которой растет пропорционально концентрации тяжелого металла.

В районе полигона регулярно брались пробы в нескольких точках: из притока р. Волги, из колодцев, из Чистой речки, из озера Волго (у берега и на глубине до 10 м).

При проведении измерений содержания токсичных соединений в пробах воды, взятых из разных точек бассейна реки Волги, в т.ч. из Чистой речки и озера Волго, использовались установка с He-Ne лазером и фотоэлектрической регистрацией излучения, а также прибор Luminometer - 1251 LKB Wallac с одной лампой в качестве источника света, модернизированной с помощью оптического волокна и светофильтра для регистрации рассеянного излучения под 90° к падающему лучу. Исследования показали, что наибольшее количество солей тяжелых металлов находится в озере на глубине более 6 метров, наименьшее - в воде Чистой речки.

Полигон регулярно обеспечивается материалами космических съемок со спутников «Метор-3М» (6 спектральных диапазонов) и «Тетра» (36 спектральных диапазонов) для построения модели геоэкологической системы «Волговерховья». С этой целью заключен специальный договор с НИЦ «Планета», являющимся государственным владельцем материалов космических съемок.

Выбор места для учебно-научного полигона определялся уникальным географическим положением территории Волговерховья [8-11].

Полигон Волговерховье уже с 1995 года обеспечивает проведение учебных практик студентов и работ аспирантов Тверского и Московского госуниверситетов по специальностям геоэкология и физические методы геоэкологического мониторинга.

Основными источниками геоинформации являются многолетние материалы многозональных аэрокосмических съемок, наземных наблюдений на постах

Госкомгидромета, наблюдений на специализированной станции, а также полевых экспедиционных работ, выполняемых студентами, аспирантами и преподавателями указанных вузов. Используются также данные Валдайской обсерватории. Высокий уровень исследований обеспечивается, в том числе, регулярностью полевых и камеральных работ в рамках учебных практик и лабораторных занятий. В результате повышается качество обучения и проведения исследовательских работ, поскольку они основываются на данных реальных многолетних наблюдений состояния сложной геоэкологической системы – водосбора Верхней Волги.

Вообще говоря, гидрологические наблюдения в Волговерховье проводились с давних времен и сейчас, например, имеется практически 150-летний ряд наблюдений годового стока вблизи поселка Селище.

На всю территорию Волговерховья Институтом мониторинга земель и экосистем выполнена в видимом диапазоне ЭМИ аэрофотосъемка (М. 1:500 000) и съемка с самолета локатором бокового обзора в СВЧ-диапазоне. Кроме того, НИЦ Космической гидрометеорологии выполнили многозональную космическую съемку территории с ИСЗ «Ресурс-01» и продолжает эти съемки, создавая временные ряды наблюдений. С указанными организациями у МГУ и ТвГУ имеются долгосрочные договоры о сотрудничестве. Эти организации накопили многолетние ряды наблюдений, что существенно облегчает геоэкологические исследования.

Материалы этих съемок используются с 1999 г. студентами ТвГУ для создания новых и уточнения имеющихся тематических карт:

- гидрографии;
- рельефа;
- растительности;
- населенных пунктов;
- кристаллического фундамента;
- почв;
- четвертичных отложений.

Собран большой объем ежедневных гидрометеорологических данных со станций Осташков, Торопец, Заповедник, Нелидово, Ржев за срок с 1980 по 2000 гг., а также данные за те же годы о расходе воды с плотины в поселке Селище [12,13].

Аппаратно-технический комплекс учебно-научного полигона состоял из пяти самостоятельных подсистем сбора метеорологических и геоэкологических параметров, объединенных в автоматизированную систему контроля, сбора и обработки их на тестовом участке “Чистая речка”.

Для дистанционных измерений характеристик подстилающей поверхности и ее покрова, использовавшихся при дешифрировании космических и аэрофотоснимков, была построена 40-метровая вышка с лифтовой платформой для размещения и подъема аппаратуры дистанционного зондирования в ИК и ММ диапазонах и радиационного контроля падающей и отраженной радиации (рис.1).

В центре полигона создана и эксплуатируется специальная автоматизированная система, осуществляющая геоэкологические измерения. Она включает в себя измерение температуры воздуха и почвы, влажности воздуха и почвы, осадков, скорости и направления ветра, падающей и отраженной солнечной радиации, содержание CO_2 и H_2O в воздухе.

На вышке была установлена прецизионная аппаратура для измерения ме-

теоретических и геоэкологических параметров, позволяющая осуществлять круглогодичный мониторинг динамики содержания CO_2 и H_2O , температуры и влажности воздуха, количества осадков, падающей и отраженной солнечной радиации, скорости и трехмерного направления воздушных потоков.

В процессе проведенных на полигоне экспериментов был решен ряд фундаментальных и прикладных задач.

Анализ материалов показал [12-18], что:

- за последние 20 лет среднегодовая температура увеличилась на 1° ;
- среднегодовой сток не изменился;

- количество осадков увеличилось на 35 мм. в год (рис. 2), что равносильно увеличению осадков приблизительно на 5 %.



Рис 1. Вышка с аппаратурой дистанционного зондирования.

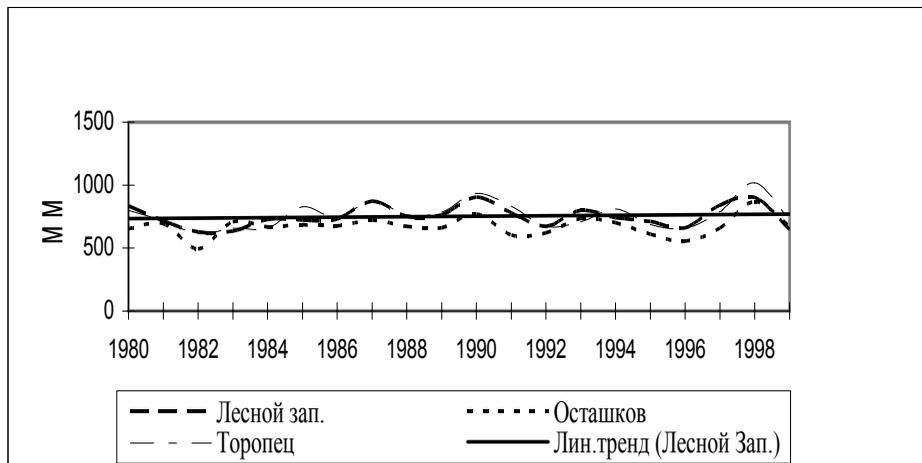


Рис. 2. Динамика годового количества осадков на станциях Лесной Заповедник, Осташков и Торопец за период 1980-1999 гг.

Из графиков рис. 2 следует, что если сток не изменился, а осадки увеличились, то изменилось испарение, поскольку увеличилась среднегодовая температура и как следствие повысилась общая активность фотосинтеза и транспирации.

Анализ проб воды методом светорассеяния показал, что наилучшая по содержанию примесей (тяжелых металлов и пр.) вода в Черной речке, раза в полтора больше примесей в колодцах и поверхностных водах озера Волго, в два раза выше содержание примесей в озере на глубине 6 м и более.

По материалам исследований, проведенных студентами, аспирантами и сотрудниками ТвГУ и МГУ на полигоне «Волговерховье», коллективом авторов из обоих университетов подготовлена к печати с выходом в свет в 2012 году монография «Учебно-научный полигон «Волговерховье», под редакцией А.П.Тищенко и Ю.А.Пирогова.

Литература

1. Пирогов Ю.А., Тищенко Н.Н., Тищенко А.П., Ковалевская О.В., Козлов Б.В. Ядро Главного водораздела Русской равнины как объект для полигонных исследований по проблеме физической экологии// Физические проблемы экологии.- М.: Физич.ф-т МГУ, 1999.
2. Тищенко А.П. Создание ГИС для геофизического полигона «Главный водораздел Русской равнины» // Физические проблемы экологии.- М.: Физич. ф-т МГУ, 1997.
3. Тищенко А.П., Тищенко Н.Н. Учебно-научный полигон «Волговерховье»//Труды ТвГУ.- Тверь: ТвГУ, 2001.
4. Тищенко Н.Н. Тематические базы данных для ГИС учебно-научного полигона «Волговерховье»//Актуальные проблемы геоэкологии. Проблемы и перспекти-

- вы развития туризма и рекреации в Волжском регионе. Межд. научн. конф. Ч.2.- Тверь: ТвГУ, 2002, с.100-101.
5. Тищенко Н.Н. Учебно-научный полигон «Волговерховья»: реальные пути дальнейших научно-исследовательских работ и организация учебного процесса//Геоэкология и рациональное природопользование. Труды науч.конф.- Тверь: ТвГУ, 2005, с.149-152.
 6. Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е., Шрейдер А.А. Основы экологической геофизики. Учеб. пособие.- М.: Изд-во «Лань», 2004, 384 с.
 7. Петрусевич Ю.М., Петрова Г.П., Папиш Е.А. Физический механизм действия малых концентраций токсических тяжелых металлов на растворы белков и ферментов// Физические проблемы экологии, №17, 2011, с.289-290.
 8. Косов В.И., Левинский В.В., Косова И.В. Экология Верхневолжской водной системы.- Тверь: «Булат», 2003, 180с.
 9. Тищенко А.П. Ядро Главного водораздела Русской равнины // Администрация Тверской области. Тверская областная организация общества «Знание» России. Тверской информ. Центр Российского Зеленого креста. Сохранение и восстановление Национальных ландшафтов в Тверской области. Материалы научн.-практ. семинара.- Тверь: Знание, 2002.
 10. Тищенко А.П., Пирогов Ю.А., Ковалевская О.В., Козлов Б.В., Тищенко Н.Н. Выделение границ Ядра Главного водораздела Русской равнины//Моделирование сложных систем. Вып.1.- Тверь: ТвГУ, 1998. –с.124-134.
 11. Култашев Н.Б. Геоэкологические аспекты взаимодействия населения и природы в Тверском Верхневолжье: особые структуры территории//Актуальные проблемы геоэкологии. Труды междунар. науч.конф. Ч. 1.- Тверь: ТвГУ, 2002. – с.172-176
 12. Кудинов А.Н., Жилиба А.И., Тищенко А.П. Качественный анализ динамики стока воды с территории Ядра Главного водораздела Русской равнины// Физические проблемы экологии.- М.: физич. ф-т МГУ, 1997.
 13. Кудинов А.Н., Тищенко А.П., Жилиба А.И. Фазовый портрет динамики подземного стока с Ядра Главного водораздела Русской равнины // 2-ая Всеросс. научн. конф. «Физические проблемы экологии».- М.: физич. ф-т МГУ, 1999.
 14. Лазарев О.Е., Лазарева О.С. Особенности режима температуры и осадков на территории Волговерховья по данным современных наблюдений// Вестник Тверского государственного университета. Сер. География и геоэкология. Вып. 1. 2004.
 15. Лазарев О.Е., Тищенко Н.Н. Анализ многолетних метеорологических данных на территории Волговерховья//Актуальные проблемы геоэкологии. Труды междунар.науч.конф. Ч.1.- Тверь: ТвГУ, 2002, с.181-182.
 16. Тищенко Н.Н., Лазарев О.Е. Анализ многолетних метеорологических данных на территории Волговерховья//Труды ТвГУ.- Тверь: ТвГУ, 2001.
 17. Asmus V.V., Tischenko A.P., Selevanov A.S. Nature of Earth from Space. India.-Deli: Oxonian Press. 1987.
 18. Tischenko A.P., Asmus V.V., Pyatin V.P. Digital processing of multispectral space imagery// Mapping sciences and remote sensing, 1985, v.22, pp. 173-198.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ФОТОБИОРЕАКТОРА ДЛЯ
ДВУХСТАДИЙНОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ –
ПРОДУЦЕНТОВ ЛИПИДОВ.

