

Введение

По инициативе физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в 1997-2004 гг. были организованы и проведены четыре Всероссийские конференции по экологической физике, развернуты работы в рамках Федеральной целевой программы «Интеграция», созданы новые лаборатории и разработаны оригинальные научные приборы, проведены многочисленные геоэкологические экспедиции по исследованию физики атмосферы, океана и суши Земли, написан классический университетский учебник «Общая и экологическая геофизика», в Российской экологической академии по инициативе ученых физического факультета создана секция «Физические методы в экологии», совместно с Тверским университетом создан учебно-научный геоэкологический полигон «Волговерховье», сформированы новые учебные программы лекций и семинаров экологической направленности.

Публикация серии научных трудов «Физические проблемы экологии (экологическая физика)» берет начало в объединенной программе экологических исследований физического факультета, разработанной около десяти лет назад. В последние годы сборник превращен в ежегодник. Научный спектр публикаций, представленных в сборниках, очень широк, но он охватывает значительную часть исследований, которые редакторы сборника относят к физическим проблемам экологии.

В настоящем, 18 томе сборника, как и в предыдущих изданиях, представлены труды ученых Московского университета и наших коллег из других организаций, занятых решением проблем экологической физики.

Сборник посвящается 300- летию со дня рождения великого русского ученого Михаила Васильевича Ломоносова.

Декан физического факультета МГУ, профессор

В.И.Трухин

Директор Центра магнитной томографии и спектроскопии МГУ,

Профессор физического факультета

Ю.А.Пирогов

Зав. кафедрой физического факультета

К.В.Показеев

300 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ МИХАИЛА ВАСИЛЬЕВИЧА ЛОМОНОСОВА

Великий русский ученый М.В.Ломоносов занимает видное место в истории передовой философской мысли. Его замечательные открытия в области наук о природе, его оригинальные естественно-научные и философские обобщения сыграли большую роль в развитии материализма. Ломоносов смело выступал против устарелых теорий и идей в естествознании и философии, выдвигая на первый план новые, нерешенные научные проблемы. Гениальный русский ученый решительно преодолевал отжившие традиции, правила и догмы, сковывавшие научную мысль.

Только те ученые заслуживают, по мнению Ломоносова, высокой оценки, которые, несмотря на уже достигнутые завоевания науки решительно, не боясь трудностей, прокладывают новые. К таким ученым он относил Галилея, Кеплера, Декарта, Ньютона и др.

Труды М.В. Ломоносова получили высокую оценку многих видных ученых, российских и зарубежных. В то же время до сих пор продолжают и необоснованные выступления против гения Ломоносова.

А.С. Пушкин назвал М.В. Ломоносова первым университетом. И А.С. Пушкин не ошибся! Действительно наш, первый в России университет был создан по проекту Ломоносова. Московскому университету имни М.В. Ломоносова 256 лет. Учитесь в нем, занимайтесь наукой, любите наш первый университет имени Михаила Васильевича Ломоносова

Вечная слава великому русскому ученому М.В.Ломоносову!!!

Декан физического факультета МГУ
профессор В.И. Трухин

СЛОВО О М.В. ЛОМОНОСОВЕ, КАК ИССЛЕДОВАТЕЛЕ «НЕДРА ЗЕМНОГО»

Наш великий соотечественник М.В. Ломоносов, 300-летие которого мы чувствуем сегодня, по праву считается основоположником российской науки. Известное высказывание Аполлона Григорьева о другом нашем национальном гении – А.С. Пушкине, характеризующее силу проникновения его в духовность народную, - «Пушкин наше все» - можно отнести и к Михаилу Васильевичу, когда речь касается материй научных. Трудно переоценить все сделанное им в этой области, в том числе и для геофизической науки в России и, прежде всего в Московском Университете.

М.В. Ломоносов был первым русским ученым, который глубоко заинтересовался физическими процессами, происходящими в основных оболочках Земли. По этому поводу он высказал много интереснейших мыслей, догадок, создал ряд оригинальных геофизических приборов, в том числе и первый гравиметр; проводил натурные исследования, особенно в атмосфере. Он сформулировал ряд геофизических проблем касающихся погоды и климата, течений в океане, землетрясений, тектонической активности, пространственных и временных вариаций магнитного поля и поля тяготения Земли, часть из которых нашла свое разрешение только в конце XIX века.

В виду ограниченности доклада во времени, очень кратко остановимся на работах М.В. Ломоносова, касающихся «недра земного», как именовал он наиболее недоступную для прямого исследования твердую оболочку Земли. **«Велико есть дело достигать во глубину земную разумом, куда рукам и оку достигнуть възбраняет натура, странствовать размышлениями в преисподней, проникать рассуждениями сквозь тесные расселины и вечною ночью помраченные вещи и деяния выводить на солнечную яность»**...- писал он в своем знаменитом трактате «О слоях земных», где изложено, в основном, большинство его соображений о сущности того самого «недра земного». Этот труд М.В. Ломоносова, как считает профессор Г.Г. Леммлейн, написавший предисловие к переизданию его отдельной книгой в 1949 году, – по законченности изложения «...является образцом ранней русской научной литературы.. С несравненным мастерством переходит он (М.В. Ломоносов) от точного и образного описания явлений к строго обоснованным и убедительным их толкованиям» [1]. В справедливости приведенной характеристики труда М.В. Ломоносова автор настоящего доклада убедился лично, когда, прочитав с большим удовольствием «Слои земные» был поражен логичностью и стройностью изложения текста, образностью языка и многообразием оригинальных мыслей М.В. Ломоносова о строении Земли, процессах, в ней происходящих и об её возможной эволюции. Очень сожалею, что познакомился с этим трактатом слишком поздно, поскольку, несмотря на некоторые устаревшие взгляды М.В. Ломоносова, например, на происхождение тепловой энергии в недрах, которое он связывает с выгоранием серы, тщательно это обосновывая, и некоторые другие, - этот труд чрезвычайно полезен не только в фактическом, но, особенно, в методологическом отношении. Прав был академик П.Л. Капица, когда готовя доклад «О творческом непослушании», о взаимоотношении гения и общества и о роли гения в развитии науки, на примере М.В.Ломоносова, записал: «Когда говорят о Ломоносове в наши дни, то обычно говорят о его научных достижениях. Сейчас они нам не только понятны, но наука за эти 200 лет настолько ушла вперед, что кажутся самоочевидными, и, чтобы понять

силу гения Ломоносова, нам надо вообразить себя на уровне культуры того времени» [2].

В науках о Земле, как раз чтение «Слоев земных» и сравнение мыслей в них высказанных с уровнем геологической и геофизической науки того времени, со взглядами на Землю других ученых современников М.В. Ломоносова, как раз открывает силу его гения в этой области.

Начав трактат с изложения известных на тот момент сведений о земной поверхности и отметив роль воды и ветра в формировании лика Земли, М.В. Ломоносов разделяет формирующие силы на внешние и внутренние и делает вывод о преобладающей роли внутренних сил в образовании гор, вулканов, тектонической активности и происхождении землетрясений, тщательно обосновывая свои выводы многочисленными примерами. Обсуждая образование гор, он пишет: **«Сила, поднявшая такую тягость, ни чему ... приписана быть не может, как господствующему жару в земной утробе»**. О решающей роли тепла Земли, как внутренней силы, он много рассуждал и в ранее произнесенном им «Слове о рождении металлов от трясения Земли» (6 сент. 1757 г): **«За истинную и общую причину земного трясения, со всеми почти нынешними и древними философами подземельный огонь признаваю»** - и пытался оценить глубину расположения источников этого жара. Опираясь в рассуждениях на проявление тектонической активности, особенно в процессах землетрясения, а также на вулканическую деятельность Земли, он заключает: **«...коль ужасна должна быть глубина оных потаенных пропастей и коль толсты их своды. Простираясь по мере современных трясений иногда до трех тысяч верст, держатся не везде подпорами, то есть подземными горами, но и собственною крепостию и толстотою, которую ежели только в сотую долю положить против обширности, тридцать верст найдем...»**. А по поводу толщины сводов, поддерживающих Тибетские горы, М.В. Ломоносов пишет: **“... ежели положить только сотую часть их поперечника, то, несомненно, должны быть на 70 верст толщиной, считая большой поперечник Азии в семь тысяч верст”** [1]. Приведенные цифры – это средняя толщина континентальной земной коры под платформами и горами, соответственно, подтверждены были геофизическими методами (сейсмологией, гравиметрией) лишь в XX веке. Не удивительно ли?

Что касается вулканов, которые М.В. Ломоносов связывал с образованием трещин в слоях земных от землетрясений, то они – **“... есть не что иное, как трубы или отдушины, коим выходит подземного пожара излишество.”** Их долговременное существование Ломоносов также считал доказательством большой глубины **“...где жительствоет сила возвышающая и опровергающая горы”**, то есть **“огонь подземельный”**. Так, оценив количество вулканического материала, выбрасываемого Этной и Везувием на протяжении веков, он заключает: **“...Толь великое количество естлибы из самых оных гор, или хотя бы из подземных мест в Неаполе и Сицилии выгорело, то бы конечно уже давно в выеденную под ними пропасть слабые своды провалились, отягощенные вагою самих эти гор..., но безмерна глубина потаенной хляби, и потому своды толщины ужасной не допускают обрушиться оным землям”** [1].

Рассматривая и подробно обсуждая известные в его время «огнедышащие горы», частоту их извержений, существование жизни подо льдом в Океане и что **“... сам великий Океан внутренней земной теплоты бессомнительный есть показатель ... и что дно морское без лучей солнечных от внутреннего земного огня доволь-**

но теплоты получает” – он делает вывод о повсеместном распространении глубинных источников тепла на земном шаре. Однако, по Ломоносову, они расположены неравномерно, и значительно, мощнее и обширнее в местах, где действуют вулканы и, в частности: “...**Етна, Везувий, Липара и многие острова на Архипелаге, которые хотя не беспрерывном жаром, однако частым отрыганием пламени из самой глубины ясно показывают, что Тирренское и Эгейское море над подземным огнем разливаются**” [1]. Действительно, во второй половине XX века экспериментально установлено, что тепловой поток под дном этих морей удивительно высокий. Открыты и другие, так называемые, “горячие точки” на поверхности Земли, которые ученые в концепции тектоники плит, связывают с восходящими из больших глубин ветвями конвективных течений в мантии.

Особенно интересным для геофизиков, изучающих строение Земли и процессы, проявляющиеся в её тектонической активности (образование гор, разломов, извержения вулканов, и др.), являются взгляды М. В. Ломоносова на “земные трясения”, причину которых он видел в перераспределении глубинной теплоты земного шара. Подразделяя землетрясения на быстрые и “нечувствительные долговременные”, к которым он относил медленные вековые колебания земной поверхности, проявляющиеся в рождении гор и ущелий, в наклонах земных слоев, в разрывах и сдвигах рудных жил, он выделяет 4 возможных их типа: “**Страшное и насильственное оно в натуре явление показывается четырьмя образами. Первое, когда дрожит земля частыми и мелкими ударами... Второе, когда, надувшись, встает кверху и обратно перпендикулярным движением опускается... Третье, поверхности земной наподобие волн колебание бывает весьма бедственно, ибо отворенные хляби на зыблущиеся здания и на бледнеющих людей зияют и часто пожирают. Наконец, четвертое, когда по горизонтальной плоскости вся трясения сила устремляется, тогда земля из-под строений якобы похищается...**” [1, 3].

В приведенной цитате специалисты сейсмологи легко могут усмотреть образное описание механизмов очага землетрясения. Нужно отметить, что волнообразное движение земной поверхности при землетрясении устанавливается и описывается Ломоносовым в 1757 году, в «Слове о рождении металлов от трясения Земли», несколько ранее, чем Майчелом, которому по обыкновению приписывают это открытие (1760) и задолго до Юнга, второго претендента в западном мире на первенство открытия этого явления.

Две другие, не менее важные в геофизическом отношении работы Ломоносова, читаны им в публичном заседании Академии Наук 7 мая 1759 года - “Рассуждение о большей точности морского пути” и “Размышления о точном определении пути корабля на море” [3]. Сами названия уже говорят о практической направленности этих исследований, связанных с развитием мореплавания в России, вздыбленной преобразовательской деятельностью Петра Великого.

В этих работах путем рассуждений, основанных на наблюдениях за поведением стрелки компаса, Ломоносов вслед за У. Гильбертом (1600) приходит к выводу, что Земля - гигантский магнит “**из разных великих частей разной доброты составленный или из многих магнитов разной силы в один сложенный, которые по своему положению и крепости сил действуют**”, - а по сему “**то необходимо следует - заключает он, - что на ней, по разности мест разное магнитной стрелки склонение**». Временные же вариации направления магнитного поля в данном месте он связывает с меняющимся положением других планет относительно Земли, с возму-

щающим действием их "магнитной материи". Для построения магнитной теории и усовершенствования на ее основе точности морского пути он призывает мореплавателей записывать наблюдения "магнитной силы во всех странах", т.е. высказывает идею необходимости геомагнитной съемки с помощью самопишущего компаса (прообраза магнитографа). Именно, в этих работах четко прослеживается принцип методологического обобщения Ломоносова, сформулированный им в первых фразах "Рассуждения" — **"Из наблюдений устанавливать теорию, через теорию исправлять наблюдения - есть лучший всех способ к изысканию правды"**.

В третьей главе "Рассуждения", озаглавленной "О сочинении теории морских течений", стараясь объяснить морские движения или приливы "помешательством в тяготении", т.е. возмущениями гравитационного поля Земли, связанными с относительным движением Луны, Земли, Солнца, Ломоносов описывает способ и прибор для наблюдений за этими возмущениями. Полагая, что под влиянием перемещений морских толщ, вызванных периодическими возмущениями, будет меняться направление силы тяжести, он пытается обнаружить эту "перемену направления к центру падающих вещей" с помощью своего "великого пендула" (маятника). Здесь же описан другой замечательный прибор, предназначенный уже для измерений величины силы тяжести, являющийся, по существу, прародителем семейства первых гравиметров, основанных на статическом принципе. С помощью этого прибора, представляющего модификацию им же разработанного в 1749 г. **"универсального барометра"**, Ломоносов, по его мнению **"старался усмотреть, не воспоследуют ли в собственной тягости ртути перемены согласные с переменами вышеописанного отвеса"** - т.е. маятника. К сожалению, такого согласия Ломоносов не обнаружил, хотя совершенно правильно предугадал его существование. Две причины помешали ему это сделать: во-первых, недостаточная точность приборов, а во-вторых - несовершенная методика наблюдений, предполагавшая измерения только в одной точке.

Заканчивая краткий и беглый обзор взглядов М. В. Ломоносова на недра Земли и на процессы в них происходящие, отметим еще раз, что для объективной оценки значительности и важности его научных трудов в этой области, нужно помнить, что творил он во времена, когда не только геофизики, но и геологии, как науки о Земле, еще не существовало. Это был период накопления фактов, простого описания наблюдаемых на поверхности Земли явлений, методы исследования были неразвиты, аппаратная база отсутствовала, информационный обмен между учеными был минимален. Все приходилось делать самому, опираясь на опыт и догадки предшественников, в чем он немало преуспел, в том числе и в области наук о Земле. И сегодня, в день 300-летия со дня рождения М.В. Ломоносова, здесь, в Московском Университете, справедливо носящем его имя – поклонимся ему.

Литература.

1. М. Ломоносов. О слоях земных. Госгеолиздат, М-Л, 1949, 211 с
2. Академик П.Капица. О творческом «непослушании», «Наука и жизнь», 1986, №2, с. 80.
3. М.В. Ломоносов. ПСС, Из-во АН СССР, т.4, М-Л, 1955, 830 с.

Профессор Г.И. Петрунин

М.В.ЛОМОНОСОВ И АНТРОПОГЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

С почти трехвекового временного расстояния энциклопедичность научных трудов М.В.Ломоносова, всеобъемлющий характер научных обобщений, смелость и глубина его предвидений справедливо оцениваются как неиссякаемый источник новых подходов и решений современных проблем естествознания, предопределяющих горизонты дальнейшего развития научного знания.

Творческое наследие М.В.Ломоносова, о котором А.С. Пушкин: сказал: «Он создал первый университет; он, лучше сказать, сам был первым университетом», поистине многомерно. Оно охватывает результаты исследования в различных областях естественных и гуманитарных наук. В его трудах по физике, химии, астрономии, геологии, географии, инженерии, истории, философии содержатся не только знания, относящиеся к этим конкретным наукам, но и идеи, применимые для решения задач в смежных, научных направлениях естествознания. В статье не ставится цель осветить все стороны многогранного научного творчества М.В.Ломоносова. Предполагается, обратить внимание на значимость его идей и взглядов на развитие такой междисциплинарной области естествознания, какой является антропогенная энергетика, которая представляет собой совокупность созданных человеком средств извлечения природных энергоресурсов и преобразования содержащейся в них энергии для приспособления к своим нуждам и защите окружающей среды.



Во времена научной деятельности М.В.Ломоносова, относящихся к первой половине XVIII века, антропогенная энергетика характеризовалась относительно низким уровнем использования возобновляемых источников энергии атмосферы и гидросферы - предшественников будущей зеленой энергетики. Вместе с тем к этому же времени относится начало становления и формирования антропогенной энергетики на основе термодинамических преобразователей невозобновляемых видов энергоресурсов. В научном плане в этот период перед учеными во весь рост заявляла о себе проблема построения качественно новых теорий относительно структуры материи и принципов организации ее движения. М.В.Ломоносов оказался на самом острие разрешения проблемы определения закономерности пространственно-временного изменения энергии как количественной меры движения материи. Он задумал объединить в одно стройное целое процессы превращения и изменения материи на основе атомно-молекулярных представлений. На путях к достижению этой цели Ломоносов открыл и сформулировал, как общий для естествознания фундаментальный закон природы – закон сохранения энергии: Он пи-

сал: «...все перемены, в натуре случающиеся, такого суть состояния, что, сколько чего у одного тела отнимется, столько присовокупится к другому... Сей всеобщий естественный закон простирается и в самые правила движения: ибо тело, движущее своей силою другое, столько же оныя у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает». Открытый Ломоносовым закон получил обоснование в его работах: «Об отношении количества материи и веса» (1758) и в «Рассуждении о твердости и жидкости тел» (1760) [1,2]. Следует отметить, что разработка принципов обобщения и объединения параметров, характеризующих двигательную силу различных средств и способов организации движений, это результат коллективного творчества выдающихся ученых в международном масштабе и, в первую очередь, А.Лавуазье, Р.Майера, Г.Гельмгольца. Но абсолютная причастность к первому открытию закона сохранения энергии как было доказано в исторических исследованиях, вне всякого сомнения, принадлежит М.В. Ломоносову. Однако осознать значение сделанного им открытия, и подтвердить его приоритет многие ученые тех лет так и не смогли. Лишь впоследствии законы сохранения в общем виде любого качества – массы, импульса, энергии, заряда стали базовым принципом развития всех естественных наук.

В антропогенной энергетике законы сохранения составляли основу не только для создания технологических средств энергообеспечения людей, но и имели существенное значение для формирования адекватных подходов к анализу энергетических потоков и взаимосвязей между количеством энергии и процессами формирования энергетических ресурсов, происходящими в географической оболочке. М.В. Ломоносов в качестве приоритетного направления антропогенной энергетике выделяет задачу изучения происхождения ископаемых энергетических ресурсов Земли. Заметим, что к началу его исследований вопросов, относящихся к источникам энергии, сложилось схоластическое мнение о том, что ископаемые твердые топливные ресурсы следует рассматривать не более, как «игру природы». Ломоносов вопреки общепринятым взглядам на происхождение ископаемых топлив, имел смелость высказать диаметрально-противоположную точку зрения. В его трудах обстоятельно развивается и получает обоснование концепция о происхождении каменного угля из торфяников, поглотивших остатки погрязших в них деревьев. По его мнению, процесс формирования органического ископаемого топлива осуществлялся в течение миллиардов лет при участии подземного огня, под громадным давлением наносных пластов непунического происхождения. Для практического обоснования полноты картины образования ископаемых топлив в природных условиях естественным путем М.В.Ломоносов высказывает гипотетические соображения о возможности воспроизведения условий, обеспечивающих получение органического топлива в искусственных условиях путем организации высокоскоростного процесса получения органического топлива с помощью растительной биомассы. М.В.Ломоносов предвидел реализацию этого проекта. Но о том, каким образом процесс искусственного производства биотоплива может быть практически осуществлен, он не знал и потому в его трудах по этому вопросу мы не встречаем конкретных предложений. Нынешнее состояние развития учения о технологиях искусственного воспроизведения процессов формирования органических топлив из биологически эффективных и высокопродуктивных преобразователей солнечной энергии на основе водных микроорганизмов подтверждает плодотворность его идеи. В частности, следует отметить современные исследования,

выполняемые в Московском университете, в которых в развитие выдвинутых М.В.Ломоносовым идей, обоснованы принципы практической реализуемости процессов преобразования солнечной энергии в органические соединения, метан и другие углеводороды с использованием микроводородов.

Энергетические исследования М.В.Ломоносова, вступая на разных этапах его творчества во взаимодействие с другими разделами естествознания, оставались в неразрывной связи с ними в контексте всего разнообразия его воззрений, которые, в свою очередь, пребывали во взаимосвязи между собой. Такой подход является следствием понимания им единства природы и существования фундаментальных законов, лежащих в основе всего целостного многообразия явлений. А его взгляды и идеи, относящиеся к энергетике, убедительно демонстрируют это единство, в целесообразности которого он был твердо убежден и страстно заинтересован и как естествоиспытатель-теоретик, и как последовательный практик.

В числе работ М.В. Ломоносова, предвестников практического внедрения возобновляемых источников энергии в антропогенную энергетику, относятся его разработки различных устройств, использующих солнечные энергетические ресурсы. Проводя эти исследования, Ломоносов помимо получения конкретных научно-технических результатов стремился к дальнейшему выполнению своего общего плана — построению системы естественных наук на основе выдвинутых им принципов. Из работ Ломоносова в этом направлении следует отметить: «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих» (1753), «Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее» (1756) и «Теория электричества, изложенная математически» (1756) [3,4,5]. В этих трудах, содержится описание сконструированных им оптических и электрических устройств, использующих энергию солнца и земной атмосферы. Идея концентрации солнечных лучей в одной точке на примере двух линз и зеркала изложена следующими словами, излучающими восторг исследователя от познания нового: «И вот, наконец, явилась мысль, что солнечные лучи и после отражения от плоских зеркал все еще сохраняют теплотворную силу и, следовательно, по закону которому они повинуются в других случаях, должны, будучи собраны выпуклой линзой, увеличить жар. Тотчас же я, торжествуя, взял плоское зеркало и линзу диаметром в два дюйма и, так как день был как раз ясный, собрал линзой солнечные лучи, отраженные зеркалом. Когда после этого я подставил кусок дерева, на нем образовалось, черное пятно и оттуда пошел дым. Я смотрел на это с восторгом и, с целью идти и далее, соединил фокус линзы, подставленной прямым лучам, с фокусом первой и поднес к ним весьма белую бумагу, которая отказывалась загораться от прямых солнечных лучей, собранных непосредственно той или другой из названных линз; сразу же пошел дым, на бумаге образовалось черное пятно, бумага вспыхнула, и огонь, разгораясь, начал ее сжигать. Итак, повторив этот опыт несколько раз и устранив всякое сомнение в его правильности, я не колеблюсь заключить, что, расставив так, как я упомянул выше, большие зеркала и линзы, можно получить жар большой» [6]. М.В.Ломоносов предложил оригинальную схему расположения линз и зеркал на плоской квадратной доске необходимых размеров, которая позволяла получать в точке фокуса нагрев среды, по его расчетам, количественно на два порядка превосходящий тепло поступающего солнечного излучения. Плод инженерной мысли великого ученого, воплощенный в простой и достаточно эффектив-

ной конструкции является прототипом солнечных концентраторов современных солнечных электростанций башенного типа.

Идеи, реализованные Ломоносовым на примере создания энергосистем, обеспечивающих решение проблемы повышения качества и ценности возобновляемых источников энергии, особую значимость приобретают в условиях современных тенденций территориальной экспансии газоснабжающих и электрических систем, использующих ископаемое углеводородное сырье, подтверждая реальность осуществления стимулов к смене доминирующих энергетических ресурсов антропогенной энергетики.

Занимаясь изучением атмосферного электричества, М.В.Ломоносов разрабатывает положения о тождественности природного и искусственного атмосферного электричества и ставит задачу о создании устройств, позволяющих использовать энергию природных атмосферных процессов. Имеется в виду разработка практических методов утилизация энергии энергоемких природных явлений. В ходе решения такой далеко не простой задачи М.В. Ломоносов совместно с Г.В. Рихманом разработал прибор для измерения «степени электричества» и «громовую машину», которая давала возможность стабильного наблюдения и приема энергии молний. В дальнейшем, в силу трагической гибели Г.В. Рихмана и из-за недостатка фундаментальных знаний о природе электрических явлений это направление работ было приостановлено, и М.В.Ломоносов вынужден был обратиться к рассмотрению общих вопросов теории электричества и установлению количественных закономерностей, имеющих принципиальное значение для формирования основ теории электричества.

К каким разделам антропогенной энергетики более всего проявлял интерес М.В.Ломоносов, – нам, удаленным от расцвета его деятельности судить трудно. Но знакомство с его разнообразными естественнонаучными изысканиями не перестает преподносить удивительные находки широте и перспективности его научного наследия для изучения ресурсной базы энергетики. Так обращаясь к опубликованному в 1763 году руководству "Первые основания металлургии или рудных дел", где он подробно рассматривает как свойства различных металлов, так и практически применяемые способы их получения, обнаруживаются совершенно удивительные результаты. Здесь он сообщает о механизме "вольного" движения воздуха в рудниках и способе практического его использования в печах, работающих без принудительного дутья [7]. В наше время принцип рассмотренного им способа организации конвективного движения в печах получил свое практическое воплощение в парниковых электростанциях «солнечный камин». В этих энергетических системах восходящие движения, возникают без дополнительного принудительного воздействия при солнечном нагреве и концентрации воздушных масс в коллекторах, содержащих турбину с генератором, вырабатывающим электрическую энергию.