Н.И.Чернова, Т.П.Коробкова, Н.В.Радомский, С.В.Киселева, С.И.Зайцев,
О.Ю.Гайнанова

*Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова
научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии*

Введение

В настоящее время огромное внимание производителей биотоплива, инвестирующих значительные средства в исследовательские программы, привлекает биоэнергетический потенциал водорослей. Для реализации биосинтетических возможностей природных и реконструированных штаммов микроводорослей-автотрофов используются фотобиореакторы (ФБР) открытого и закрытого типа. Закрытый способ культивирования осуществляется в специализированных закрытых ёмкостях, а открытый - в плоскостных культиваторах. ФБР закрытого типа обеспечивают контролируемые условия и высокий выход продукции. Открытые культиваторы значительно дешевле, но легко подвергаются контаминации (загрязнению), и только три вида водорослей (хлорелла, спирулина, дуналиелла) оказались способными к широкомасштабному культивированию в таких условиях. Гибридная двухстадийная система выращивания микроводорослей объединяет все преимущества закрытых и открытых культиваторов, избегая их недостатков. Так, в 1997-2001 гг. на Гавайях осуществлено успешное крупномасштабное культивирование зеленой микроводоросли *Haematococcus pluvialis* с применением гибридной системы [1]. ФБР закрытого типа позволяют стабильно выращивать те водоросли, которые не могут расти в открытых культиваторах, обеспечивая непрерывную поставку высококачественного инокулюма в открытые культиваторы. Помещение выращенной биомассы в открытые культиваторы с большой степенью инсоляции и в питательную среду, лимитированную по азоту, позволяет создать так называемый физиологический стресс для микроводорослей, при котором почти прекращается рост и происходит аккумулятивное в их клетках липидов и пигмента астаксантина. Таким способом на пути получения биодизеля из биомассы микроводорослей устраняются две главные преграды. На первой стерильной стадии выращивания микроводорослей (в закрытых ФБР) обеспечиваются оптимальные условия для продуктивности и накопления биомассы, а на второй стадии (в открытых ФБР) – максимальный выход липидной продукции. За короткий срок (1-3 дня) в открытых культиваторах заражения посторонней микрофлорой не происходит, а возникающий при этом лимит питательных веществ и повышенная инсоляция стимулирует биосинтез масла. Предложенная система непрерывного культивирования микроводоросли гематоккоккус состояла из закрытых трубчатых ФБР и открытых прудов общей площадью 2 га. Средняя энергопродуктивность биомассы *H. pluvialis* составила в этом проекте 763 ГДж/га/год при энергопродуктивности по маслу 422 ГДж/га/год. Максимальные же выходы составили 1836 ГДж/га/год (1014

ГДж/га/год) соответственно. Эти величины существенно больше, чем для наземной растительности, большая часть которой обеспечивает от 50 до 400 ГДж/га/год.

Фотобиореактор закрытого типа

В лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова в течение последних 20 лет проводятся научно-исследовательские работы по выращиванию биомассы микроводорослей как для целей энергетики, так и для ее комплексного использования в качестве кормовых и пищевых добавок [2-6]. Для работ по культивированию микроводорослей-продуцентов целевых продуктов в лаборатории был разработан и смонтирован экспериментальный модуль фотобиореактора для двухстадийного культивирования микроводорослей, состоящий из фотобиореакторов закрытого и открытого типа.

Основными узлами ФБР закрытого типа (рис.1), входящего в экспериментальный модуль двухстадийного культивирования микроводорослей, являются:

1. Система газоподготовки, которая включает в себя резервуар CO_2 (газгольдер объемом 600 л), микронасосы, смесители, подводящие трубки, микровентили, регулирующие скорость подачи газов и газовых смесей (структурная схема на рис. 2). Газгольдер является долговременным источником CO_2 , обеспечивающим постоянное давление смеси на входе. Таким образом, решается проблема поддержания условий эксперимента постоянными в течение длительного периода. В состав лабораторной установки также включены микрокомпрессоры, позволяющие непрерывно прокачивать газозвоздушную смесь через питательную среду с культурой микроводорослей.
2. Закрытые культиваторы - колбы объемом 1-3 литра, в которых непосредственно находились штаммы микроводорослей.
3. Газоанализатор Dräger X-am 7000 для измерения концентрации CO_2 и кислорода в газо-воздушной смеси, подаваемой в культиваторы. Предварительно газоанализатор был откалиброван для работы в диапазоне концентраций CO_2 (0,03-5)%.
4. Лампы ДРЛФ-400 - для создания постоянной освещенности культуры микроводоросли в течение эксперимента.

С помощью созданной системы закрытого культивирования появляется возможность исследовать эффективность утилизации углекислого газа при культивировании различных видов микроводорослей. Кроме того, данная установка может иметь более широкое применение. Она позволяет оптимизировать процесс накопления культуры (интенсифицировать процесс наращивания биомассы), проводить выращивание отобранных при скрининге культур микроводорослей, выделенных из природных источников, осуществлять в широких пределах вариации условий выращивания (состав газовых смесей и интенсивность их прокачки, освещенность, температурный режим, виды выращиваемых микроводорослей и т.д.). В установке предусмотрена возможность (таймирование) изменения продолжительности светового и темнового периодов («день/ночь»), включая выращивание водорослей в темноте при переводе их на гетеротрофный тип питания. Таким образом, данная установка позволяет проводить длительные эксперименты в полуавтономном режиме.

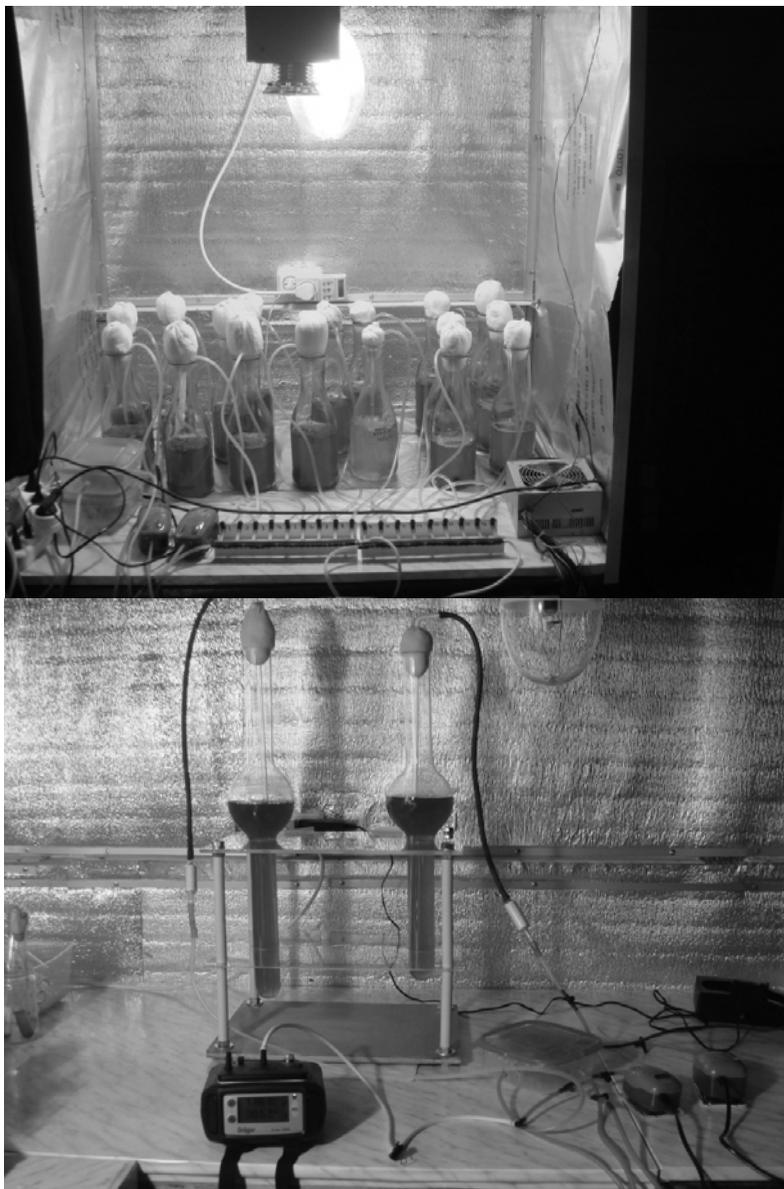


Рис.1. Фото культиватора закрытого типа.

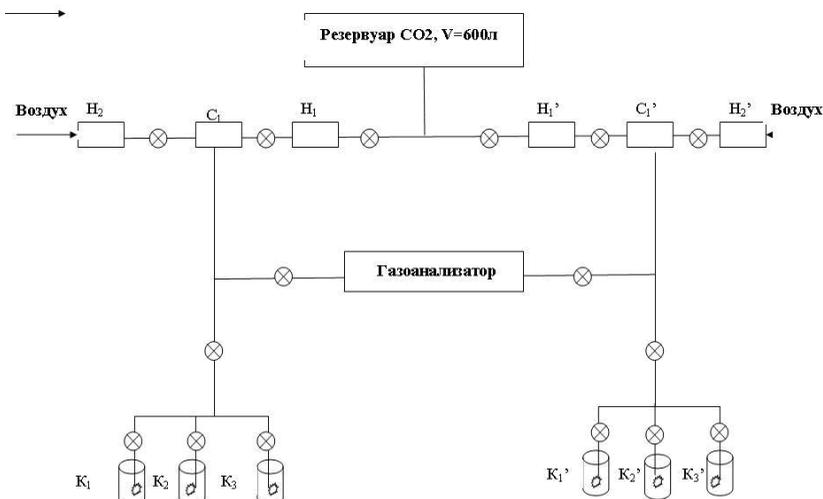


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки: Н, Н' – микронасосы, С, С' – смесители, К, К' – культиваторы, снабженные распылителями газовой смеси; ⊗ – микровентили для регулировки подачи газов.

Система открытого культивирования микроводорослей

В рамках создания экспериментального модуля ФБР для двухстадийного культивирования микроводорослей в лаборатории была создана система ФБР, предназначенная для выращивания биомассы микроводорослей – перспективных продуцентов липидов, углеводов и других продуктов для производства биотоплива (биоэтанола, биоводорода) открытым способом. Разработанный фотобиореактор обеспечивает решение трех основных задач:

- достижение требуемого уровня освещения клеток культивируемых микроорганизмов;
- достижение требуемого уровня обогащения питательной среды углекислым газом;
- достижение максимальной степени однородности поступления углекислого газа и светового потока к клеткам культуры.

Фотобиореактор состоит из 6 культиваторов, представляющих собой открытые кюветы размером 500x500 мм, в которых находится жидкая питательная среда с микроводорослями (рис.3). Глубина слоя культуральной жидкости может изменяться от 50 до 100 мм. Каждый культиватор имеет свой независимый светодиодный источник освещения с определенным спектром и регулируемой интенсивностью светового потока, систему подачи газозвушной смеси и систему перемешивания. Предусмотрен периодический контроль за параметрами внешней окружающей среды (температура, влажность, освещенность), а также производится забор проб для анализа питательной среды.

Световой поток играет очень важную роль в жизненном цикле микроводорослей, поэтому к системе освещения экспериментального модуля ФБР предъявлялись высокие требования. Интенсивность фотосинтеза микроводорослей опре-

деляется фотонами с длиной волны от 400 до 700 нм. Этот диапазон называется Photosynthetically Active Radiation (PAR) или диапазон фотосинтетически активной радиации (ФАР). Однако микроводоросли не одинаково воспринимают кванты света с разным спектром. Это связано с удельным поглощением разных типов пигментов. Лабораторные тесты показали, что кривая восприимчивости микроводорослей различных потоков фотонов (рис.4) имеет два пика — 450 нм и 630 нм (синий и красный спектр) и менее эффективна восприимчивость в области около 550 нм (зеленый спектр) [7]. Тем не менее, есть исследования, показывающие регулируемую роль зеленого света [8]. Таким образом, все фотоны из диапазона PAR играют определенную роль на различных стадиях развития микроводорослей. Определение соотношения количества различных фотонов в общем потоке света для наиболее эффективного культивирования разных видов микроводорослей является одним из направлений исследований нашей лаборатории.