Круг интересов М.В.Ломоносова применительно к постановке и решению проблем пространственно-временного распределения земных энергоресурсов чрезвычайно широк. Им было выполнено фундаментальное по глубине постановки проблемы и широте охвата явлений, комплексное исследование, включающее в себя как элементную составляющую, оценку энергетических ресурсов России. В процессе реализации намеченной программы исследований Ломоносов собирал географические сведения, рассылая в различные места анкеты с вопросами, кото-

рые могли бы быть положены в основу базы данных, для составления подробного физико-географического и экономико-географического описания России и подготовки карт. Анкеты имели комплексный характер, предусматривающий сбор как географических, так статистических, экономических и политических сведений. Особенностью анкет являлось формирование знаний обо всей совокупности явлений в различных компонентах географической оболочки в их взаимной связи и зависимости.

Достойное место в этих исследованиях Ломоносова отводилось оценке топливно-энергетических богатств России. Он обращал внимание на необходимость не только выявления, но и активного вмешательства человека в рациональное природопользование, полагая, что ресурсы «сами на двор не придут, они требуют глаз и рук к своему прииску». Задуманное Ломоносовым географическое описание России, как это видно из задач, которые он ставил по сбору географических сведений, должно было охватить большой круг вопросов и содержать максимально полное описание страны и хозяйственной деятельности населения в связи с природными условиями и ресурсными возможностями энергетики на фоне общей характеристики разнообразной русской природы.

В связи с этим следует отметить предсказание М.В. Ломоносова российской принадлежности энергоресурсов Северного Ледовитого океана. Его поистине пророческие слова о том, что «Российское могущество прирастать будет Сибирью и Северным океаном» сегодня приобретают особенную актуальность. Действительно, по современным оценкам, на недра Северного полюса приходится 25% неоткрытых мировых запасов нефти и газа. Удивительно, что почти три столетия тому назад М.В. Ломоносов предвидел, что названный впоследствии его именем хребет, является продолжением территории России к северу ниже уровня моря. Исследования последнего времени в Северном Ледовитом океане подтверждают значение для развития отечественной антропогенной энергетики этого выдающегося открытия М.В. Ломоносова.

Наиболее значимым для понимания вклада Ломоносова в развитие основ антропогенной энергетики является его трактат «О слоях земных» [8]. В этой фундаментальной работе рассмотрены не только базовые принципы организации строения и развития оболочки Земли. Здесь содержатся новаторские идеи о роли энергетических процессов при формировании рельефа земной поверхности и обосновании принципа вечной изменчивости природы. Представление о постоянных изменениях, происходящих на земной поверхности, получило свое развитие в необходимости отражения природных богатств на картах и приложенных к ним описаниям. Уровень предъявляемых Ломоносовым требований к картам как комплексным географо-картографическим объектам научных исследований, содержащим разностороннюю информацию, имеет принципиальное значение для развития современных подходов к формированию геоинформационных систем антропогенной энергетики. В теоретических, региональных и прикладных представлениях М.В. Ломоносова о методах изучения ресурсной основы антропогенной энергетики выражена идея взаимосвязанного физико-географического и экономико-географического изучения возобновляемых источников энергии России. В начале конце XXI века эта плодотворная идея именно в нашей стране получила свое дальнейшее развитие в рамках создания самостоятельного раздела антропогенной энергетики – географии энергетических систем.

Такова всеобъемлющая деятельность русского гения, нашей национальной гордости, сумевшего в оставленных потомкам многогранных научных откровениях опередить свой век и продемонстрировать неизгладимые следы великой, неустанной мысли и работы на пользу науки, о расцвете которой в родной стране он так горячо и так бескорыстно ратовал.

Литература

1. Ломоносов М.В. Об отношении количества материи и веса.// Полное собрание сочинений т. 3, М.-Л.: Изд-во Академии Наук СССР, 1952, С.349.
2. Ломоносов М.В. Рассуждение о твердости и жидкости тел.// Полное собрание сочинений т. 3, М.-Л.: Изд-во Академии Наук СССР, 1952, С.377.
3. Ломоносов М.В. Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих.// Полное собрание сочинений, т. 3, М.-Л.: Изд-во Академии Наук СССР, 1952, С.15.
4. Ломоносов М.В. Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее.// Полное собрание сочинений, т. 3, М.-Л.: Изд-во Академии Наук СССР, 1952, С.315.
5. Ломоносов М.В. Теория электричества, изложенная математически.// Полное собрание сочинений, т. 3, М.-Л.: Изд-во Академии Наук СССР, 1952, С.265.
6. Ломоносов М.В. Рассуждение о катоптрико-диоптрическом зажигательном инструменте, начертанное М.Ломоносовым в 1741 году, в августе месяце.// Полное собрание сочинений, т.1, М.-Л.: Изд-во Академии Наук СССР, 1950, С. 85.
7. Ломоносов М.В. Первые основания металлургии или рудных дел.// Полное собрание сочинений, т. 5, М.-Л.: Изд-во Академии Наук СССР, 1954, С. 397.
8. Ломоносов М.В. О слоях земных.// Полное собрание сочинений, т. 5, М.-Л.: Изд-во Академии Наук СССР, 1954, С. 530.

Профессор А.А. Соловьев

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУР ПОЛЕЙ ТЕЧЕНИЙ И КОНЦЕНТРАЦИЙ ПРИМЕСЕЙ В ВОЛХОВСКОЙ ГУБЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

И.А. Авилкин, Б.И. Самолюбов, И.Н. Иванова, А.А. Будников,

Е.С. Барбанова

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Представлены результаты исследований структур термогидродинамических полей и распределений концентрации взвеси по глубине и во времени в Волховской губе Ладожского озера. Обнаружен вихреволновой подъем вод из придонного слоя в приповерхностный при росте скорости течения в апвеллинге и в приповерхностном слое. Зарегистрирована блокировка апвеллинга за счет изменения направления придонного течения, индуцированного ветром. Рассмотрено влияние зарегистрированных гидродинамических процессов на распространение взвеси в заливе.

Введение

В системах стратифицированных течений в заливах озер и морей особую роль играют процессы взаимодействия придонных и приповерхностных течений, индуцированных ветром. Такие процессы сопровождаются развитием апвеллингов, циркуляций, внутренних волн сейшевой природы и вихрей, возникающих при гидродинамической устойчивости течений в пограничных слоях. Влияние этих систем течений на распределения параметров состава воды оказывает существенное влияние на процессы формирования качества воды. Изучение таких явлений необходимо для развития методов прогноза формирования распределений характеристик качества воды в различных гидродинамических условиях. Разработка подобных методов требует детального изучения транспорта примесей в системах стратифицированных течений в природных бассейнах. Анализы результатов комплексных натурных измерений процессов развития системы стратифицированных течений и переноса взвеси представлены в данной работе.

Объект и методика исследований

Исследования преобразований структур термогидродинамических полей и распределений концентраций примесей по глубине и во времени проводились в Волховской губе Ладожского озера в августе 2011 г. [1, 2]. 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_k и концентрации взвеси C . Применялся зонд RCM 9 (Aanderaa) с доплеровским регистратором скорости, датчиками T , S_k и C . Точности измерений U , T , S_k и C : 0,5 см/с, 0,02°C, 0,02 мСм/см, и 0,4 NTU. При $C < 10$ NTU допустим анализ распределения C в безразмерном виде C/C_{mc} с погрешностью 1%, где C_{mc} - максимум C на данной срочной станции.

Эволюция распределений скорости течения и параметров состава воды

Измерения велись на двух станциях, расположенных вблизи выхода из губы в открытое озеро в центре восточной части залива. В период исследований преобладал западный ветер со скоростью 5-10 м/с.

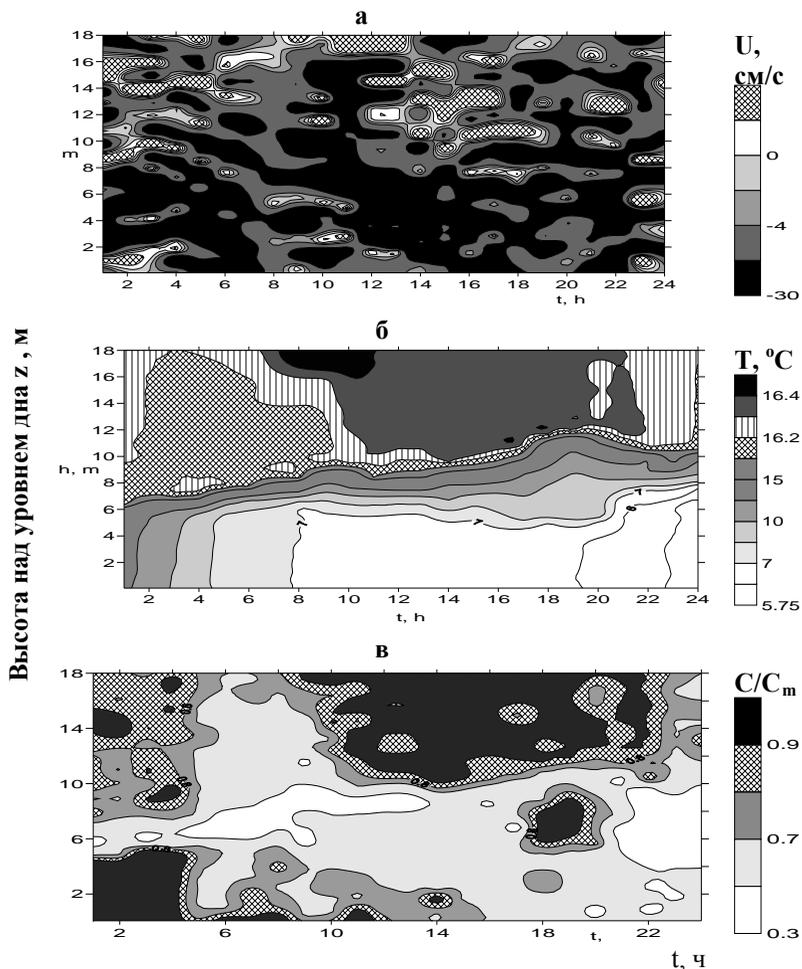


Рис. 1. Распределения по высоте над уровнем дна и во времени а – скорости течения U , б – температуры воды T и в – концентрации взвеси C/C_m .

Первая серия зондирований выполнялась 15.08.2011 г. в точке с глубиной 18 м. На фоне возмущений вихреволновой природы в поле скорости течения (рис 1а) наблюдается преобладающее течение из открытого озера в Волховскую губу в

придонном слое $z \leq 10$ м. В этой области, толщина которой убывает во времени, имеет место зона холодных вод, ярко выраженная в поле температуры (рис 1б). На верхней границе холодного слоя развиваются колебания изотерм в противофазе, характерные для второй моды внутренней волны (при $t=14-22$ ч). Такая структура, типичная для апвеллинга вод открытого озера в залив, подтверждается также и распределением концентрации взвеси (рис 1в). На этом распределении области холодных вод соответствует зона повышенной прозрачности. В первой половине серии зондирований холодные прозрачные апвеллинговые воды проникают почти до открытой поверхности. По мере ослабления апвеллинга верхняя граница этих вод приближается ко дну.

Во фронтальной части апвеллинга при $t=2-8$ ч. зарегистрировано повышение концентрации взвеси, которая по-видимому имеет речное происхождение, так как главным источником поступления взвеси в губу является река Волхов. Воды р. Волхов отличаются по составу от озерных не только присутствием естественных примесей, но и техногенных взвешенных и растворенных веществ [1, 2]. По этой причине зарегистрированный процесс апвеллинга обеспечивает очищение вод губы. В моменты повышения скорости течения как в зоне придонного апвеллинга, так и в приповерхностном слое за счет усиления ветра происходит снижение гидродинамической устойчивости и «прорыв» вод из придонного слоя в приповерхностный. Такой вихреволновой процесс отмечен при $t=6-14$ ч. Квазипериодические изменения скорости течения по глубине и во времени, которые наблюдаются на рис 1а во всей толще воды от поверхности до дна на фоне представленного основного распределения скорости связаны с развитием внутренних волн сейшевой природы.

Вторая серия зондирований выполнялась 17.08.2011 г. в точке с глубиной 20 м., смещенной на северо-восток примерно на 8 км. По результатам плановой съемки структуры полей скорости и параметров состава воды на акватории Волховской губы эта точка располагалась в той же ячейке циркуляции вод, что и первая, но на противоположенной ветви этой циркуляции. Ветер сохранял скорость порядка 2-3 м/с в первой половине 20-ч серии зондирований при его направлении, менявшемся с западного при $t=0-4$ ч на северное при $t=4-14$ ч. В последующий период ($t=14-24$ ч) направление ветра возвращалось к западному с усилением до 8 м/с.

Анализ структур полей U , T , S показал (рис 2), что в данном случае тоже имеет место апвеллинг вод открытого озера в залив, однако здесь наблюдается затухающее холодное придонное течение при $t=0-12$ ч. Вместе с тем, можно предположить, что коллапс апвеллинга имеет временный характер, так как после короткого потепления вод и ослабления течения при $t \geq 12$ ч, начинается повышение скорости апвеллинга. Именно с апвеллингом, судя по результатам двух серий зондирований, связан существенный подъем термоклина от 9 м над уровнем дна на первой станции до 14 м на второй. Обнаружено, что коллапс апвеллинга был вызван изменением направления придонного течения примерно на 90 градусов. Это было связано с резким изменением направления ветра, воздействие которого на придонное течение привело к блокировке апвеллинга.

В поле концентрации взвеси, в отличие от процесса, наблюдавшегося на первой станции, зарегистрирован придонный нефелоидный слой в зоне холодного апвеллинга. Толщина этого слоя уменьшается по мере затухания придонного тече-

ния. Заметны облака мутности, которые поднимаются из нефелоидного слоя в вышележащие воды. Это обычно связано с развитием гидродинамической неустойчивости во фронтальных зонах. Происхождение нефелоидного слоя может быть связано с повышением концентрации взвеси, поступившей на линию максимальных глубин в заливе в предшествующий период сильного ветрового волнения и, соответственно, взмучивания донных наносов в прибрежной зоне. Кроме того, не исключено повышение концентрации за счет взвесей, поступающих из р. Волхов в залив. Одновременное снижение скорости течения, теряющего транспортирующую способность, и концентрации взвеси в период ослабления и изменения направления ветра, согласуется с приведенным выше предположением.

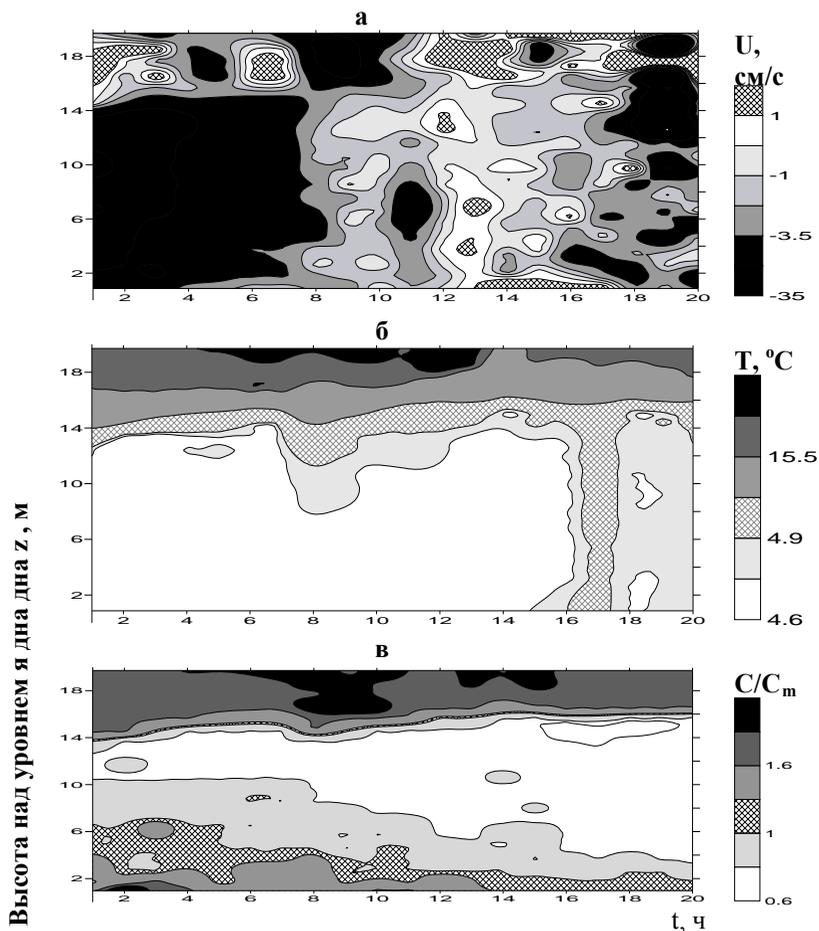


Рис. 2. Распределения по высоте над уровнем дна и во времени а – скорости течения U , б – температуры воды T и в – концентрации взвеси C/C_m .

Подобные нагонные процессы, нередко имеющие сезонный характер и сопровождающиеся затоплением берегов, типичны для Ладожского озера в данный период (середина августа 2011 г.) [1].

Концентрация взвеси над термоклинном превышает придонную, что обусловлено преимущественно мелкодисперсной взвесью и органикой, рост удельного содержания которой соответствовал активному цветению вод в заливе. Из полученных результатов следует, что в период исследований взвеси приповерхностного слоя могли распространяться в открытое озеро, тогда как придонные взвеси, преимущественно, оседали на выходе из залива.

Основные результаты

1. Обнаружено, что при повышении скорости течения в придонном апвеллинге и в приповерхностном слое происходит вихреволновой подъем вод из придонного слоя в приповерхностный.
2. Зарегистрирована блокировка апвеллинга за счет изменения направления придонного течения, индуцированного ветровым воздействием.
3. Установлено, что зарегистрированный процесс апвеллинга обеспечивал очищение вод губы при умеренном ветре (до 5 м/с). Показано, что в период исследований взвеси приповерхностного слоя могли распространяться в открытое озеро, тогда как придонные взвеси, преимущественно, оседали на выходе из залива.

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. Самолюбов Б. И. Плотностные течения и диффузия примесей. М.: Изд. ЛКИ (УРСС). 2007. 352 с.
4. Самолюбов Б.И., Литвинов Е.А. Массообмен в озерном заливе при наличии придонного течения и внутренних сейш. Физические проблемы экологии. М.: МАКС ПРЕСС. 2008. № 15. С. 344 – 351.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И СТАНДАРТИЗАЦИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ ВТОРИЧНЫХ БИОРЕСУРСОВ РОССИИ

Т.И. Андреевко, Н.А. Рустамов, А.А. Соловьев

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

Общий выход органических отходов растительного и животного происхождения в России составляет 250 млн. т. в год, в том числе, по сельскохозяйственному сектору до 200 млн. и муниципальным отходам до 50млн. т. в год [1]. Утилизация таких объемов органических отходов превращается в серьезную экологическую проблему, требующую незамедлительного решения. К числу наиболее перспективных методов переработки органических отходов относятся современные биогазовые технологии. Биогазовые технологии получения горючего газа путем анаэробного сбраживания органических отходов метанобразующим сообществом бактерий позволяют реализовать комплексный подход к решению проблем экологии, энергетики, агрохимии сельского хозяйства и социального развития общества. Биогазовые установки в режиме когерентной генерации позволяют перерабатывать осадки сточных вод, сельскохозяйственные и твердые бытовые отходы с получением тепла и электричества. Одновременно, в результате этой переработки образуется высокоэффективное органическое удобрение, увеличивающее урожайность сельскохозяйственных культур на 30-100% по сравнению с минеральными удобрениями и необработанным навозом [2]. Существенным преимуществом метанового брожения является их способность осуществляться процесс преобразования энергии органических веществ в биогаз с относительно высоким КПД (80 - 90%). Биогаз с высокой эффективностью может быть использован как топливо с КПД в 83% или трансформирован в электрическую (КПД 33%) и тепловую (КПД 50%) энергию, он может быть использован также в двигателях внутреннего сгорания [1]. При производстве биогаза происходит эффективная очистка сточных вод - при термофильных условиях уничтожаются яйца гельминтов, патогенная микрофлора и семена сорняков, присутствующие в животноводческих и коммунально-бытовых стоках.

В настоящее время на российском биогазовом рынке работает ряд компаний, которые способны создавать когенерационные биогазовые комплексы различной мощности, способные выдерживать сложные климатические условия различных регионов страны. Но внедрение биогазовых технологий происходит медленно, сталкиваясь с рядом трудностей [6]. В первую очередь следует назвать вопросы по разработке адекватной физико-экологической и технологической обоснованности отечественных стандартов. Для упорядочения и ускорения развития биогазовой промышленности необходима разработка основополагающих государственных нормативных документов по техническому регулированию и стандартизации, обеспечивающих государственное регулирование развития отрасли, интегрирующей передовой научно-технический и производственный опыт [7,8]. В настоящей работе обсуждаются актуальные подходы к решению задачи по разработке национальных стандартов в области технологии по переработке и использованию вторичных биоресурсов

Ресурсы энергии органической составляющей осадка сточных вод Российской Федерации – 1млн. т у.т. или 1,2% от энергии всех видов биомассы. При сбраживании половины образующихся осадков можно получить 350 млн. куб. м биогаза в год или 0,3 млн. т у.т. и этим на 40-50% сократить теплоэнергетические расходы на очистные сооружения страны [3]. Биогазовые технологии представляются перспективным направлением в решении энергообеспечения и энергобезопасности нашей страны. Особенно для значительной части до 70% территории России и 30 – 35% крестьянских и фермерских хозяйств, которые не имеют устойчивого централизованного энергоснабжения. Сырье же для получения биогаза – отходы животноводства и птицеводства, растениеводства и обрабатывающей промышленности распространены повсеместно. По оценкам [4,5] эта сырьевая база в 2005 году составляла 624,2 млн. т, по энергосодержанию - 80,6 млн. т н.э.. Потенциальные возможности производства биогаза из этого сырья по существующим в России технологиям составляют 75 млрд. куб. м. (59 млн. т н.э.) в год, с использованием которого может быть получено 251 млрд. кВт час электроэнергии или 200 Ркал (10^{15} кал) тепловой энергии. Потребности в бытовой электроэнергии сельского населения России оцениваются приблизительно в треть этой величины. С помощью биогаза можно решить и проблемы моторного топлива для АПК.

С 1 января 2009 года на территории России вступил в действие первый национальный стандарт по биоэнергетике ГОСТ Р 52808-2007 «Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения» [9], разработанный сотрудниками научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии (НИЛ ВИЭ) географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова. В стандарте установлены термины и определения, относящиеся к биотехнологическим методам преобразования энергии биомассы. Самая большая система понятий, представленная в стандарте, относится к процессу метанового брожения и получению биогаза. Разработанные термины и определения раскрывают природу, технологический процесс и технические средства получения биогаза.

Как продолжение этой работы НИЛ ВИЭ совместно со специалистами Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский центр стандартизации, информации и сертификации сырья, материалов и веществ» разработали ГОСТ Р 53790-2010 «Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Общие технические требования к биогазовым установкам»

[10]. Стандарт утвержден Федеральным Агентством по техническому регулированию и метрологии 01.01.2011 года. Целью стандарта является установление общих требований к биогазовым установкам различной мощности и назначения в соответствии с новейшими разработками российских ученых.

Стандарт состоит из следующих разделов: введение, область применения, нормативные ссылки, определения, общие требования, требования безопасности, требования охраны окружающей среды и здоровья персонала, транспортирование, хранение и библиография.

Основным требованием, которое предъявляется стандартом к биогазовым установкам, является требование назначения – «Биогазовые установки должны обеспечивать переработку органических отходов (стоков животноводческих производств, растениеводства, перерабатывающей промышленности) и осадков сточных вод в биогаз с возможным преобразованием его в тепловую и электрическую

энергию, а также транспортное топливо. Наряду с биогазом эти установки должны производить высокоэффективное дорогостоящее органическое удобрение, содержащее гуминовые вещества».

Переработка отходов в метантенке биогазовой установки осуществляется в результате процесса жизнедеятельности симбиоза ряда штаммов бактерий, поэтому условия их жизнедеятельности определяют результат работы установки – количество образованного метана, скорость переработки отходов, качество удобрения. Вследствие этого в стандарте большое внимание уделяется условиям оптимальной работы биогазовой установки. Прежде всего это соблюдение анаэробных условий в метантенке, поддержание оптимальных для данной установки температурного режима и кислотно-щелочного баланса.

Стабильную работу биогазовой установки поддерживают перемешивающие и нагревающие сбрасываемую массу устройства, типы которых и требования к ним изложены в стандарте.

В соответствии с требованиями стандарта в технических условиях и эксплуатационных документах на биогазовую установку конкретного типа должны приводиться требования к перерабатываемым отходам, характеристики режима работы метантенка, ряд показателей процесса метанового брожения.

Требование к месторасположению биогазовой установки любого типа заключается в том, что она должна располагаться по возможности ближе к источникам перерабатываемого сырья (местам содержания животных, складирования отходов и т. д.), в стандарте дан ряд рекомендаций по расположению установок малой мощности, предлагающий использовать силы гравитации и солнечное тепло; учитывающий, что транспорт биогаза дешевле, чем транспортировка сырья.

Стандарт предъявляет ряд требований к конструкции биогазовой установки: метантенку, системе сбора биогаза, к трубопроводной системе биогаза, к газгольдерам. Требования стандарта направлены на обеспечение всех аспектов промышленной безопасности работы биогазовых комплексов: технологического, пожарного, экологического.

Биогаз в смеси с воздухом в пропорции от 5% до 15% при наличии источника воспламенения с температурой 600о С или более может привести к взрыву. Открытый огонь опасен при концентрациях биогаза в воздухе более 12%. Поэтому биогазовые установки представляют собой потенциально опасные производственные объекты.

Стандарт включает требования к биогазовым установкам различной мощности (от 100 кВт до десятков мегаватт), располагающихся под открытым небом или в специализированных помещениях. Вследствие этого документ не содержит детализированных требований технического характера и безопасной эксплуатации биогазовых установок. Стандарт содержит ряд требований безопасности, относящихся к установкам большой мощности, расположенных в специальных помещениях. Такие установки перерабатывают осадки сточных вод, отходы больших животноводческих комплексов, отходы производств перерабатывающей промышленности.

Согласно стандарту, работа биогазовых установок должна быть организована так, чтобы выполнялись требования охраны окружающей среды и здоровья персонала. Сырье для установок – отходы животноводства и растениеводства, осадки сточных и промышленных вод – не должны загрязнять водные ресурсы.