Рис.3. Фото культиватора открытого типа.

Люкс основывается на чувствительности человеческого глаза. В естественных условиях этого достаточно, так как люксметр скорректирован по кривой чувствительности глаза. При анализе рис.4 хорошо видно, что спектр чувствительности человеческого глаза существенно уже спектра чувствительности растений. Поэтому измерение плотности светового потока с помощью люксметра не корректно по отношению к растениям. Такие измерения осуществляется с помощью специальных приборов, измеряющих плотность светового потока в диапазоне PAR. Эти измерения выражаются в числе фотонов вместо энергетических единиц,

т.е. измеряется количество вещества. Обычно PAR приводится как мера освещения родственная люксу, т.е. связана с поверхностью приема и измеряется в $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \times \text{c})$ или $\mu\text{моль}/(\text{m}^2 \times \text{c})$.

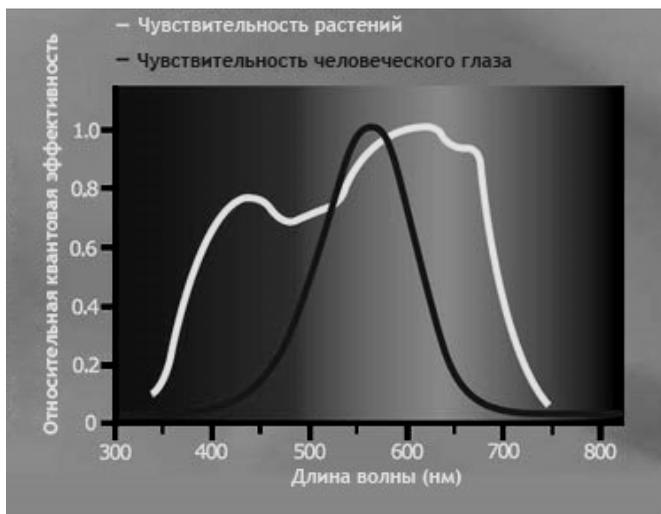


Рис.4. Характеристика световой восприимчивости микроводорослей.

Светодиодные технологии все шире внедряются в различные отрасли. Полупроводниковые источники света имеют огромные преимущества над традиционными лампами [9]:

1. светодиоды излучают до 100% света, попадающего в диапазон фотосинтетически активного излучения;
2. существенно меньше потребляют электроэнергии при одинаковых показателях светового потока (светодиоды имеют световую эффективность до 200 лм/Вт, а лампы накаливания — 20 лм/Вт);
3. светодиоды не разогревают воздух как это делают лампы накаливания или газоразрядные лампы;
4. сохраняют кондицию в течение более длительного промежутка времени (порядка 100 тыс. часов).

Режим коротких вспышек, необходимый для темновой стадии фотосинтеза [10], легко реализуется и не оказывает пагубного влияния на долговечность источников света. Технологические линии по созданию светодиодов стремительно совершенствуются, что приводит к существенному снижению себестоимости производства полупроводниковых источников света. Таким образом, проблема высокой цены практически снята на сегодняшний день, а в ближайшее время и вовсе не будет обсуждаться.

Для экспериментального модуля ФБР была создана светодиодная система освещения для проведения исследовательских работ по облучению микроводорослей фотонами с разной длиной волны и регулируемой интенсивностью (рис.5).

Система освещения включает в себя светильники с белыми, красными и синими светодиодами. Белые светодиоды фирмы Edison Opto EDEW-3LS6-FR имеют цветовую температуру 6000 К и световую интенсивность до 180 люмен. Красные светодиоды ARPL-3W RED и синие LXHL-PB09 BLUE имеют интенсивность излучения порядка 80 лм и 40 лм, соответственно. Спектральные характеристики светодиодов приведены на рис.6 (кривая 1 — белый свет, 2 — красный и 3 - синий).

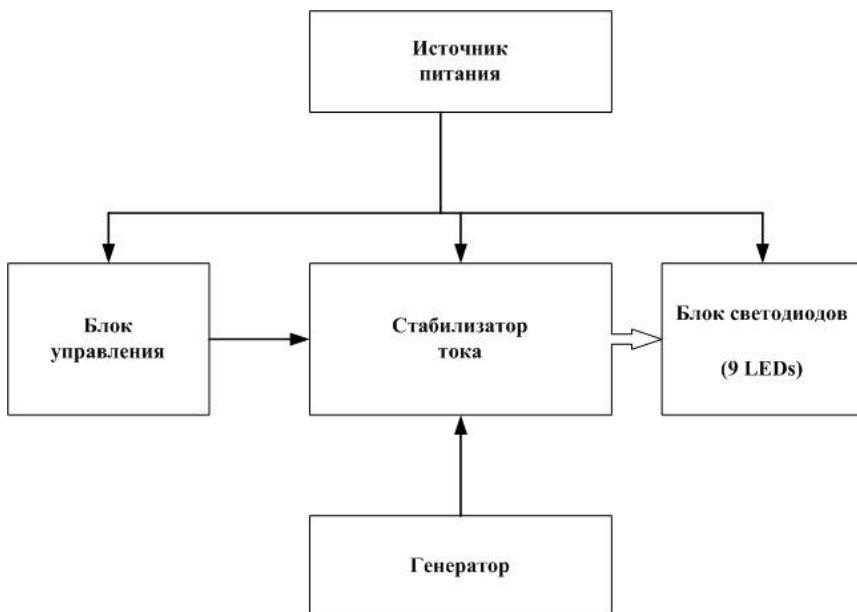


Рис.5. Структурная схема системы освещения экспериментального модуля фотобиореактора.

Каждая кювета фотобиореактора освещается двумя круглыми светильниками по 9 светодиодов в каждом. В лабораторном макете экспериментального модуля фотобиореактора предусмотрена возможность перенастройки спектра излучения путем выключения одних и включения других светодиодов, регулирования интенсивности излучения, а также переключение в импульсный режим с определенной частотой (это вызвано особенностью процесса фотосинтеза — для темновой фазы не требуется облучение). Все культиваторы разделены на две группы по спектру светового потока. Три культиватора облучаются светильниками с красно-синими светодиодами, а другие три — светильниками с белыми светодиодами. Светодиодные светильники расположены на высоте 70 см над поверхностью кюветы. Для получения максимальной и равномерной освещенности всей площади кюветы используются рассеивающие линзы 9B30DF Turlens с углом 30°. С помощью прибора Flux Arogee (MQ-200) осуществлены измерения освещенности поверхности

кювет ФБР. Для белого света – $250 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \times \text{c})$ или $\mu\text{моль}/(\text{m}^2 \times \text{c})$, для красного – $270 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \times \text{c})$ и для синего – $180 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \times \text{c})$.

Исследования показали, что для осуществления режима стресса эффективно использовать исключительно красный свет с максимальной интенсивностью.

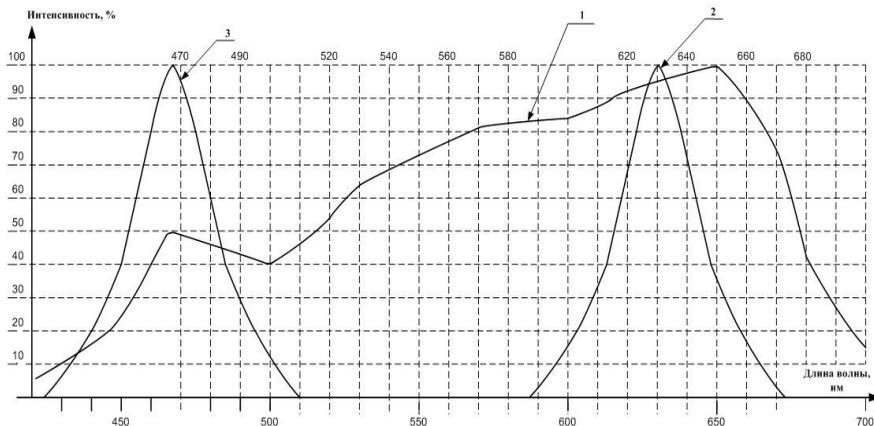


Рис.6. Спектральные характеристики светодиодов.

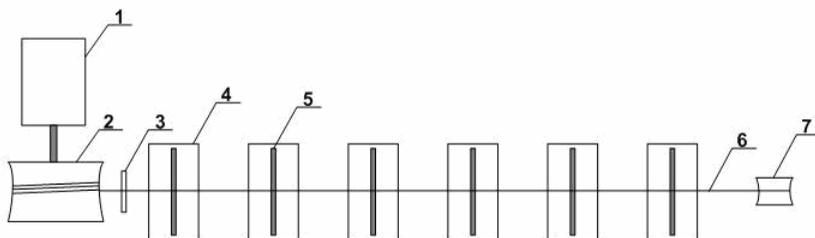


Рис.7. Кинематическая схема системы перемешивания.

- 1 — Реверсивный двигатель.
- 2 — Барабан для намотки тросика отслеживающего перемещение мешалок.
- 3 — Переключатель направления вращения электродвигателя.
- 4 — Культиватор.
- 5 — Мешалка.
- 6 — Трос для крепления мешалок.
- 7 — Блок натяжения троса.

Световой поток должен равномерно распределяться по всему объему культуральной жидкости. С этой целью микроводоросли культивируются в тонком (5-20 мм) освещаемом слое, что достигается путем использования перемешивающего устройства. Система перемешивания состоит из шести мешалок, расположенных в

каждом из культиваторов, закрепленных на едином приводе реверсивного электродвигателя. Мешалки осуществляют возвратно поступательные движения с постоянной скоростью вдоль всей поверхности культиваторов. В системе перемешивания предусмотрена возможность изменения скорости (от 0,6 см/с до 16 см/с). В процессе перемешивания не происходит механического повреждения клеток микроводорослей. На рисунке 7 приведена кинематическая схема системы перемешивания.

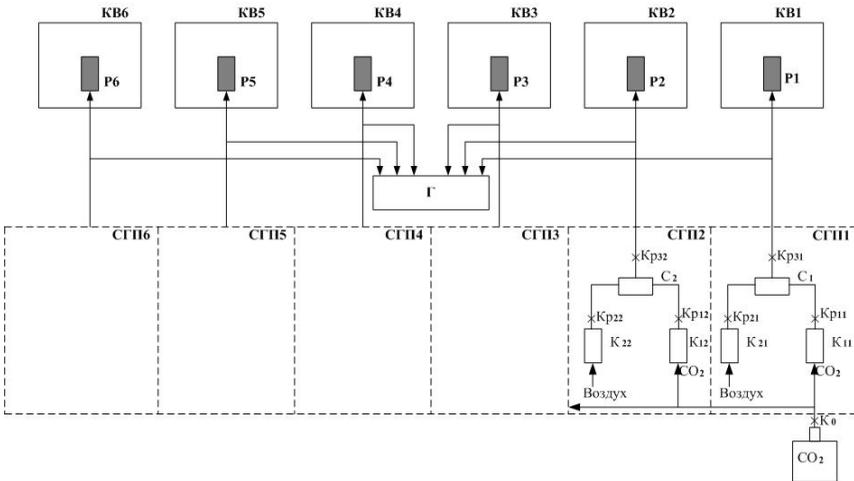


Рис. 8. Схема газораспределительной системы насыщения питательной среды углекислым газом.

КВ1 ÷ КВ6 – культиваторы;

Р1 ÷ Р6 – мелкопористые распылители;

Г – газоанализатор;

СГП1 ÷ СГП6 – система газовой подготовки;

Кр_{1i} ÷ Кр_{2i} – регулировочные краны подачи воздуха и CO₂ в смеситель для получения газовой смеси с заданной концентрацией CO₂.

Кр_{3i} – регулировочные краны подачи газовой смеси в распылитель.

К_{1i} ÷ К_{2i} – компрессоры обеспечивающие подачу воздуха и CO₂ в смесители.

С₁ ÷ С₆ – газовые смесители.

К₀ – редуктор на газовом баллоне.

i – номер культиватора

На рисунке 8 представлена схема газораспределительной системы насыщения питательной среды углекислым газом. Насыщение питательной среды осуществляется путем барботирования её газовой смесью через распылители, расположенные в каждом из культиваторов. Диапазон устанавливаемой концентрации CO₂ в газовой смеси должен изменяться от 0,03 – 5 объемных процентов. Предусмотрена регулировка концентрации углекислого газа в каждом из культиваторов отдельно. Контроль за составом газовой смеси осуществляется с помощью газоанализатора Drager X-am 7000 с диапазоном измерения 0,03-5%.

Получение биомассы *Arthrospira* / *Spirulina platensis* в экспериментальном модуле ФБР

Осуществлено культивирование биомассы микроводоросли *Arthrospira* / *Spirulina platensis* (NORDST.) GEITL. штамм 1/02-П из коллекции НИЛ ВИЭ с использованием CO₂ в обычных условиях. Штамм микроводоросли является автотрофом, источником углерода служат карбонаты и гидрокарбонаты натрия и калия. *Arthrospira* усваивает азот в нитратной (натрий азотнокислый и калий азотнокислый) и аммиачной (мочевина, аммиачная селитра) формах. Мезофил: оптимальная температура выращивания 26-32°C. Оптимум pH составляет 8.5-11,5. Подщелачивание выше 11.5 тормозит рост и накопление биомассы. Для культивирования микроводоросли используется среда Заррука и ее модификации [11].

Состав среды, обеспечивающий продуктивность штамма на уровне 0.9 - 1.5г/л сухой биомассы включает (в г/л дистиллированной воды): NaHCO₃ - 16.8; KNO₃ - 3.0; K₂HPO₄ · 3H₂O - 0.66; K₂SO₄ - 1.0; MgSO₄ · 7H₂O - 0.1 - 0.4; NaCl - 0.5 - 2.0; CaCl₂ - 0.02 - 0.04; FeSO₄ · 7H₂O - 0.01-0.04; трилон Б - 0.04 - 0.16; микроэлементы (растворы А и Б по 1 мл /л среды). *Раствор А (г/л)*: H₃BO₃ - 2.86; MnCl₂ · 4H₂O - 1.81; ZnSO₄ · 7H₂O - 0.22; CuSO₄ · 5H₂O - 0.08; MoO₃ - 0.015. *Раствор Б (г/л)*: K₂Cr₂(SO₄)₄ · 24 H₂O - 0.096; NH₄VO₃ - 0.023; NiSO₄ · 7H₂O - 0.048; Na₂WO₄ · 2H₂O - 0.018; Ti₂(SO₄)₃ - 0.04; Co(NO₃)₂ · 6H₂O - 0.044. Стерилизацию среды осуществляют при 1,0 атм в течение 0,5 ч.

Этапы выращивания биомассы микроводоросли Arthrospira / Spirulina platensis: Нарращивание инокулята-1 производят в стерильных пробирках размером (20 × 2) см с объемом среды Заррука 15 мл на основе дистиллированной воды при освещении 30 мкЕ/(м²×с), температуре 26±28°C и периодическом встряхивании. Плотность культуры в конце культивирования должна быть не менее 2.0 г/л сухой биомассы. Выращенную биомассу подвергают микроскопическому контролю на альгологическую чистоту. Полученным инокулятом-1 засевают закрытые ФБР объемом 1000 мл, заполненные стерильной средой указанного выше состава объемом 500 мл, освещенность культур 50 ÷ 60 мкЕ/(м²×с), температура - 28°C. Плотность культуры в конце культивирования должна быть не менее 2.0 г/л сухой биомассы. Выращенную биомассу (инокулят-2) подвергают микроскопическому контролю на альгологическую чистоту. Полученным инокулятом-2 засевают плоскостные открытые культиваторы созданного экспериментального модуля фотобиореактора для эффективного культивирования микроводорослей с использованием CO₂ в качестве источника углерода, наполненные питательной средой Заррука объемом 20л, приготовленной на питьевой воде. Используется поверхностное перемешивание культуральной жидкости со скоростью 0,1 м/с и барботаж смесью углекислого газа и воздуха с содержанием CO₂ 2% (объемных). Освещение культиваторов обеспечивается светодиодными светильниками (освещенность 60 мкЕ/(м²×с)). При таком способе культивирования достигалась продуктивность биомассы артроспиры 12-15 г/м² по сухому весу.

Сбор и предварительная обработка биомассы микроводоросли Arthrospira / Spirulina platensis. Биомасса микроводоросли отделяется от культуральной жидкости до пастообразного состояния гравитационным методом на ситах из нержавеющей и низкоуглеродистой проволоки с размером ячеек 150±200 мкм. Влажность полученной биомассы составляет не менее 90%. Определение массовой доли влаги проводится по ГОСТ 15113.4.-77. Содержание липидов в полученной био-

массе артроспиры/спирулины составило 8,4% методом Folch J. [12] и (19,0±1,5)% по методике определения – на спектрофлуориметре с красителем нильским красным.

Кроме того, получение биомассы *Arthrospira / Spirulina platensis* осуществляется в экспериментальном модуле фотобиореактора в условиях физиологического стресса (повышенная инсоляция и питательная среда, лимитированная по азоту). Для культивирования микроводоросли использовалась среда Заррука такого же состава как и при обычном способе. До стадии получения посевного материала, выращивание биомассы микроводоросли *Arthrospira / Spirulina platensis* проводится в условиях описанных выше. А далее полученный инокулят-2 отделяют от культуральной жидкости гравитационным методом на ситах из нержавеющей и низкоуглеродистой проволоки с размером ячеек 150÷200 мкм и помещают в плоскостные открытые культиваторы созданного экспериментального модуля ФБР для эффективного культивирования выделенных микроводорослей с использованием CO₂ в качестве источника углерода наполненные 20 л голодной питательной средой Заррука без азота, приготовленной на питьевой воде, при этом плотность культуры и слой культуральной жидкости были относительно небольшими, чтобы созданная максимальная освещенность 230 мкЕ/(м²×с) проникала в нижние слои. Голодание по основным биогенным элементам и высокая освещенность создают для культуры физиологический стресс, при котором дальнейший рост и развитие микроводорослей тормозится, но стимулируется аккумуляция липидов в клетках. В условиях физиологического стресса культура микроводорослей выдерживалась в течение недели. Биомасса микроводоросли отделяется от культуральной жидкости до пастообразного состояния гравитационным методом на ситах из нержавеющей и низкоуглеродистой проволоки с размером ячеек 150÷200 мкм. Влажность полученной биомассы составляет не более 90%. Определение массовой доли влаги проводится по ГОСТ 15113.4.-77. Содержание липидов в этой биомассе составило (30,9±0,2) % (методика определения – на спектрофлуориметре с красителем нильским красным).

Заключение

Использование биомассы для производства жидкого биотоплива становится бурно развивающейся отраслью, которая требует инноваций для ускорения коммерциализации. Суммы денег, которые были вложены, разработанные технологии, построенные производственные мощности таковы, что так называемая точка возврата уже пройдена. Дальнейшие исследования и разработки являются необходимыми для производства из водорослей биотоплива в промышленных масштабах.

Первичное апробирование культивирования микроводорослей показало широкие возможности использования, созданного экспериментального модуля фотобиореактора для целей энергетики, в том числе для получения биомассы с повышенным содержанием липидов. Предлагаемая установка позволяет осуществлять двухстадийное выращивание микроводорослей, объединяя все преимущества закрытых и открытых культиваторов, избегая их недостатков.

С помощью созданной экспериментальной установки становится возможным исследовать эффективность утилизации углекислого газа при культивировании различных видов микроводорослей. Что очень важно при секвестировании антропогенного CO₂. Так, барботаж газовой смесью с содержанием CO₂ 1.5 и 3.0% и

интенсивностью продувки 0,3 vvm увеличивал продуктивность и накопление липидов в биомассе указанных микроводорослей. А для *Arthrospira / Spirulina platensis* значительно снижался пороговый токсический эффект от повышенного защелачивания среды при длительном культивировании (достигалось снижение pH на 2-3 единицы).

Эта работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям научно-технологического комплекса России на 2007-2012 гг.».

Литература

1. Huntley M., Redalje D. CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2007. Vol.12. P.573–608.
2. Чернова Н.И., Киселева С.В., Коробкова Т.П., Зайцев С.И. Микроводоросли в качестве сырья для получения биотоплива//Альтернативная энергетика и экология. 2008. №9. С.68-74.
3. Чернова Н.И., Коробкова Т.П. Ресурсные и экологические проблемы энергетического использования биомассы//Возобновляемые источники энергии: Лекции ведущих специалистов. Вып.5. М.: Изд-во ЧеРо, 2008. С. 78-91.
4. Чернова Н.И. Коробкова Т.П., Киселева С.В. Инновационные технологии биоэнергетики// Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. С.-Пб., 2008. Т.13. №3. С.171-178.
5. Чернова Н.И., Коробкова Т.П., Киселева С.В., Зайцев С.И. Биомасса как энергетический ресурс// Труды КубГАУ, 2009. № 4(19). С.203-208.
6. Чернова Н.И., Коробкова Т.П., Киселева С.В. Использование биомассы для производства жидкого топлива: современное состояние и инновации // Теплоэнергетика, 2010. № 11. С.28-35.
7. Man R., Loeffers V.J. Seasonal Photosynthetic Responses to Light and Temperature in White Spruce (*Picea glauca*) Seedlings Planted under an Aspen (*Populus tremuloides*) Canopy and in the Open // Tree Physiol. 1997. V. 17. P. 437-444.
8. Головацкая И.Ф. Регуляторная роль зеленого света в морфогенезе и гормональном статусе растений. //Докторская диссертация, 2009.
9. Радомский Н.В. Сравнительный анализ продукции ведущих производителей белых светодиодов.// Полупроводниковая светотехника, 2010. №3. С.14-20.
10. Emerson R., Arnold W. The Photochemical Reaction in Photosynthesis.// Kerckhoff Laboratories of BiologyCalifornia Institute of Technology: 07 1932, 191-205.
11. Каталог культур микроводорослей в коллекциях СССР. М.:ИФР РАН, 1991, С.55.
12. Folch J, Lees M, Sloane-Stanley GH (1957) a simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. J Biol Chem 226(1): 497-509.

УДК 551.46+551.5

МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ВОДНЫХ МАСС В
ЮЖНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА В ЯНВАРЕ – ДЕКАБРЕ 2004 - 2009 гг.
(ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЗОНДИРОВАНИЙ ДРЕЙФУЮЩИХ БУЕВ
МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНОГО ПРОЕКТА «ARGO»)

Чернышков П.П., Амиров Ф.О., Бородин Е.В.,

Скляров М.Б., Чурин Д.А.

*Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта,
г. Калининград*

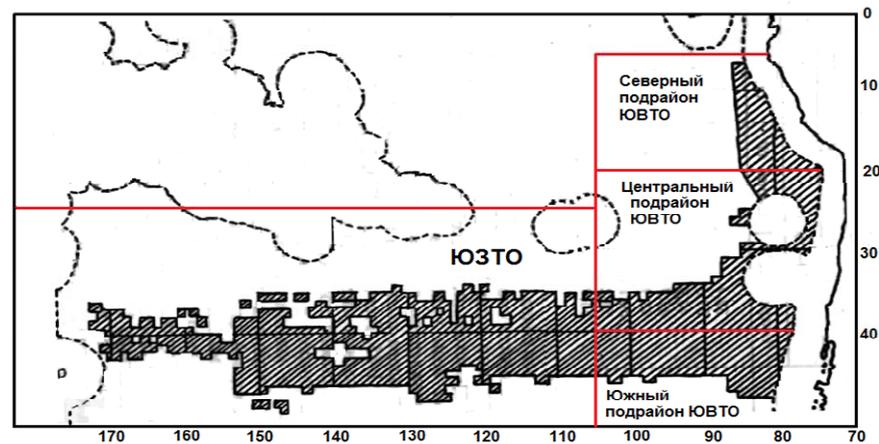
Представлены результаты использования данных по вертикальному распределению водных масс в южной части Тихого океана, полученные от дрейфующих буев международного проекта «Argo», для научного обеспечения возобновления и расширения российского рыбного промысла в этом районе. Установлены существенные сезонные и межгодовые изменения объемов промежуточных вод антарктического происхождения, которые являются главным фактором формирования биологической и продуктивности вод этого важнейшего для российского рыболовства районе.