Следует исключить хранение отходов под открытым небом, уменьшая тем самым выбросы в атмосферу метана (парниковый газ) и загрязнение воздуха азотистыми соединениями, имеющими неприятный запах.

Необходимо соблюдать предохранительные меры для предотвращения заражения обслуживающего персонала биогазовых комплексов патогенной микрофлорой, содержащейся в осадках сточных вод и отходах сельскохозяйственного производства.

Новый документ будет полезен при разработке, проектировании и эксплуатации биогазовых установок, он послужит основой и откроет серию специализированных, детализированных стандартов как по малым биогазовым установкам индивидуального пользования, так и большим, перерабатывающим отходы крупных производств.

Можно надеяться, что национальные стандарты России, регламентирующие терминологию и технические и экологические аспекты установок биоэнергетики, послужат ускорителями процесса распространения современных технологий и внедрения передового опыта и будут способствовать развитию производства нашей страны и улучшению условий жизни её населения.

Литература

1. Панцхава Е.С., Беренгартен М.Г., Вайнштейн С.И. «Биогазовые технологии. (Проблемы экологии, энергетики, сельскохозяйственного производства)», М.: Федеральное агентство по образованию, Московский государственный университет инженерной экологии, ЗАО Центр «Экорос», 2008, 217 с.
2. Головкин А.М., Лазарчик В.Е., Черкашина Н.Ф., Лазарчик В.М. Влияние нетрадиционного органического удобрения на урожай и качество сельскохозяйственных культур, Сб. Эколого-агрохимические проблемы воспроизводства плодородия почв в современных условиях. МГУ. 2004, стр.56-61.
3. Лотош В.Е. «Фундаментальные основы природопользования». Книга 3. «Переработка отходов природопользования» Екатеринбург. Полиграфист, 2007 г., 503 с.
4. Панцхава Е.С., Шипилов М.М., Пожарнов В.А. Возможности биоэнергетики в решении энергетических проблем и проблем управления отходами в АПК России. Презентация доклада на 5-ом Международном конгрессе по управлению отходами «ВэйстТэк», май, 2007 год.
5. Панцхава Е.С., Шипилов М.М., Пауков А.П. и др. Биогазовые технологии и оборудование в России. Презентация доклада на 5-ом Международном конгрессе по управлению отходами «ВэйстТэк», май, 2007 год.
6. Чернин С. Почему в России не развивается биогазовая промышленность? - Международная биоэнергетика. №2 (19), май 2011, с.26-28.
7. Рустамов Н.А., Андрееенко Т.И., Чекарев К.В. Стандартизация и нетрадиционная энергетика - Энергия: экономика, техника, экология. №12, 2006, стр. 34-39
8. Соловьев А.А., Рустамов Н.А., Андрееенко Т.И., О стандартизации в сфере использования возобновляемых источников энергии. Компетентность. № 4-5 /75-76/, 2010, 28-29с.
9. ГОСТ Р 52808-2007 «Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения».
10. ГОСТ Р 53790-2010 «Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Общие технические требования к биогазовым установкам».

ВЛИЯНИЕ СЖИМАЕМОСТИ НА ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ
КОНВЕКТИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ПЛОСКОСТИ В НЕОДНОРОДНОЙ
ЖИДКОСТИ

В.Г. Байдулов, О.В. Щербачев

*Учреждение Российской академии наук Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского РАН
e-mail: bayd@ipmnet.ru
НИЯУ «МИФИ»
e-mail: shcherbach@yandex.ru*

Предложена теория формирования течений одно- и многокомпонентной конвекции в устойчиво стратифицированной жидкости. Поскольку на начальной фазе развития течения конвективные (нелинейные) члены уравнений движения и члены, описывающие эффекты плавучести, малы по сравнению с ускорением жидкости, построение точных решений нелинейных задач неоднородной жидкости может проводить методом разделения переменных в виде временных рядов. Общая схема нахождения решения применяется к задачам формирования течений, индуцированных диффузией на наклонной плоскости. Показано, что время перехода течения к стационарному течению существенно зависит от величины кинетического коэффициента распространения примеси и геометрии задачи. Изучен вопрос влияния эффектов концентрационной сжимаемости на структуру течения. Анализ решений, построенных в рамках полной модели сжимаемой жидкости и модели, учитывающей только концентрационное сжатие, показал, что пренебрежение зависимости плотности от давления приводит к мгновенной делокализации пограничного течения.

Исследование предельного перехода к модели несжимаемой жидкости выявило сингулярный (степенной) характер зависимости распределения давления от коэффициента изотермической сжимаемости среды, причем показатель степени оказался отличным от найденного ранее для течений, возникающих при тепловой конвекции в ограниченной области [1].

При моделировании течений в природных системах, например, в океане, традиционно используется предположение о несжимаемости жидкости, приводящее к условию бездивергентности (соленоидальности) поля скоростей течений. Наиболее просто физический смысл приближения несжимаемости можно пояснить на модели однородной идеальной двухпараметрической жидкости. Из уравнения неразрывности следует, что малые возмущения плотности в этом случае распространяются со скоростью звука, а относительная величина пульсаций оказывается пропорциональной отношению скорости пульсаций к (адиабатической) скорости звука. Следовательно, несжимаемость подразумевает малость скоростей

течения по сравнению со скоростью звука, которая при нормальных условиях в воде близка к $1.5 \cdot 10^3$ м/с.

Учет диссипации (температуопрпроводности и диффузии), которая вносит большой вклад в динамику тонкой структуры океана и пограничных течений, приводит к необходимости коррекции условия несжимаемости. Оценки показывают, что в верхнем слое океана (в слое сезонного термоклина, слое скачка) изменения солёности вносят сопоставимый вклад в изменения плотности. Так, для слоя толщиной порядка 100 м характерные изменения температуры составляют $\sim 10^\circ\text{C}$, что вызывает относительное изменение плотности за счет теплового расширения на $\sim 2 \cdot 10^{-3}$. В это же время относительное изменение плотности за счет изменения давления оказывается почти на порядок меньше: $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ (отношение прироста давления к квадрату скорости звука) [2]. Таким образом, даже в приближении несжимаемости температурные изменения могут вносить вклад в уравнение сохранения массы, и поле скоростей не будет тем самым солёноидальным.

Предполагая среду несжимаемой, т.е. пренебрегая изменением плотности за счет изменений давления, получаем из уравнений движения неоднородной жидкости оценку для величины дивергенции скорости [3, 4]

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = \alpha \chi \Delta T - \beta \kappa \Delta S \quad (1)$$

где \mathbf{v} – скорость жидкости, T – температура, S – концентрация примеси, α и β – коэффициенты температурного расширения и солевого сжатия, χ и κ – коэффициенты температуропроводности и диффузии соли.

Поскольку правая часть уравнения (1) содержит вторые производные температуры и концентрации, величина которых имеет большое значение в задачах пограничного слоя и термоконцентрационной конвекции, то, несмотря на малые значения кинетических коэффициентов, величина дивергенции скорости в несжимаемой среде в задачах пограничного слоя должна быть существенно отлична от нуля. Тем не менее, закон сохранения массы в виде условия бездивергентности широко используется для моделирования течений стратифицированной жидкости.

Ранее для течений, вызванных тепловой конвекцией в сосуде конечного объема, заполненного однородной жидкостью, был показан сингулярный вид зависимости давления, от параметра сжимаемости – безразмерного комплекса, определяемого комбинацией коэффициентов изотермического сжатия, кинематической вязкости, температуропроводности и характерным линейным размером задачи [1]. При этом вид главного члена разложения указывает на одномоментное возникновение возмущений давления во всем объеме жидкости. В данной работе анализируется влияние эффектов солевой сжимаемости на структуру течения, индуцируемого диффузией на наклонной плоскости в безграничной линейно стратифицированной изотермической жидкости. В рамках традиционных моделей было получено решение стационарной задачи [5], в последующих работах асимптотическими методами анализировалась фаза формирования течения [6] и построено формальное точное решение [7].

Постановка задачи. Рассматривается изотермическая стратифицированная по соли жидкость с уравнением состояния вида

$$\rho = \rho_0(P, S) \quad (2)$$

В океане и атмосфере плотность меняется с глубиной, обычно выделяют стратифицирующую (гидростатическую) и динамическую составляющие $\rho = \rho_0(z) + \rho'$. Распределение стратифицирующей составляющей часто моделируют в виде линейного распределения

$$\rho_0(z) = \rho_0 \left(1 - z / \Lambda_\rho\right) \quad (3)$$

Аналогично плотности могут быть введены гидростатические и динамические распределения солености и давления $P = P_0(z) + P'$, $S = S_0(z) + S'$, $\rho' = \rho'(S', P')$, при этом гидростатическое давление связано с плотностью уравнением

$$\frac{dP_0}{dz} = -g\rho_0(z)$$

Решая уравнения гидростатики относительно давления, для гидростатической составляющей получаем

$$P_0 = -g \left(z - \frac{z^2}{2\Lambda_\rho} \right)$$

Поскольку в природных системах плотность жидкости слабо отклоняется от плотности однородной жидкости, уравнение состояния может быть разложено в ряд Тейлора

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{1}{\rho_0 c^2} P + \beta S \right)$$

Выделяя в последнем соотношении стратифицирующую и динамическую составляющие, приходим к уравнению состояния вида

$$\rho = \rho_0 \left(P_0(z) + P', S_0(z) + S' \right) = \rho_{00} \left(1 + \frac{1}{\rho_0 c^2} P_0 + \beta S_0 \right)$$

Тогда из сравнения гидростатического распределение плотности с разложением уравнения состояния и учитывая выражение для гидростатического давления, можно получить стратифицирующее распределение солености

$$\beta S_0 = -\frac{z}{\Lambda_\rho} + \frac{g}{\rho_0 c^2} \left(z - \frac{z^2}{\Lambda_\rho} \right) \quad (4)$$

Учитывая, что второй член выражения (4) связан с акустико-гравитационными волнами, пренебрежем его вкладом в стратификацию. В результате оказывается, что масштаб стратификации для солености отличается от масштаба стратификации плотности только на величину коэффициента солевого сжатия $S_0 = -\frac{z}{\Lambda_S}$,

$\Lambda_\rho = \beta \Lambda_S$, а уравнение состояния имеет вид

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{z}{\Lambda_\rho} + \beta S' + \beta_T P' \right), \quad S = -\frac{z}{\Lambda_S} + \beta S' \quad (5)$$

где $\beta_T = 4,5 \cdot 10^{-5} (1/\text{атм})$ – коэффициент изотермического сжатия, $\beta = 7,5 \cdot 10^{-4} (1/\text{‰})$ – коэффициент солевого сжатия [8, 9]. Далее коэффициент солевого сжатия предполагается включенным в определение солёности.

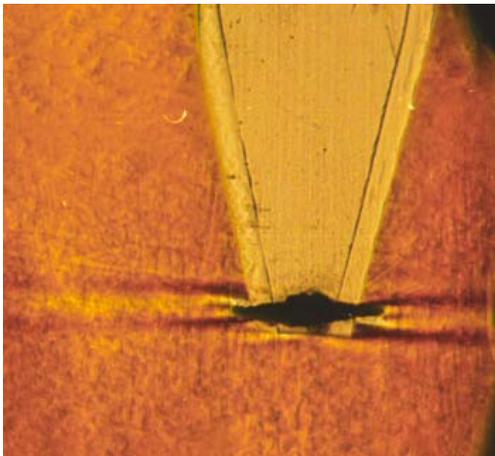


Рис. 1. Теневая картина течения, индуцированного диффузией на пластине конечной ширины.

Простейшим видом конвективных задач стратифицированной жидкости являются задачи формирования течений, индуцированных диффузией. Условие непроницаемости границы тела для соли (условие равенства нулю нормальной производной полной солёности) для возмущения солёности приводит к возникновению возмущений при любом отклонении границы тела от вертикали

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\Sigma} = \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}} \quad (6)$$

В этом случае линии равной солёности искажаются в окрестности границы тела, что приводит к нарушению гидростатического равновесия и возникновению течения. Характерный вид такого течения на горизонтальной пластине конечного размера приведен на Рис. 1.

Поскольку набегающий поток отсутствует, представляется естественным выбрать в качестве параметров обезразмеривания комбинации внутренних масштабов среды (частоты плавучести N и коэффициента диффузии κ): $t_0 = \sqrt{\kappa / N}$, $t_0 = 1 / N$, $V_0 = \sqrt{\kappa N}$, $\omega_0 = N$.

Модель несжимаемой стратифицированной жидкости. На первом шаге рассмотрим особенности формирования течения в рамках модели с солёноидальным распределением скорости. Тогда, учитывая вид уравнения состояния (5), запишем уравнения движения в переменных скорость – завихренность – возмущение солёности можно записать в виде

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_t + (\mathbf{V}\nabla)\boldsymbol{\omega} - (\boldsymbol{\omega}\nabla)\mathbf{V} &= \text{Sc} \Delta \boldsymbol{\omega} - \nabla S \times \mathbf{e}_z \\ \text{div} \mathbf{V} &= 0, \text{rot} \mathbf{V} = \boldsymbol{\omega} \end{aligned} \quad (7)$$

$$S_t + (\mathbf{V}\nabla)S = \Delta S + \mathbf{V} \cdot \mathbf{e}_z$$

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\Sigma} = \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}}, \quad \mathbf{V}|_{\Sigma} = 0, \quad S, \mathbf{V}|_{t=0} = 0 \quad (8)$$

Единственным нетривиальным условием является условие непротекания для соли, которое на малых временах приводит к формированию больших градиентов концентрации примеси в тонком слое вблизи тела. Развитие течения при этом происходит по законам диффузии, когда между первыми по времени и вторыми по пространству производными завихренности достигается баланс, а толщина слоя подстройки поля течения вблизи тела растет со временем, а скорость роста определяется числом Шмидта ($r \sim \sqrt{Sc \cdot t}$). В результате зависимые переменные можно представить в виде временных рядов, в то время, как пространственная переменная будет входить в виде автомодельной комбинации $z = r / \sqrt{t}$.

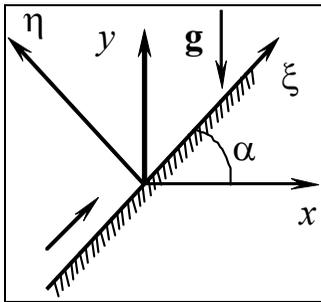


Рис. 2. Наклонная плоскость. Геометрия задачи. Лабораторная (x, y) и собственная (ξ, η) системы координат

Динамика уравнений движения при этом выглядит следующим образом: на нулевом шаге рекуррентной процедуры решается линейное уравнение диффузии, происходит коррекция поля солёности на величину необходимую для выполнения условия непротекания. В свою очередь возникшие возмущения поля солёности служат источником завихренности в первом уравнении (7). На следующем шаге рекуррентной процедуры скорость, свою очередь, выступает в качестве источника в уравнении переноса примеси. В результате решение системы уравнений движения (7) сводится на каждом шаге итерационной процедуры к решению уравнения теплопроводности с источниками.

Данная выше схема, использована для построения решения задач формирования течения, индуцированного однокомпонентной конвекцией на наклонной плоскости (Рис. 2).

В приближении Буссинеска задача оказывается инвариантной относительно сдвигов плоскости вдоль самой себя (вдоль оси ξ), в результате формирующееся течение оказывается одномерным, а возмущения солёности и скорость зависят только от нормальной к плоскости координаты и времени

$$S = S(\eta, t), \quad \mathbf{V} = U(\eta, t) \cdot \mathbf{e}_{\xi} \quad (9)$$

Уравнение неразрывности при этом выполняется тождественно, а нелинейные члены в уравнениях обращаются в нуль. Таким образом, решение линейной задачи

одновременно является и решением полной нелинейной задачи.

Тогда выбирая параметры обезразмеривания таким образом, чтобы граничные условия не содержали параметров, получаем

$$\zeta = \sqrt{\frac{N \sin \alpha}{\kappa}} \eta, \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{\kappa}{v}}, \quad t = NT \sin \alpha, \quad S = \sqrt{\frac{\kappa}{N \sin \alpha}} \frac{\cos \alpha}{\Lambda} s, \quad U = \sqrt{\kappa N \sin \alpha} \operatorname{ctg} \alpha \cdot u \quad (10)$$

В результате задача в безразмерном виде содержит единственный определяющий параметр – число Шмидта

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \zeta^2} - s, \quad \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial^2 s}{\partial \zeta^2} + u \quad (11)$$

$$u, s|_{t=0} = 0, \quad u|_{\zeta=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial s}{\partial \zeta} \right|_{\zeta=0} = 1, \quad u, s|_{\zeta \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (12)$$

Используя преобразования Лапласа, преобразуем уравнения движения к системе ОДУ (p – параметр преобразования, w и σ – образы Лапласа для скорости и возмущения солености, соответственно)

$$pw = \frac{1}{\varepsilon^2} w'' - \sigma, \quad p\sigma = \sigma'' + w \quad (13)$$

с граничными условиями

$$w|_{\zeta=0} = 0; \quad \sigma'|_{\zeta=0} = 1/p; \quad w, \sigma|_{\zeta \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (14)$$

Используя общее положение о связи временных и пространственных переменных, в пограничном слое сделаем замену

$$\chi = \sqrt{p}\zeta, \quad \sigma = p^{-3/2}h(\chi), \quad w = p^{-5/2}f(\chi) \quad (15)$$

После чего краевые условия больше уже не содержат параметра преобразования Лапласа

$$f|_{\chi=0} = 0, \quad h'|_{\chi=0} = 1, \quad f, h|_{\chi \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (16)$$

а зависимость уравнений движения от параметра p

$$h'' - h = -p^{-2}f, \quad \varepsilon^{-2}f'' - f = h \quad (17)$$

указывает на вид представления решения в пространстве образов Лапласа

$$f = \sum_{n=0}^{\infty} p^{-2n} f_n, \quad h = \sum_{n=0}^{\infty} p^{-2n} h_n \quad (18)$$

Подстановка разложений (18) в уравнения движения (17) приводит к системе рекуррентных ОДУ с постоянными коэффициентами второго порядка.

$$h_n'' - h_n = -f_{n-1}, \quad \varepsilon^{-2}f_n'' - f_n = h_n \quad (19)$$

$$h_0'|_{\chi=0} = 1, \quad f_0|_{\chi=0} = 0, \quad h_n'|_{\chi=0} = 0, \quad f_n|_{\chi=0} = 0, \quad n > 0$$

Решение такой системы на каждом шаге содержит две экспоненты, показатели которых определяются кинетическими коэффициентами переноса скорости и солености. Учитывая, что коэффициенты уравнений не содержат в явном виде

номера рекуррентной процедуры, решение (19) ищется в виде произведения полиномиальной и экспоненциальной функций

$$f_n = \sum_{k=0}^n \chi^k \left[f_{n,k}^1 \exp(-\chi) + f_{n,k}^2 \exp(-\varepsilon\chi) \right] \quad (20)$$

$$h_n = \sum_{k=0}^n h_{n,k}^1 \chi^k \exp(-\chi) + \sum_{k=0}^{n-1} h_{n,k}^2 \chi^k \exp(-\varepsilon\chi) \quad (21)$$

В результате решение задачи сводится к числовым рекуррентным соотношениям относительно коэффициентов $\{h_{n,k}^1, h_{n,k}^2\}$ и $\{f_{n,k}^1, f_{n,k}^2\}$. Детали расчета приведены [10].

Определяя по рекуррентным уравнениям значения коэффициентов разложения и обращая образы Лапласа для скорости и солености, получаем решение задачи (11, 12)

$$s = -2\sqrt{t} \operatorname{erfc}(Z) + \sum_{n=1}^{\infty} (2\sqrt{t})^{4n+1} \sum_{k=0}^n Z^k \left(h_{n,k}^1 i^{4n-k+1} \operatorname{erfc}(Z) + h_{n,k}^2 i^{4n-k+1} \operatorname{erfc}(\varepsilon Z) \right) \quad (22)$$

$$u = \sum_{n=0}^{\infty} (2\sqrt{t})^{4n+3} \sum_{k=0}^n Z^k \left(f_{n,k}^1 i^{4n-k+3} \operatorname{erfc}(Z) + f_{n,k}^2 i^{4n-k+3} \operatorname{erfc}(\varepsilon Z) \right) \quad (23)$$

где $Z = \zeta / 2\sqrt{t}$, $h_{n,n}^2 = 0$, а $i^n \operatorname{erfc}(z)$ – n -кратный интеграл вероятности [11].

На рис. 3 прослежена эволюция профиля скорости течения, индуцированного диффузией на наклоненной на угол 45° к горизонту плоскости (расчеты проведены для раствора поваренной соли в воде). На начальной фазе развития течения профиль скорости, определяемый с высокой точностью первыми членами ряда (23), знакопостоянен и растет пропорционально $t^{3/2}$. При временах превышающих период плавучести действие сил Архимеда приводит к появлению противотечения, темп роста амплитуды скорости замедляется, и профиль скорости монотонно приближается к профилю стационарного течения [5]

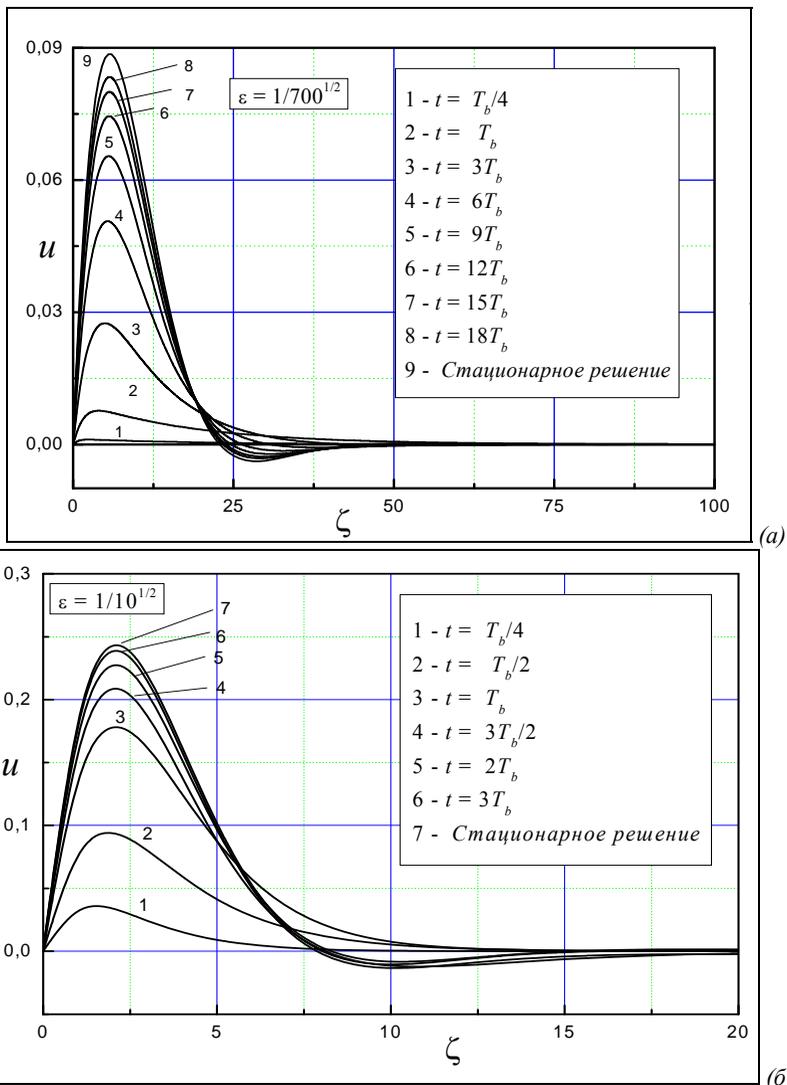


Рис. 3. Эволюция профилей скорости течения, индуцированного диффузией на наклонной плоскости для различных значений числа Шмидта ($Sc = \varepsilon^{-2}$)
 (а) $\varepsilon = 1/\sqrt{700}$ – характерное значение для солевой стратификации,
 (б) $\varepsilon = 1/\sqrt{10}$ – характерное значение для температурной стратификации.

$$u(\zeta) = \sqrt{2\varepsilon} \exp\left(-\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}\zeta\right) \sin\left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}\zeta\right), \quad s(\zeta) = -\sqrt{\frac{2}{\varepsilon}} \exp\left(-\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}\zeta\right) \cos\left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}\zeta\right).$$

Кроме того, на малых временах масштаб затухания возмущений солёности определяется коэффициентом диффузии, а скорости – коэффициентом кинематической вязкости (см., например [6]), в результате пограничный слой распадается на два подслоя плотностной и скоростной. Однако с течением времени происходит согласование масштабов пространственной динамики возмущений различной природы и образуется единый пограничный слой, толщина которого определяется комбинационным масштабом длины ($l_c = (4\nu_k / N^2 \sin^2 \alpha)^{1/4}$).

Проведенные расчеты показали существенную зависимость времени выхода на стационарное решение от величины отношения кинетических коэффициентов задачи ε . Так для солевой стратификации (большое число Шмидта) профиль скорости медленно меняется со временем и приближается к стационарному только на временах порядка двадцати периодов плавучести. Эволюция течения при температурном типе стратификации происходит значительно интенсивнее, и течение становится практически стационарным на временах порядка трех периодов плавучести.

Отдельный интерес представляет зависимость времени выхода на стационарный режим течения от угла наклона. Приведенные на Рис. 3 зависимости и сделанный выбор параметра обезразмеривания для времени (10), а также отсутствие зависимости от угла наклона уравнений движения (11) и граничных условий (12) записанных в безразмерной форме, показывает что время выхода на стационарное решение, как и любое другое характерное время задачи, можно представить в виде

$$T_{cmax} = t_0 / N \sin \alpha,$$

где параметр $t_0 = t_0(\varepsilon)$ определяется отношением кинетических коэффициентов задачи.