На основе созданной базы данных по результатам измерений температуры (Т) и солёности (S) морской воды на различных глубинах разработан Атлас T,S-кривых, которые дают представления о сезонных и межгодовых изменениях вертикальной структуры вод в западной, центральной и восточной частях исследуемого района.

Введение

В 70-80-е годы прошлого века отечественными учеными и рыбаками в южной части Тихого океана был выявлен так называемый «ставридный пояс» – гиперпопуляция ценного объекта рыболовства – ставриды, обитающей в полосе 30-40-х широт южного полушария от берегов Чили до Новой Зеландии (рис.1). С 1979 по 1991 г. ежегодный вылов бывшего СССР в этом районе составлял около 1 млн. т. ставриды (Чернышков П.П., Дерябин Н.Н., 2008).

Существование этой гиперпопуляции объясняется исключительно высокой биологической продуктивностью верхнего фотического слоя вод. (Промышленно-океанологические исследования..., 2002 г.). Это продуктивность вызывается тем, в слой фотосинтеза под влиянием мезомасштабных круговоротов поднимаются богатые биогенными элементами промежуточные воды антарктического происхождения (рис. 2). Однако объемы этих вод подвержены существенным изменениям как от месяца к месяцу внутри каждого года, так и от года к году. Поэтому знание закономерностей внутригодовых и межгодовых изменений необходимо для прогнозирования уровня биологической и, следовательно, промысловой продуктивности вод, что исключительно важно для ведения эффективного российского рыболовства в этом районе. Получить представления об объемах промежуточных вод можно только по результатам вертикальных зондирований толщи воды с измерением температуры и солёности на различных глубинах.



- Районы обнаружения в 1978 – 1991гг. промысловых концентраций океанической ставриды (уловы более 5 тонн за час траления).

Рис. 1. Районы промысла отечественного флота в период с 1978 г. по 1991 г.

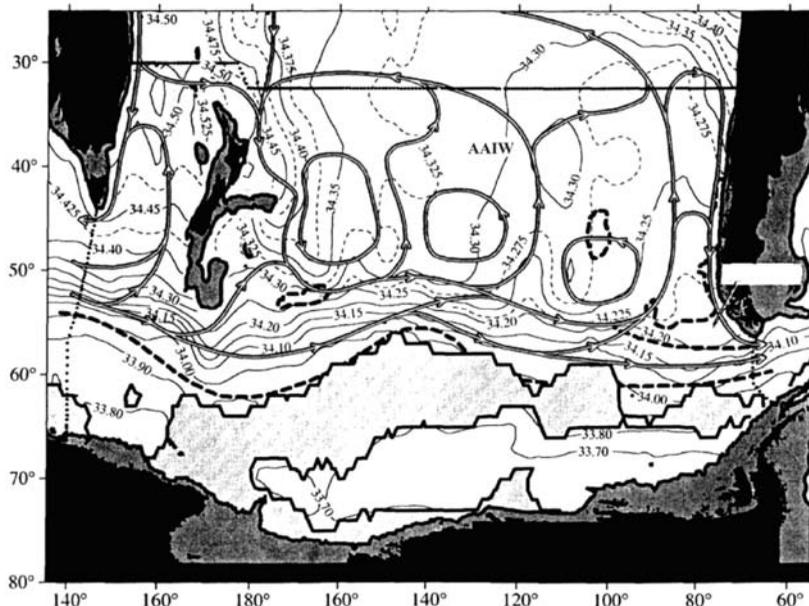


Рис. 2. Циркуляция промежуточных вод антарктического происхождения в южной части Тихого океана (Кошляков М.Н., Тараканов Р.Ю., 2005 г.).

Используемые материалы

Важнейшим достижением последнего десятилетия в области оперативного получения информации о структуре и динамике вод Мирового океана стала реализация международного океанологического проекта «Argo». В настоящее время в проекте участвует 23 страны, но их число постоянно увеличивается.

Суть проекта состоит в создании на всей акватории Мирового океана системы свободно дрейфующих и с заданной периодичностью опускающихся до глубины 2000 м. специальных буев.

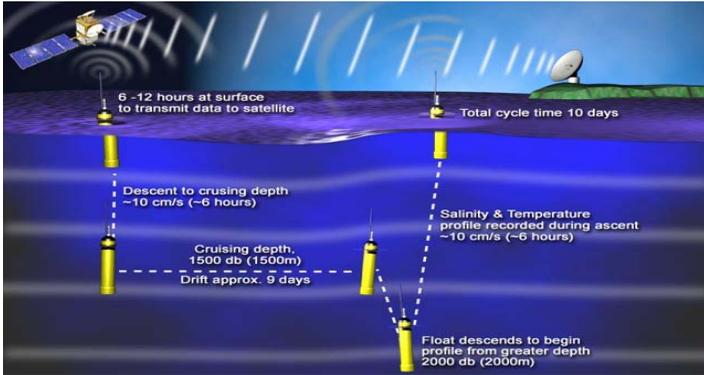


Рис. 3. Схема работы дрейфующего буя проекта «Argo»

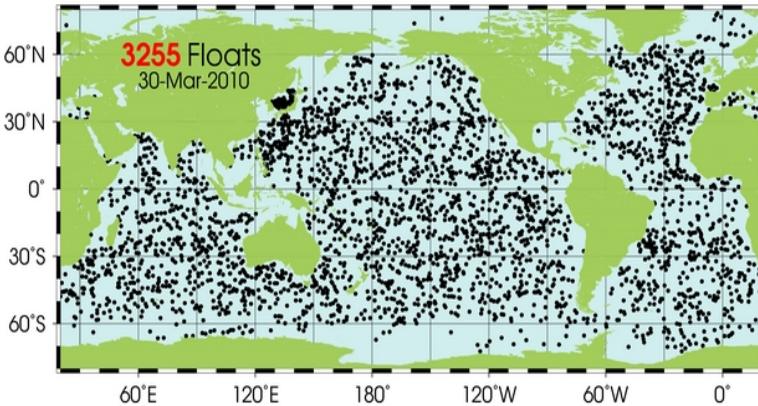


Рис. 4. Географическое распределение дрейфующих в Мировом океане буев проекта «Argo» на 30 марта 2010 г.

В процессе своего функционирования каждый буй в заданном режиме выполняет определение собственного местоположения (географических координат и глубины нахождения относительно поверхности воды), а также измерения параметров окружающей среды: температуры воды и воздуха, скорости и направления приливного ветра при нахождении на поверхности, солёности воды. Схема функционирования буя проекта «Argo» показана на рис. 3.

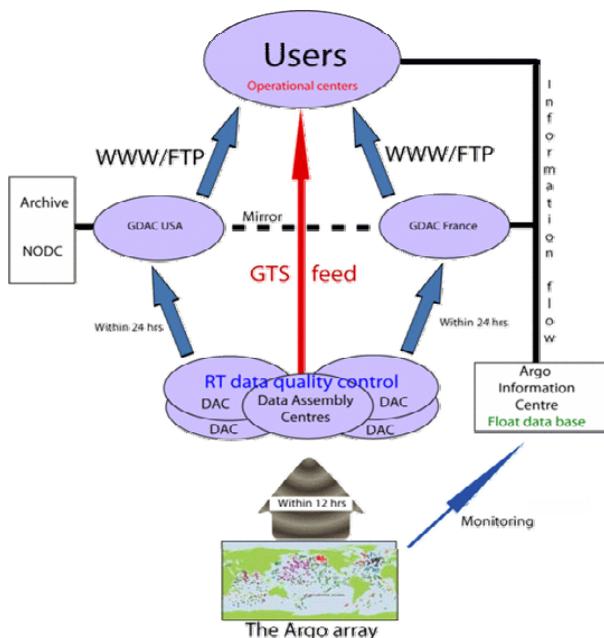


Рис. 5. Схема потоков данных, оперативно получаемых от дрейфующих буев проекта «Argo»

В начале каждого цикла продолжительностью 10 суток буй со скоростью около 10 см/сек. погружается до глубины 1500 м, измеряя при этом температуру и солёность воды на заданных глубинах (горизонтах наблюдений). Достигнув глубины 1500 м, буй прекращает погружение и в течение 9 суток свободно дрейфует на этой глубине с потоком океанического течения. После этого он, измеряя при этом температуру и солёность воды, погружается до глубины 2000 м и начинает со скоростью около 10 см/сек. подъем к поверхности, продолжая измерения температуры, солёности и глубины своего нахождения. Достигнув поверхности, буй остается там, в течение 6-12 часов. За это время он передает собранные данные на искусственный спутник Земли, который ретранслирует их в береговой центр информации. На этом 10-суточный цикл завершается и начинается очередной цикл. Функционирование буя продолжается до тех пор, пока не окончится заряд батарей энергопитания. В среднем продолжительность функционирования каждого буя составляет около 4 лет, при этом он выполняет примерно 120 циклов.

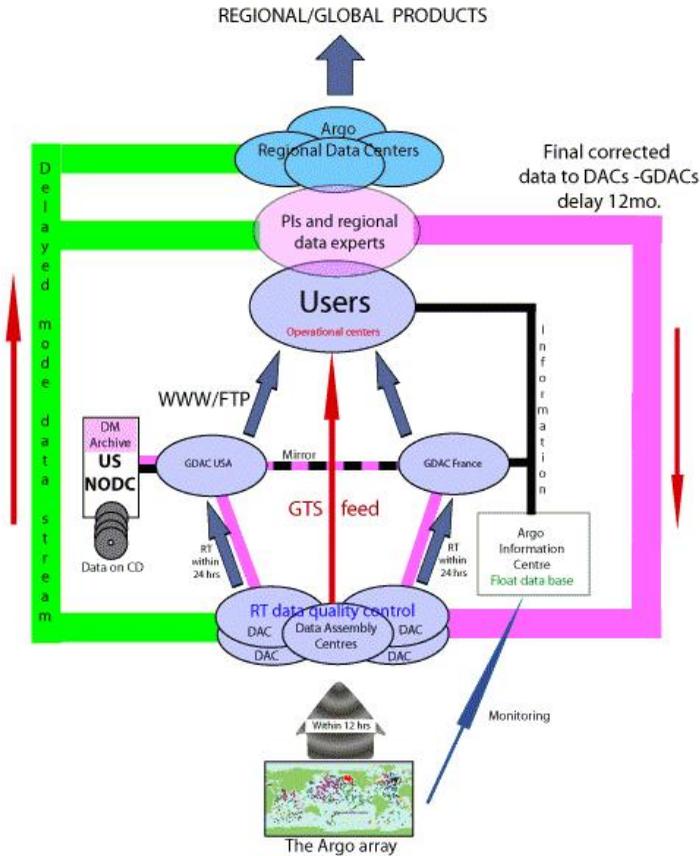


Рис. 6. Схема потоков верифицированных данных (данные доступны с задержкой до 5 месяцев после выполнения измерений).

Первые буи проекта «Argo» были запущены в 1999 г. и к 2009 г. их общее число составило более трех тысяч. С различной плотностью сеть дрейфующих буев покрывает всю акваторию Мирового океана и наиболее крупных окраинных морей (рис. 4).

Информация, получаемая от дрейфующих буев проекта «Argo» (рис.5, рис.6), позволяет кардинально изменить информационную основу исследований Мирового океана: структуры и динамики вод; формирования их биологической и промышленной продуктивности; влияния долгопериодных аномалий термических условий в океане на атмосферные процессы, а также большого числа других фундаментальных и прикладных океанологических проблем.