Модель сжимаемой стратифицированной жидкости. Спецификой данной постановки является учет вклада солевой сжимаемости в уравнении неразрывности, которое приводит к появлению нормальной компоненты скорости, в результате формирующееся течение оказывается двумерным, и зависимые переменные имеют вид

$$S = S(\eta, t), \quad P = P(\eta, t), \quad \mathbf{V} = U(\eta, t) \cdot \mathbf{e}_\xi + V(\eta, t) \cdot \mathbf{e}_\eta \quad (24)$$

Уравнение неразрывности при этом уже не выполняется тождественно, и задача становится нелинейной, а начальные и граничные условия записываются как

$$u, v, S|_{t=0} = 0, \quad u, v|_{\eta=0} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial \eta}|_{\eta=0} = \frac{1}{\Lambda} \cos \alpha, \quad u, v, S|_{\eta \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (25)$$

Тогда в безразмерных переменных (коэффициент диффузии соли $\kappa \approx \nu / 700 = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2 / \text{с}$, $\zeta = 3\nu$)

$$\eta_n = \sqrt{\frac{N \sin \alpha}{\kappa}} \eta_0, \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{\kappa}{\nu}}, \quad t = NT \sin \alpha, \quad S = \sqrt{\frac{\kappa}{N \sin \alpha}} \frac{\cos \alpha}{\Lambda} s, \\ u = \sqrt{\kappa N \sin \alpha} \operatorname{ctg} \alpha \cdot U, \quad P_0 = \rho_0 \kappa N \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \quad (26)$$

уравнения движения принимают вид

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} - S \\ \frac{dV}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial \eta} + \frac{a^2}{\varepsilon^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \eta^2} - S \operatorname{ctg} \alpha \quad (27) \\ \frac{dS}{dt} - (V \cdot \operatorname{ctg} \alpha + U) + A_P \frac{dP}{dt} = -A_V \frac{\partial V}{\partial \eta} \\ \frac{dS}{dt} = \frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2} + (V \cdot \operatorname{ctg} \alpha + U)$$

где

$$a^2 = \frac{4}{3} + \frac{\zeta}{\nu}, \quad A_P = \rho_0 \beta_T g \sqrt{\frac{\kappa \sin \alpha}{N}}, \quad A_V = \rho_0 \beta_T g \sqrt{\frac{\kappa \sin \alpha}{N}} \operatorname{tg}^2 \alpha \sim 10^{-10} \operatorname{tg}^2 \alpha \sqrt{\sin \alpha}.$$

При этом параметры обезразмеривания выбраны таким образом, чтобы граничные условия от параметров не зависели

$$U, V, S|_{\eta=0} = 0, \quad U, V|_{\eta=0} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} = 1, \quad U, V, S|_{\eta \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (28)$$

Тогда оказывается, что задача содержит два безразмерных комплекса, оценки величин которых, сделанные для характерных значений частот плавучести и среды с солевой стратификацией, дают

$$A_V = \frac{g}{\sqrt{\kappa N^3 \sin \alpha}} \sim 3 \cdot 10^5 (\sin \alpha)^{-1/2}, \quad \beta_T = 4,5 \cdot 10^{-5} (1 / \text{атм}), \quad (29)$$

Анализ третьего уравнения системы (27) (уравнения неразрывности) при переходе к несжимаемой жидкости ($\frac{\partial p}{\partial P} = 0$, $A_P = 0$) показывает, что существует связь между пространственными сдвигами нормальной компоненты скорости и градиентом солёности. Тогда, учитывая граничные условия на плоскости можно получить соотношение

$$V = \frac{1}{A_V} \left(1 - \frac{\partial S}{\partial \zeta} \right) \quad \forall t: \quad \zeta \rightarrow \infty: \quad V \rightarrow \frac{1}{A_V} \quad W = V + \frac{1}{A_V} \frac{\partial S}{\partial \zeta} \quad (30)$$

из которого следует невозможности одновременно удовлетворить условиям обращения в нуль полной солёности и затухания всех возмущений на бесконечности. Причем, поскольку соотношение (30) должно быть выполнено для всех моментов времени, то учет эффектов концентрационной сжимаемости приводит к мгновенной делокализации пограничного течения. Величина скорости на больших рас-

стояниях от плоскости постоянна и определяется параметром A_V^{-1} , который в рамках модели с соленоидальным распределением скорости положен равным нулю. В силу большой величины параметра A_V такое упрощение выглядит естественным. Однако в силу экспоненциального затухания решения (22, 23) уже на достаточно небольших расстояниях от границы основной вклад в поля возмущений будет определяться эффектами сжимаемости.

Причину мгновенного возникновения конечной величины скорости на бесконечности можно объяснить сингулярным характером предельного перехода к несжимаемой жидкости, в рамках которой скорость распространения возмущений – скорость звука оказывается бесконечной. Таким образом решение задачи в рамках модели сжимаемой жидкости можно рассматривать как задачу о возникновении звукового предвестника конвективных течений в неоднородных жидкостях.

Поведение основных характеристик установившегося течения может быть получено исходя из решения характеристического уравнения, возникающего при решении линеаризованных уравнений движения

$$\{U, V, S\} \sim \exp(k\eta) : k^2 \left(\frac{\varepsilon}{a}\right)^2 \left\{ (k^4 + \varepsilon^2) A_V - k^3 \operatorname{ctg} \alpha \right\} = 0 \quad (31)$$

Уравнение (31) имеет четыре однократных корня близких (в силу большого значения параметра A_V) по значению к корням, возникающим в модели бездивергентной жидкости, когда возмущения затухают на комбинационном масштабе длины, величина которого зависит от значений кинетических коэффициентов диффузии соли и вязкости, а также характерных значений частоты плавуемости

$$k_{3...6} = (\pm 1 \pm i) \sqrt{\frac{\varepsilon}{2}} \left(1 + O\left(A_V^{-1}\right) \right)$$

Нулевые кратные корни $k_{1,2} = 0$ указывают на существенное изменение структуры решения при учете эффектов сжимаемости.

Проследить за процессом формирования течения позволяет решение нестационарной задачи. В линейном приближении нестационарные уравнения движения вместе с граничными условиями в образах Лапласа имеют вид

$$\begin{aligned} pU &= \frac{1}{\varepsilon^2} U'' - S \\ pV &= -P' + \frac{a^2}{\varepsilon^2} V'' - S \operatorname{ctg} \alpha \end{aligned} \quad (32)$$

$$pS - (V \cdot \operatorname{ctg} \alpha + U) + A_P pP = -A_V v'$$

$$pS = S'' + (V \cdot \operatorname{ctg} \alpha + U)$$

граничные условия

$$S'(0) = 1/p, \quad U(0) = V(0) = 0.$$

Здесь p – параметр преобразования Лапласа

Будем искать решение задачи (32) в виде разложения для малых времен ($p \gg 1$). Поскольку в начальный момент жидкость покоилась, а единственным

источником движения является поток возмущения солености на границе плоскости, то в нулевом приближении решается уравнение диффузии

$$S_0 = \frac{1}{p^{3/2}} \exp(-\sqrt{p}\eta) \quad (33)$$

Вид решения (33) подсказывает, что параметром разложения зависимых функций задачи должен быть \sqrt{p} , а для независимой переменной надо сделать замену.

$$x = \sqrt{p}\eta \quad (34)$$

После замены переменных (34) задача (33) примет вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon^2} U'' - U - \frac{1}{p} S &= 0 \\ \frac{a^2}{\varepsilon^2} V'' - V - \frac{1}{\sqrt{p}} P' - \frac{1}{p} S \operatorname{ctg} \alpha &= 0 \end{aligned} \quad (35)$$

$$S + A_P P = -\frac{1}{\sqrt{p}} A_V V' + \frac{1}{p} (V \cdot \operatorname{ctg} \alpha + U)$$

$$S'' - S = -\frac{1}{p} (V \cdot \operatorname{ctg} \alpha + U)$$

$$S'(0) = 1/p^{3/2}, \quad U(0) = V(0) = 0$$

Используя далее замену переменных

$$S = p^{-3/2} \sigma, \quad P = p^{-3/2} f, \quad V = p^{-2} v, \quad U = p^{-5/2} u \quad (36)$$

приходим к системе

$$\begin{aligned} 1. \quad \sigma'' - \sigma &= -\frac{1}{p^{3/2}} v \cdot \operatorname{ctg} \alpha - \frac{1}{p^2} u \\ 2. \quad A_P f &= -\sigma - \frac{1}{p} A_V v' + \frac{1}{p^{3/2}} v \cdot \operatorname{ctg} \alpha + \frac{1}{p^2} u \end{aligned} \quad (37)$$

$$3. \quad \frac{a^2}{\varepsilon^2} v'' - v = f' + \frac{1}{p^{1/2}} \sigma \operatorname{ctg} \alpha$$

$$4. \quad \frac{1}{\varepsilon^2} u'' - u = \sigma$$

Подстановка в систему (37) разложения решения в виде рядов

$$(\sigma, f, u, v) = \sum_{n=0} (\sigma_n(x), f_n(x), u_n(x), v_n(x)) p^{-n/2} \quad (38)$$

приводит к рекуррентным соотношениям для коэффициентных функций разложений

1. $\sigma_n'' - \sigma_n = -v_{n-3} \cdot \text{ctg } \alpha - u_{n-4}$
2. $A_P f_n = -\sigma_n - A_P v_{n-2}' + v_{n-3} \cdot \text{ctg } \alpha + u_{n-4}$ (39)
3. $\frac{a^2}{\varepsilon^2} v_n'' - v_n = f_n' + \sigma_{n-1} \text{ctg } \alpha$
4. $\frac{1}{\varepsilon^2} u_n'' - u_n = \sigma_n$

Граничные условия на плоскости при этом имеют вид

$$\sigma_0'(0) = 1, \quad \sigma_n'(0) = 0, \quad n = 1, 2, \dots, \quad u_n(0) = v_n(0) = 0, \quad n = 0, 1, \dots \quad (40)$$

Общую динамику задачи (39, 40) можно пояснить следующим образом. Нетривиальное граничное условие для производной солёности (40) на первом шаге порождает возмущение солёности в первом уравнении системы (39), которое, в свою очередь, приводит в уравнении неразрывности к возникновению динамической составляющей в поле давления. Нормальная компонента скорости, в отличие от тангенциальной компоненты, оказывается связанной не только с силами плавучести, но и с градиентом давления. Определяя выражения для нулевых коэффициентов функций в образах Лапласа

$$\sigma_0 = -\exp(-x), \quad f_0 = A_P^{-1} \exp(-x), \quad v_0 = \frac{\varepsilon^2}{a^2 - \varepsilon^2} A_P^{-1} \left[\exp(-x) - \exp\left(-\frac{\varepsilon}{a} x\right) \right]$$

$$u_0 = \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon^2} \left[\exp(-\varepsilon x) - \exp(-x) \right] \quad (41)$$

и возвращаясь к исходным переменным, имеем

$$S_0 = -2\sqrt{t} \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta}{2\sqrt{t}}\right) \quad (42)$$

$$P_0 = 2A_P^{-1} \sqrt{t} \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta}{2\sqrt{t}}\right) \quad (43)$$

$$V_0 = \frac{4\varepsilon^2 t}{a^2 - \varepsilon^2} A_P^{-1} \left[i^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta}{2\sqrt{t}}\right) - i^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{\varepsilon\eta}{2a\sqrt{t}}\right) \right] \quad (44)$$

$$U_0 = \frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon^2} (4t)^{3/2} \left[i^3 \operatorname{erfc}\left(\frac{\varepsilon\eta}{2\sqrt{t}}\right) - i^3 \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta}{2\sqrt{t}}\right) \right] \quad (45)$$

показывают, что возмущения солёности и давления монотонно растут со временем, профили скоростей имеют вид струй. При этом затухание возмущений солёности и давления происходит на диффузионном масштабе длины, тангенциальной составляющей скорости на вязком, а затухание нормальной компоненты скорости определяется комбинацией первой и второй вязкостей, а сам масштаб имеет наибольшее значение. Кроме того в нулевом приближении выражения для возмущений солёности (42) и тангенциальной компоненты скорости (45) совпадают с аналогичными выражениями из решения задачи несжимаемой жидкости [7]. Возмущения давления и нормальной компоненты скорости возникают из-за эффектов сжимаемости и отвечают специфике данной постановки отличной от ранее рассмотренных.

Поскольку времена, на которых для оценки решения можно использовать нулевое приближение, крайне малы, необходимо построить общие рекуррентны соотношения для коэффициентных функций разложения (38). Подставляя в систему (39) выражения для коэффициентных функций вида

$$\{\sigma_n, f_n, v_n, u_n\} = \left[\begin{array}{l} \left\{ \sigma_n^1, f_n^1, v_n^1, u_n^1 \right\} \exp(-x) + \\ + \left\{ \sigma_n^2, f_n^2, v_n^2, u_n^2 \right\} \exp(-\varepsilon x) \\ + \left\{ \sigma_n^3, f_n^3, v_n^3, u_n^3 \right\} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{a} x\right) \end{array} \right] \quad (46)$$

и анализируя рекуррентные уравнения (здесь функции, стоящие перед экспонентами являются полиномами), получаем общие выражения для полиномиальных функций.

Первый показатель экспоненты $\lambda_1 = 1$

$$\left\{ \sigma_n^1, f_n^1, v_n^1, u_n^1 \right\} = \sum_{m=0}^{\lfloor n/3 \rfloor} \left\{ \sigma_{n,m}^1, f_{n,m}^1, v_{n,m}^1, u_{n,m}^1 \right\} x^m, \quad n = 3, 4, \dots$$

Здесь $\lfloor n \rfloor$ – целая часть числа ($\lfloor 2/3 \rfloor = 0$). Выражения для начальных членов ($n = 0, 1, 2$) должны быть получены в явном виде.