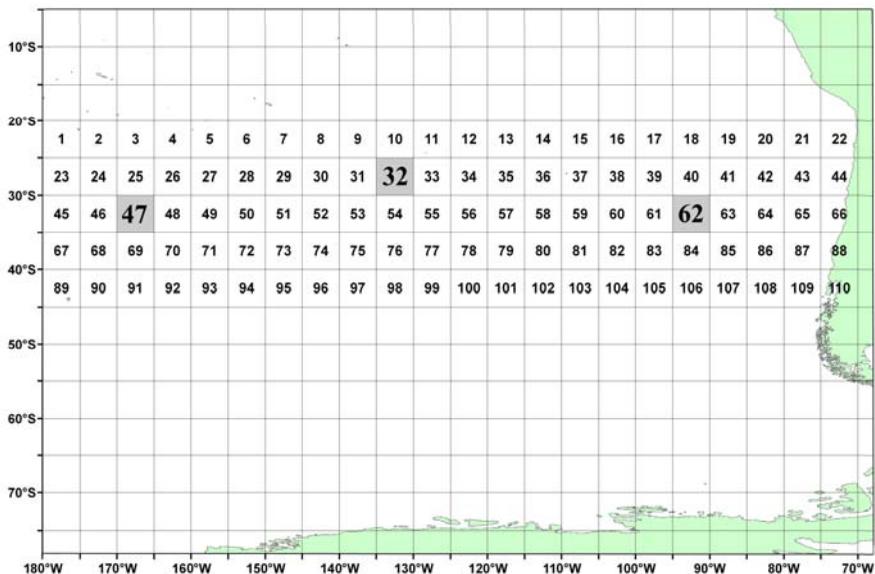


Рис. 7. Географическое положение 5 - градусных квадратов в южной части Тихого океана

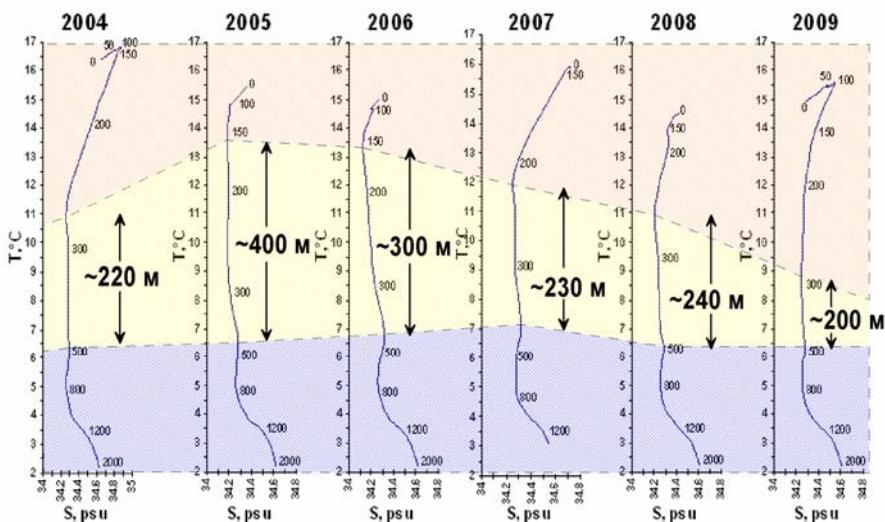


Рис. 8. Межгодовые изменения объемов промежуточных водных масс антарктического происхождения в юго-восточной части Тихого океана в сентябре 2004-2009 гг. по результатам зондирований буев международного проекта «Argo».

Результаты и обсуждение

Атлас T,S-кривых «Межгодовые изменения вертикальной структуры водных масс в южной части Тихого океана в январе 2004-декабре 2009 гг.»

Атлас создан по результатам зондирований дрейфующих буев международного научного проекта «Argo» по изучению структуры и динамики вод Мирового океана. Цель состояла в получении систематизированных представлений о внутригодовой и межгодовой изменчивости вертикальной структуры вод в южной части Тихого океана с января 2004 по декабрь 2009 г.

Вся исследуемая акватория была разбита на 5-градусные квадраты (рис. 7). В представляемой версии атласа использованы результаты измерений температуры и солености в 3-х квадратах, расположенных в западной, центральной и восточной частях района: квадрат 47 (30°-35° ю.ш., 165°-170° з.д.), квадрат 32 (25°-30° ю.ш., 130°-135° з.д.), квадрат 62 (30°-35° ю.ш., 90°-95° з.д.).

Первичные данные были получены по каналам Интернет из открытых для свободного доступа банков информации: Coriolis, Франция и US GODAE, США (рис.5, рис.6). Для характеристики вертикальной структуры вод в каждый месяц использованы результаты одного зондирования, выполненного в этот месяц для каждого года в конкретном квадрате. Таким образом, для каждого месяца, каждого года и каждого квадрата была построена одна T,S-кривая. На страницах атласа представлено по 6 кривых, относящихся к одному месяцу конкретного года одного из выбранных квадратов. На некоторых страницах количество кривых составляет менее шести. Это означает, что в этот месяц за период с 2004 по 2009 гг. вертикального зондирования толщи воды не выполнялось.

Межгодовые изменения вертикальной структуры вод для каждого месяца года и для каждого квадрата представлены на 12-ти страницах атласа.

Страницы, относящиеся к каждому из квадратов предваряются схемой географического положения точек измерения температуры и солености, а также приведен период наблюдений и количество профилей. Цифра на рисунке соответствует порядковому номеру в таблице реквизитов вертикальных профилей температуры и солености, на основании которых построены T,S-кривые для каждого месяца в данном квадрате. В таблице приведены координаты каждого профиля, время выполнения и номер буя, который присвоен ему в рамках проекта «Argo».

В качестве примера использования созданного атласа в практической работе ниже приводится пример такого использования.

Для района юго-восточной части Тихого океана за 2004-2009 гг. на основе результатов вертикальных зондирований температуры и солености воды были построены T,S-кривых (рис. 8). По форме кривой и глубинам залегания ее экстремумов были определены верхняя и нижняя границы промежуточных вод антарктического происхождения. Эти воды исключительно богаты биогенными элементами и, поднимаясь под влиянием мезомасштабных круговоротов вод (см. рис.2) в верхний фотический слой, формируют относительно изолированные повышенной биологической продуктивности вод. Там развиваются планктонные сообщества, которые поддерживают существование популяции ставриды, а также способствуют образованию скоплений промыслового характера. Достигнув своего максимума в 2005 г., объемы промежуточных вод начали сокращаться и в 2009 г. достигли минимальных значений. Учитывая автоколебательный характер этого явления, можно ожидать, что в ближайшие 3-5 лет объемы снова возрастут, что благоприятно скажется на

биологической и промысловой продуктивности вод юго-восточной части Тихого океана.

Межгодовые изменения объемов промежуточных вод в центральном и западном районах могут быть изучены по материалам, представленным в прилагаемом Атласе.

Выводы

На основе результатов проекта «Арго» создана информационная основа для объяснения межгодовых изменений биомассы восточной единицы запаса гиперпопуляции ставриды, обитающей в южной части Тихого океана. Дальнейший анализ на этой основе функциональной структуры ареала ставриды в этом районе с привлечением результатов программы WOCЕ может дать возможность межгодовых изменений биомассы ставриды и определения величин общего допустимого вылова

Литература

1. Кошляков М.Н. Тараканов Р.Ю. 2005 Промежуточные воды южной части Тихого океана. Океанология 2005, том 45, № 4, с. 485-503.
2. Промыслово-океанологические исследования в Атлантическом океане и Южной части Тихого океана / Под ред. В.Н. Яковлева.- Калининград, 2002.- 510 с.
3. Чернышков П.П., Дерябин Н.Н. 30 лет со времени открытия и освоения ресурсов пелагических рыб в южной части Тихого океана. «Рыбное хозяйство», 2008.- №5, с. 30-33.

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ СОСТАВА ВОДЫ ПРИ РАЗВИТИИ ЦИРКУЛЯЦИЙ В ЗАЛИВЕ

**Е.Л. Шейнкман, Б.И. Самолубов, И.Н. Иванова, Н.А. Перескок,
И.О. Григорьев, Д.С. Шлычков**

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Представлены результаты исследований распределений скорости течений и параметров состава воды на акватории Волховской губы Ладожского озера. Выявлена структура системы течений в заливе, которая включает циркулирующую промежуточную струю и крупномасштабный заток озерных вод в губу. Обнаружен холодный апвеллинг практически во всей восточной части залива. Установлено, что циркуляция промежуточной струи может менять как скорость, так и направление при изменениях ветра. Показано, что в зоне циркуляции повышается концентрация взвеси, с чем может быть связано локальное повышение биопродуктивности на акватории губы. При этом возрастает степень загрязнения залива за счет стоков рек в губу.

Введение

Распределение примесей в озерах и морях может существенно изменяться под влиянием систем течений различной природы, которые взаимодействуют между собой. Подобная система стратифицированных течений была обнаружена авторами при расшифровке результатов комплексных исследований

распределений параметров течений и состава воды в Волховской губе Ладожского озера в августе 2009 г. В новой экспедиции, проведенной на этом же полигоне в аналогичный период 2011 г., обнаружен ряд закономерностей развития течений в иных гидрометеорологических условиях. Цели данной работы: выявление природы и механизмов развития обнаруженной системы течений, а также закономерностей ее влияния на распределение примесей.

Объект и методика исследований

Исследования преобразований структур термогидродинамических полей и распределений концентраций примесей по глубине и во времени проводились в Волховской губе Ладожского озера [1,2] в августе 2011 г. Измерения выполнялись экспедицией физического факультета МГУ с борта НИС «Эколог» ИВПС КарНЦ РАН. Регистрировались профили вектора скорости течения U , температуры T и электропроводности воды S и концентрации взвеси S . Применялся зонд RCM 9 (Aanderaa) с доплеровским регистратором скорости, датчиками T , S_k и S . Точности измерений U , T , S_k и S : 0,5 см/с, 0,02°C, 0,02 мСм/см, и 0,4 NTU. При $S < 10$ NTU допустим анализ распределения S в безразмерном виде S/S_{mc} с погрешностью 1%, где S_{mc} - максимум S на данной срочной станции.

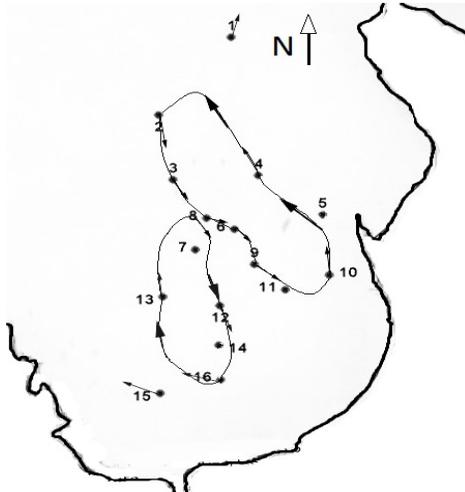


Рис. 1. Ячейки циркуляции на акватории залива в зонах действия промежуточных струй. Номера соответствуют вертикалям зондирования плановой съемки, стрелки – векторам скорости течения.

Распределения скорости и параметров состава воды в заливе

Плановая съемка на акватории Волховской губы была выполнена 12.08.2011 г. по 16 вертикалям, расположение которых показано на рис.1. В период исследований преобладал западный ветер со средней скоростью 5 м/с. На каждой вертикали комплексно измерялись профили U , T , S_k и S . При анализе полученных результатов было установле-

но, что на всех вертикалях четко воспроизводилась промежуточная струя, менявшая направление. По осредненным по толщине струи значениям направления течения были выделены ориентации вектора скорости струи в различных точках на акватории залива. Полученные таким способом векторы скорости струи и объединяющие их контуры циркуляции приведены на рис.1. В отличие от результатов съемки 2009 г. [3], в период выполнения которой преобладал восточный ветер, обнаруженная циркуляция имеет циклонический характер. Это подтверждает гипотезу о ветровом механизме формирования данной структуры течений. Смещенная на юго-запад циркуляция меньшего горизонтального масштаба, по видимому, представляет собой вихрь, сопутствующий основному. Струя в точке 1 движется в открытое озеро, что может быть связано с формированием ответвления от основной циркуляции, переносящего примеси из залива в озеро.

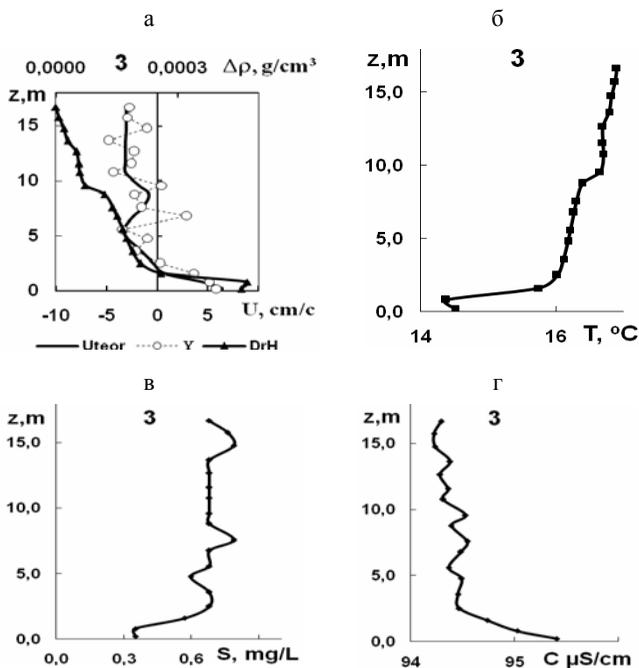


Рис. 2. Профили а) скорости течения U (теоретической - сплошная линия и измеренной - точки) и изменения плотности воды $\delta\rho$ с глубиной, б) температуры воды, в) концентрации растворенных солей S , г) электропроводности C для точки 3 по рис.1.

Типичные распределения скорости течения и параметров состава воды показаны на рис. 2, 3, 4 для точек 3, 9, 10 по схеме, представленной на рис.1. На вертикали 3 имеет место не только промежуточная струя в залив, но и придонный плотностной поток в открытое озеро, а также поток озерных вод в губу, характерный для данного периода времени. Плотностному потоку [4] соответствуют воды с температурой на 2 °C меньшей вышележащих вод и с повышенной минерализацией.

Струя располагается в пределах ступеньки на распределении изменения плотности воды с глубиной $\delta\rho$, между двумя пикноклинами на высотах 2 и 9 м над уровнем дна. Пониженная концентрация взвеси у дна свидетельствует о гидробиологическом характере материала взвеси (фитопланктон и другие виды органики).

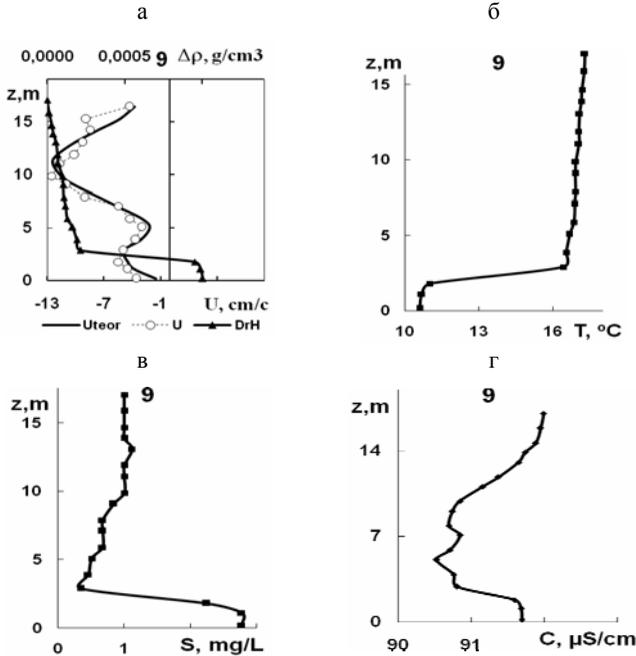


Рис. 3. Профили а) скорости течения U (теоретической - сплошная линия и измеренной - точки) и изменения плотности воды $\delta\rho$ с глубиной, б) температуры воды, в) концентрации растворенных солей S , г) электропроводности C для точки 9 по рис 1.

В точке 9 распределения скорости течения и параметров воды, приведенные на рис.3, отличаются холодным апвеллингом в придонном слое с повышенной концентрацией взвеси и солей в придонном слое. Такое распределение согласуется с упомянутым выше затоком озерных вод в губу, а рост концентрации взвеси у дна связан, по видимому, с поступлением наносов с мелководья при ветроволновом взмучивании донных отложений в прибрежной зоне. Повышенная минерализация над термоклином обусловлена притоком вод реки Волхов.

В точке 10 также имеет место холодный апвеллинг в придонном слое. Однако, промежуточная струя направлена в открытое озеро, так как данная вертикаль расположена на противоположной ветви циркуляции. Струйное течение здесь приближается к поверхности в связи с появлением пикноклина на высоте $z=5-6$ м над уровнем дна. Профиль концентрации взвеси близок к квазиоднородному со

слабыми увеличениями удельного содержания частиц в придонном слое с крупнейшими взвесями и в приповерхностном с мельчайшими частицами и органикой.

Минимум минерализации у дна связан с поступлением озерных вод в апвеллинге и с притоком вод реки Волхов с удельным содержанием растворенных солей, превышающим озерную концентрацию.

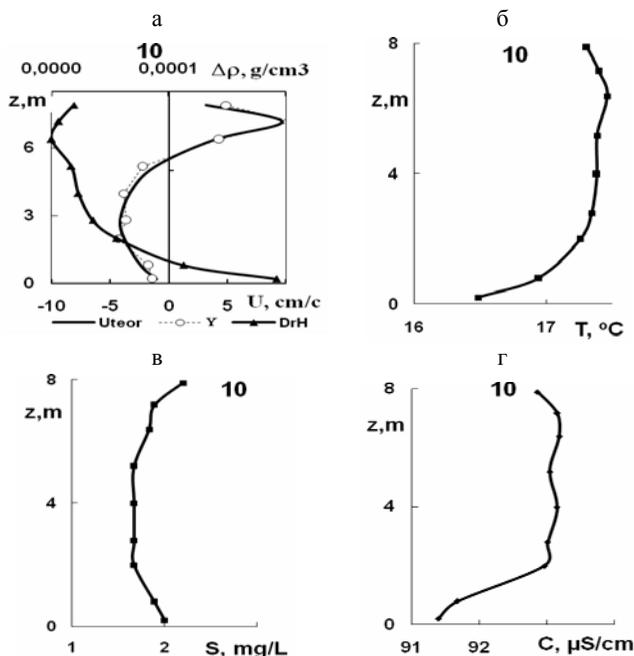


Рис. 4. Профили а) скорости течения U (теоретической - сплошная линия и измеренной - точки) и изменения плотности воды $\Delta\rho$ с глубиной, б) температуры воды, в) концентрации растворенных солей S , г) электропроводности C для точки 10 по рис.1.

В целом по представленным результатам можно сделать вывод о доминанте течения из озера в Волховскую губу. Об этом свидетельствует не только апвеллинг в виде холодного придонного потока вверх по склону к вершине залива, но и течение вышележащих вод, которое в основном сохраняет аналогичное направление. Циркуляция, показанная на рис.1, развивается на фоне этих течений и может менять как скорость так и направление при изменениях ветра. Вместе с тем положение зоны циркуляционного движения промежуточных вод остается примерно в той же области, что и на распределении скорости по итогам плановой съемки, выполнявшейся в этом же районе в середине августа 2009 года [3].

О значительном влиянии выявленной области циркуляционных течений на перенос взвешенных частиц в Волховской губе Ладожского озера свидетельствуют также результаты спутниковых съемок поверхности водоема. На снимках, относящихся к августу в аналогичных гидрометеорологических условиях, четко выделяется пятно с повы-

шенной концентрацией взвеси. Причем в центральной части и вокруг этого пятна концентрация взвеси существенно меньше чем на его периферии.

Основные результаты

1. Выявлена структура системы течений в заливе, которая включает крупномасштабное течение (с масштабами порядка размеров водоема), приводящее к нагону вод озера в залив, и локальную циркуляцию промежуточной струи. На фоне крупномасштабного течения помимо циркуляции наблюдается характерный для крутых склонов дна придонный плотностной поток в открытое озеро. Отмеченный заток озерных вод в залив характерен для Волховской губы в первой половине августа.
2. Обнаруженная циркуляция может менять как скорость так и направление при изменениях ветра.
3. Почти на всех рассмотренных вертикалях в придонном слое преобладает апвеллинг в виде холодного потока вверх по склону к вершине залива, что вызвано отмеченным выше нагонным процессом.
4. Выявленная система течений существенно влияет на перенос взвешенных частиц в Волховской губе Ладожского озера. С одной стороны в зоне циркуляции повышается концентрация взвеси, с чем может быть связано локальное повышение биопродуктивности на акватории губы. С другой стороны, циркуляционный перенос примесей затрудняет их распространение в открытое озеро и, следовательно, повышает степень загрязнения залива за счет стоков рек в губу.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-05-01146).

Литература

1. Астраханцев Г.П., Меншуткин В.В., Петрова Н.А. Руховец Л.А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. Наука. СПб. 2003. 362 с.
2. Науменко М.А., Авинский В.А., Барбашова М.А. и др. Современное экологическое состояние Волховской губы Ладожского озера // Экол. химия. 2000. Т. 9. Вып. 2. С. 90–105.
3. Самолубов Б.И., Иванова И.Н., Авилкин И.А., Будников А.А., Шейнкман Е.Л. Транспорт примесей в системе стратифицированных течений в Волховской губе Ладожского озера. Физические проблемы экологии. М.: МАКС ПРЕСС. 2011. № 17. С. 120 – 133.
4. Самолубов Б. И. Плотностные течения и диффузия примесей. М.: Изд. ЛКИ (УРСС). 2007. 352 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
300 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ МИХАИЛА ВАСИЛЬЕВИЧА ЛОМОНОСОВА (вступительная статья проф. В.И. Трухина)	4
СЛОВО О М.В. ЛОМОНОСОВЕ, КАК ИССЛЕДОВАТЕЛЕ «НЕДРА ЗЕМНО- ГО» (статья проф. Г.И. Петрунина).....	5
М.В.ЛОМОНОСОВ И АНТРОПОГЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА (статья проф. А.А. Соловьева)	9
Авилкин И.А., Самолюбов Б.И., Иванова И.Н., Будников А.А., Барбанова Е.С. ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУР ПОЛЕЙ ТЕЧЕНИЙ И КОНЦЕНТРАЦИЙ ПРИМЕ- СЕЙ В ВОЛХОВСКОЙ ГУБЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА	15
Андрееенко Т.И., Рустамов Н.А., Соловьев А.А. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И СТАНДАРТИЗАЦИИ В ЭНЕР- ГЕТИКЕ ВТОРИЧНЫХ БИОРЕСУРСОВ РОССИИ	20
Байдулов В.Г., Щербачев О.В. ВЛИЯНИЕ СЖИМАЕМОСТИ НА ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОНВЕК- ТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ПЛОСКОСТИ В НЕОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ ...	24
Берёзкин М.Ю. ЭКОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИМПЕРАТИВ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ МИРА	42
Букатов А.Е., Павленко Е.А. АНАЛИЗ СВЯЗИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ МЕТЕОРОЛОГИ- ЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЛЕДОВОГО РЕЖИМА АЗОВСКОГО МОРЯ С ИНДЕКСАМИ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ	48
Воронина Е.В., Копнин А.С. СОВРЕМЕННОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЙОНЕ ТИХООКЕАНСКОГО АКТИВНОГО ПОЯСА	72
Гаврилов А.А. ЧИСЛЕННАЯ ГИДРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТЕОРОЛОГИ- ЧЕСКИХ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ, ИНИЦИИРУЕМЫХ АТ- МОСФЕРНЫМИ ПРИЛИВАМИ	81
Гордиенко В.А., Брыкин С.Н., Кузин Р.Е., Серебряков И.С., Старков М.В. АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ: МЕЖДУ МИФОМ И РЕАЛЬНО- СТЬЮ	92

Гусев В.А., Жостков Р.А. ИНТЕНСИВНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРЕ	111
Дегтярев К.С. ОБ УСТОЙЧИВОМ РАЗВИТИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭКОЛОГО- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМ ПРИОРИТЕТАМ РОССИИ	123
Есюкова Е.Е., Чубаренко И.П. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРИЗОН- ТАЛЬНОГО ВОДООБМЕНА НАД ПРИБРЕЖНЫМ СКЛОНОМ В ЮГО- ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ ПРИ ОСЕННЕМ ВЫХОЛАЖИВАНИИ	129
Жуков А.Н., Латушкин А.А., Пустовойтенко В.В., Сизов А.А. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИНАМИКА МЕЖГОДОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ АРАВИЙСКОГО МОРЯ 1985-2007 гг.	135
Запелалов А.С., Пустовойтенко В.В., Станичный С.В., Показеев К.В. ИНФОРМАТИВНЫЕ ПРИЗНАКИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ	146
Касьянов С.Ю. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ КРУПНОГО АСТЕ- РОИДА ПРИ СНИЖЕНИИ С ЗАГЛУБЛЕНИЕМ В ЛИТОСФЕРУ И МАНТИЮ ЗЕМЛИ	151
Килесо А.В., Гриценко В.А. МНОГОФАКТОРНОСТЬ РАСЧЕТНОГО УСЛОВИЯ НА ДНЕ ДЛЯ ЧИСЛЕН- НЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИДОННЫХ ПЛОТНОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ	165
Кистович А.В. КОМПЛЕКСНОЗНАЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПО- ВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН	171
Колесов С.В. , Мошенцева А.В. , Носов М.А. КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ ЦУНАМИ В ЯПОНИИ 13 МАРТА 2011 г.: ЧИС- ЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, АНАЛИЗ ЗАПИСЕЙ ГЛУБОКОВОДНЫХ СТАНЦИЙ DART И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ ПОЛЕЙ	178
Кудин В.Н. ИЕРАРХИЧНОСТЬ ИНФОРМАЦИИ И ДИСКРЕТНОСТЬ РАЗВИТИЯ – ОБЯ- ЗАТЕЛЬНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ САМООРГАНИЗАЦИИ	187
Кузнецов В.В., Кузнецова Ю.В. АНАЛИЗ СТОХАСТИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ ОСЦИЛЛЯТОРА	192
Кузьмин Р.Н., Мискинова Н.А., Швилкин Б.Н., Макарова А.П., Зубенко В.В., Телегина И.В., Рау Э.И., Сеннов Р.А. ЭКОЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ	207
Кукушкин А.С. МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЗРАЧНОСТИ В ГЛУБОКОВОДНЫХ И ШЕЛЬФОВЫХ РАЙОНАХ ЧЕРНОГО МОРЯ	219

Максимочкин В.И. ВЛИЯНИЕ МЕТАМОРФИЗМА НА ПАЛЕОИНФОРМАТИВНОСТЬ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПОДВОДНЫХ БАЗАЛЬТОВ	231
Метечко Л.Б., Березин В.М. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ОСНОВЫ ПРАКТИКИ ПРЕПОДАВАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭКОЛОГИЯ» С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ТЕХНИЧЕСКОМ ВЫСШЕМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ УЧРЕЖДЕНИИ НА ПРИМЕРЕ МОСКОВСКОГО АВИАЦИОННОГО ИНСТИТУТА (НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА) ...	236
Назарова Л.Е. ИЗМЕНЧИВОСТЬ РЕЖИМА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ КАРЕЛИИ	240
Нефедова Л.В. РАЗРАБОТКА БЛОКА РЕСУРСОВ МАЛОЙ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ГИС «ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ РОССИИ»	247
Норина С.Б., Растопов С.Ф., Норин Е.В. ФОТОДЕТЕКТИРОВАНИЕ МИКРОБИОПОДВИЖНОСТИ С МАГНИТНОЙ ФИКСАЦИЕЙ ОБЪЕКТА ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СКРИНИНГА И АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ ОТ НИЗШИХ ОРГАНИЗМОВ	260
Першин С.М. РЕВЕРСИЯ КОНВЕКЦИИ В ВОДЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОКРЕСТНОСТИ 4 °С	266
Петрунин Г.И., Попов В.Г. ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ЛИТОСФЕРЫ СТАБИЛЬНЫХ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ /ЩИТЫ, ПЛАТФОРМЫ/	271
Потапов А.А. МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ЛОКАЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ РАДИАЦИОННОГО ФОНА В УСЛОВИЯХ ГОРОДА	278
Пустовойтенко В.В., Запевалов А.С., Показеев К.В. КОСМИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА МОРСКИХ АКВАТОРИЙ. АЛЬТИМЕТРЫ (ВЫСОТОМЕРЫ)	287
Розенберг А. Д., Показеев К. В., Кистович А. В. ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЯЧЕЙСТЫХ СТРУКТУР, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЗАМОДЕЙСТВИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН И ТУРБУЛЕНТНОСТИ	306
Рыженков А.П. РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС ЗЕМЛИ В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ	317
Саввин В.Л., Казарян Г.М., Пирогов Ю.А. ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ	323

Савельев И.Б. ГЕНЕРАЦИЯ ОБРУШАЮЩИХСЯ ВОЛН С МАКСИМАЛЬНОЙ АМПЛИТУДОЙ ПРИ ПОМОЩИ ОДНОНАПРАВЛЕННОЙ ДИСПЕРСИОННОЙ ФОКУСИРОВКИ	332
Самолюбов Б.И., Иванова И.Н. ПРОФИЛИ СДВИГОВОЙ СКОРОСТИ И ВЗВЕСИ В СГОННО-НАГОННОМ ТЕЧЕНИИ	342
Самолюбов Б.И., Перескок Н.А. ОБЛАКА МУТНОСТИ В СИСТЕМАХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ	346
Самсонова В.В., Копчик С.В., Перов Н.С., Родионова В.В. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЧВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА «ПЕЧЕНГАНИКЕЛЬ» НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ	353
Сидоренков Н.С., Жигайло Т.С., Незваль Е.И., Неушкин А.И., Шерстюков Б.Г. МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ОБЛАЧНОСТИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО СИЯНИЯ В МОСКВЕ	357
Соловьев Д.А. ИННОВАЦИОННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕСУРСОВ ГИДРОСФЕРЫ	363
Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д., Петренко А.И. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В СОСТАВНОМ ВИХРЕ	370
Степанова О.Б., Чубаренко И.П. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБРЕЖНЫХ ВОД В РАННЕВЕСЕННИЙ ПЕРИОД И ВОД ХОЛОДНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ	380
Тищенко А.П., Пирогов Ю.А., Тищенко Д.А., Тищенко Н.Н. УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ПОЛИГОН «ВОЛГОВЕРХОВЬЕ»	390
Чернова Н.И., Коробкова Т.П., Радомский Н.В., Киселева С.В., Зайцев С.И., Гайнанова О.Ю. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ФОТОБИОРЕАКТОРА ДЛЯ ДВУХ-СТАДИЙНОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ – ПРОДУЦЕНТОВ ЛИПИДОВ	396
Чернышков П.П., Амиров Ф.О., Бородин Е.В., Скляров М.Б., Чуринов Д.А. МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ВОДНЫХ МАСС В ЮЖНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА В ЯНВАРЕ – ДЕКАБРЕ 2004 - 2009 гг. (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЗОНДИРОВАНИЙ ДРЕЙФУЮЩИХ БУЕВ МЕЖДУНАРОДНОГО НАУЧНОГО ПРОЕКТА «ARGO»)	408
Шейнкман Е.Л., Самолюбов Б.И., Иванова И.Н., Перескок Н.А., Григорьев И.О., Шлычков Д.С. РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ СОСТАВА ВОДЫ ПРИ РАЗВИТИИ ЦИРКУЛЯЦИЙ В ЗАЛИВЕ	415

Авторский указатель

Авилкин И.А.	15	Норин Е.В.	260
Амиров Ф.О.	408	Норина С.Б.	260
Андреевко Т.И.	20	Носов М.А.	178
Байдулов В.Г.	24	Павленко Е.А.	48
Барбанова Е.С.	15	Перескок Н.А.	346, 415
Березин В.М.	236	Перов Н.С.	353
Берёзкин М.Ю.	42	Першин С.М.	266
Бородин Е.В.	408	Петрунин Г.И.	5, 271
Брыкин С.Н.	92	Пирогов Ю.А.	323, 390
Будников А.А.	15	Показеев К. В.	146, 287, 306
Букатов А.Е.	48	Попов В.Г.	271
Воронина Е.В.	72	Потапов А.А.	278
Гаврилов А.А.	81	Пустовойтенко В.В.	135, 146, 287
Гайнанова О.Ю.	396	Радомский Н.В.	396
Гордиенко В.А.	92	Расгопов С.Ф.	260
Григорьев И.О.	415	Рау Э.И.	207
Грищенко В.А.	165	Родионова В.В.	353
Гусев В.А.	111	Розенберг А. Д.	306
Дегтярев К.С.	123	Рустамов Н.А.	20
Есюкова Е.Е.	129	Рыженков А.П.	317
Жигайло Т.С.	357	Саввин В.Л.	323
Жостков Р.А.	111	Савельев И.Б.	332
Жуков А.Н.	135	Самолобов Б.И.	15, 342, 346, 415
Зайцев С.И.	396	Самсонова В.В.	353
Запечалов А.С.	146, 287	Сеннов Р.А.	219
Зубенко В.В.	207	Серебряков И.С.	92
Иванова И.Н.	15, 342, 415	Сидоренков Н.С.	357
Казарян Г.М.	323	Сизов А.А.	135
Касьянов С.Ю.	151	Скляр М.Б.	408
Килесо А.В.	165	Соловьев А.А.	9, 20
Киселева С.В.	396	Соловьев Д.А.	363
Кистович А. В.	171, 306	Станичный С.В.	146
Колесов С.В.	178	Старкова М.В.	92
Копнин А.С.	72	Степанова Е.В.	370
Копчик С.В.	353	Степанова О.Б.	380
Коробкова Т.П.	396	Телегина И.В.	207
Кудин В.Н.	187	Тищенко А.П.	390
Кузин Р.Е.	92	Тищенко Д.А.	390
Кузнецов В.В.	192	Тищенко Н.Н.	390
Кузнецова Ю.В.	192	Трухин В.И.	4
Кузьмин Р.Н.	207	Чаплина Т.О.	370
Кукушкин А.С.	219	Чашечкин Ю.Д.	370
Латушкин А.А.	135	Чернова Н.И.	396
Макарова А.П.	207	Чернышков П.П.	408
Максимочкин В.И.	231	Чубаренко И.П.	129, 380
Метечко Л.Б.	236	Чурин Д.А.	408
Мискинова Н.А.	207	Швилкин Б.Н.	207
Мошенцева А.В.	178	Шейнкман Е.Л.	415
Назарова Л.Е.	240	Шерстюков Б.Г.	357
Незваль Е.И.	357	Шлычков Д.С.	415
Неушкин А.И.	357	Щербачев О.В.	24
Нефедова Л.В.	247		

Научное издание

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ
(ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА)

№ 18

Сборник научных трудов
Под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева

Научные труды публикуются в виде, представленном авторами
Названия организаций приведены в авторской форме

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
119899, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова

Корректоры: Савина Е.К., Чаплина Т.О.
Макет: Берёзкин М.Ю.

Напечатано с готового оригинал-макета