Второй показатель экспоненты $\lambda_2 = \varepsilon$

$$v_n^2 = \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{n}{4} \rfloor - 1} v_{n,m}^2 x^m, \quad n = 4, 5, \dots$$

$$\sigma_{4n}^2 = \sum_{m=0}^{n-1} \sigma_{4n,m}^2 x^m, \quad n = 1, 2, \dots, \quad \sigma_{4n+1}^2 = \sum_{m=0}^{n-2} \sigma_{4n+1,m}^2 x^m, \quad n = 2, 3, \dots$$

$$\sigma_{4n+2}^2 = \sum_{m=0}^{n-2} \sigma_{4n+2,m}^2 x^m, \quad n = 2, 3, \dots, \quad \sigma_{4n+3}^2 = \sum_{m=0}^{n-1} \sigma_{4n+3,m}^2 x^m, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$f_{4n}^2 = \sum_{m=0}^{n-1} f_{4n,m}^2 x^m, \quad n = 1, 2, \dots, \quad f_{4n+1}^2 = \sum_{m=0}^{n-2} f_{4n+1,m}^2 x^m, \quad n = 2, 3, \dots$$

$$f_{4n+2}^2 = \sum_{m=0}^{n-1} f_{4n+2,m}^2 x^m, \quad n = 1, 2, \dots, \quad f_{4n+3}^2 = \sum_{m=0}^{n-1} f_{4n+3,m}^2 x^m, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$u_{4n}^2 = \sum_{m=0}^n u_{4n,m}^2 x^m, \quad n = 0, 1, \dots, \quad u_{4n+1}^2 = \sum_{m=0}^{n-1} u_{4n+1,m}^2 x^m, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$u_{4n+2}^2 = \sum_{m=0}^{n-1} u_{4n+2,m}^2 x^m, \quad n = 1, 2, \dots, \quad u_{4n+3}^2 = \sum_{m=0}^n u_{4n+3,m}^2 x^m, \quad n = 0, 1, \dots$$

Третий показатель экспоненты $\lambda_2 = \varepsilon / a$

$$\{\sigma_n^3, u_n^3\} = \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{n-1}{2} \rfloor - 1} \{\sigma_{n,m}^3, u_{n,m}^3\} x^m, \quad n = 3, 4, \dots; \quad f_n^3 = \sum_{m=0}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor - 1} f_{n,m}^3 x^m, \quad n = 2, 3, \dots$$

$$v_n^3 = \sum_{m=0}^{\lfloor n/2 \rfloor} v_{n,m}^3 x^m, \quad n = 0, 1, \dots \quad (\text{период } 3)$$

Подставляя в соотношения (35) решение задачи в виде

$$\{\sigma_n, f_n, v_n, u_n\} = \sum_{j=1}^3 \{\sigma_n^j, f_n^j, v_n^j, u_n^j\} \exp(-\lambda_j x), \quad \lambda_j = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} = \left\{1, \varepsilon, \frac{\varepsilon}{a}\right\}$$

получаем соотношения, для полиномиальных функций $\{\sigma_n^j, f_n^j, v_n^j, u_n^j\}$

$$L_1^j \sigma_n^j = -v_{n-3}^j \operatorname{ctg} \alpha - u_{n-4}^j$$

$$A_p f_n^j = -\sigma_n^j - A_v \left[v_{n-2}^j - \lambda_j v_{n-2}^j \right] + v_{n-3}^j \operatorname{ctg} \alpha + u_{n-4}^j$$

$$L_3^j v_n^j = f_n^{j'} - \lambda_j f_n^j + \sigma_{n-1}^j \operatorname{ctg} \alpha$$

$$L_2^j u_n^j = \sigma_n^j$$

где $L_m^j f_n^j = \lambda_m^{-2} \left[f_n^{j''} - 2\lambda_j f_n^{j'} + (\lambda_j^2 - \lambda_m^2) f_n^j \right]$.

Рекуррентные соотношения, следующие из граничных условий

$$-\lambda_1 \sigma_{n0}^1 + \sigma_{n1}^1 - \lambda_2 \sigma_{n0}^2 + \sigma_{n1}^2 - \lambda_3 \sigma_{n0}^3 + \sigma_{n1}^3 = 0, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$u_{n,0}^1 + u_{n,0}^2 + u_{n,0}^3 = v_{n,0}^1 + v_{n,0}^2 + v_{n,0}^3 = 0, \quad n = 0, 1, \dots$$

Для вывода общих рекуррентных уравнений выражения для начальных членов ($n = 0, 1, 2, 3$) разложения необходимо получить в явном виде.

Таблица 1. Начальные коэффициенты разложений

n	$\lambda_1 = 1$	λ_2	λ_3
$n = 0$	$\sigma_{00}^1 = -\lambda_1^{-1}, f_{00}^1 = \lambda_1^{-1} A_P,$ $v_{00}^1 = A_P^{-1} \frac{\lambda_3^2}{\lambda_3^2 - \lambda_1^2},$ $u_{00}^1 = \frac{1}{\lambda_1} \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}.$	$\sigma_0^2 = 0, f_0^2 = 0,$ $v_0^2 = 0, u_{00}^2 = -u_{00}^1.$	$\sigma_0^3 = 0, f_0^3 = 0$ $v_{00}^3 = -v_{00}^1, u_0^3 = 0.$
$n = 1$	$\sigma_1^1 = 0, f_1^1 = 0,$ $v_{10}^1 = -\frac{\text{ctg} \alpha}{\lambda_1} \frac{\lambda_3^2}{\lambda_1^2 - \lambda_3^2}, u_1^1 = 0.$	$\sigma_1^2 = 0, f_1^2 = 0,$ $v_1^2 = 0,$ $u_1^2 = 0.$	$\sigma_1^3 = 0, f_1^3 = 0,$ $v_{10}^3 = -v_{10}^1, u_1^3 = 0.$
$n = 2$	$\sigma_2^1 = 0, f_{20}^1 = \frac{A_P \lambda_3^2 \lambda_1}{A_P^2 (\lambda_1^2 - \lambda_3^2)}.$	$\sigma_2^2 = 0, f_2^2 = 0,$	$\sigma_2^3 = 0,$ $f_{20}^3 = \frac{A_P \lambda_3^3}{A_P^2 (\lambda_1^2 - \lambda_3^2)}$

Дальнейший анализ позволяет построить рекуррентные соотношения для числовых коэффициентов разложения, которые здесь для краткости не приводятся. Решение задачи в конфигурационном пространстве можно записать в виде

$$\{S, P, U, V\} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^3 \{S_{k,n}, P_{k,n}, V_{k,n}, U_{k,n}\}$$

$$S_{k,n} = (2\sqrt{t})^{n+1} \sum_{m=0}^{\infty} \sigma_{n,m}^k Z^m \cdot i^{n+1-m} \text{erfc}(\lambda_k Z)$$

$$V_{k,n} = (2\sqrt{t})^{n+2} \sum_{m=0}^{\infty} v_{n,m}^k Z^m \cdot i^{n+2-m} \text{erfc}(\lambda_k Z)$$

$$P_{k,n} = (2\sqrt{t})^{n+1} \sum_{m=0}^{\infty} f_{n,m}^k Z^m \cdot i^{n+1-m} \text{erfc}(\lambda_k Z)$$

$$U_{k,n} = (2\sqrt{t})^{n+3} \sum_{m=0}^{\infty} u_{n,m}^k Z^m \cdot i^{n+3-m} \text{erfc}(\lambda_k Z)$$

Предельный переход к несжимаемой жидкости можно проанализировать асимптотическими методами, используя разложения по малому параметру сжимаемости A_P . Поскольку предельный переход к несжимаемой жидкости является сингулярным, введем нормировку пространственно временных переменных задачи

$$t = \tau A_P, \quad \zeta = z \sqrt{A_P} \tag{47}$$

После чего уравнения движения и граничные условия для возмущения солености примут вид

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - A_P S$$

$$\frac{dV}{d\tau} = -\sqrt{A_P} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{a^2}{\varepsilon^2} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - A_P S \operatorname{ctg} \alpha \quad (48)$$

$$\frac{dS}{d\tau} = \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + A_P (V \cdot \operatorname{ctg} \alpha + U)$$

$$\left. \frac{\partial S}{\partial z} \right|_{z=0} = \sqrt{A_P} \quad (49)$$

Тогда решение задачи (48, 49) можно записать в виде рядов по параметру A_P

$$P = \frac{1}{\sqrt{A_P}} \sum A_P^{\frac{n}{2}} P_n, \quad S = \sqrt{A_P} \sum A_P^{\frac{n}{2}} S_n, \quad U = A_P^{3/2} \sum A_P^{\frac{n}{2}} U_n, \quad V = \sum A_P^{\frac{n}{2}} V_n \quad (50)$$

Вид разложений (50) указывают на сингулярную зависимость поля давления от параметра сжимаемости среды. Причем в отличие от работы [1], где давление обратно пропорционально параметру сжимаемости, в течениях, индуцированных диффузией $P \sim 1/\sqrt{A_P}$. Кроме того, все коэффициенты разложений (50) оказываются зависимыми от пространственной координаты так, что на бесконечности выполняется условие затухания возмущений. Таким образом учет эффектов сжимаемости приводит к регуляризации решения и делает постановку задачи, записанной с условием затухания всех возмущений на бесконечности, разрешимой.

В результате проведенного анализа разработана техника построения точных решений задач формирования течения, индуцированного диффузией в сжимаемой непрерывно стратифицированной жидкости. В рамках модели с соленодальным полем скорости показано, что время выхода на предел больших времен существенно зависит от величины кинетического коэффициента распространения примеси, а величина характерного времени зависит от геометрии задачи и обратно пропорциональна эффективной частоте плавучести ($N_{\phi} = N \sin \alpha$).

Для задач, учитывающих тонкие эффекты теплопроводности и диффузии, показана необходимость замены условия бездивергентности скорости течения, на более общее уравнение, следующее из уравнения неразрывности, которое учитывает сжимаемость среды. Учет эффектов солевой сжимаемости приводит на больших временах к существенному изменению структуры течения и к делокализации пограничного слоя. На малых временах пограничное течение распадается на три подслоя разной толщины, масштабы которых определяются коэффициентами диффузии соли – для пограничного слоя примеси и давления), 1-й кинематической вязкости – тангенциальной компоненты скорости, комбинации 1-й и 2-й кинематической вязкости – нормальной компоненты скорости.

Следует отметить, что рассмотрение процесса формирования течения вместе с использованием предложенных разложений дают возможность решать и нелинейные задачи теории стратифицированных течений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-01-00562.

Литература

1. Пухначев В.В. Иерархия моделей в теории конвекции // Записки научных семинаров ПОМИ, 2002, Т. 288, С. 152 – 177.
2. Океанология. Физика океана Т.1 Гидрофизика океана под ред. В.М. Каменковича, А.С. Моница – М.: Наука, 1978, 455 с.
3. Васильев О.Ф. и др. Стратифицированные течения // Итоги науки и техники. Гидромеханика. Т.8, М., 1975. С.74–131.
4. Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д. Групповой анализ частично симметризованной формы системы уравнений свободной термоконцентрационной конвекции // Препринт ИПМ РАН №539, М. 1994. 40с.
5. Phillips O.M. On flows induced by diffusion in a stably stratified fluid. // Deep-Sea Res., 1970. V. 17. № 3. P. 435 – 443.
6. Standing R.G. The Rayleigh problem for a slightly diffusive density-stratified fluid // J. Fluid Mech., 1971. V. 48. Pt. 4. P. 673 – 688.
7. Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д. Структура нестационарного пограничного течения на наклонной плоскости в непрерывно стратифицированной среде // ПММ, 1993. Т. 57. Вып. 4. С. 50 – 56.
8. Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М. Морская вода. Справочное руководство. – М.: Наука, 1979. 328 с.
9. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976, 1008 с.
10. Байдулов В.Г. Основные модели динамики неоднородной жидкости и приближение несжимаемости // в сборнике “Физические проблемы экологии (Экологическая физика)” №16, 2010, С. 7 – 24. ISBN 978-5-317-03069-8.
11. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица, И. Стигана. – М.: Наука. 1979. 830 с.

ЭКОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИМПЕРАТИВ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ МИРА

М.Ю. Берёзкин

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

Как известно, каждому технологическому укладу в терминах циклов Кондратьева соответствует свой базовый энергоноситель. До Первой промышленной революции (кон. XVIII в.) это была энергия воды и ветра, затем – уголь, нефть. Еще в 1970-е годы преобладало оптимистичное мнение о скором замещении нефти ядерной энергией, в которой наблюдался тогда экспоненциальный рост. Но известные трагические события с авариями АЭС показали реальные риски и несовершенство ядерных энергетических технологий. Атомная энергетика не стала базовой энергетической технологией. «Спрос на экологию» стал доминирующим при разработке той или иной технологии.

Следует отметить, что углеводородная энергетика за многие десятилетия развития практически достигла предельного уровня технологического совершенствования. Пик ее роста уже давно позади, технологии отработаны, увеличивать их эффективность все труднее. Вряд ли следует ожидать инновационного прорыва там, где основные техноогические принципы существуют почти столетие.

Существует и другой аспект – ресурсный. Из-за исчерпание староосваиваемых месторождений необходимо вовлекать новые, находящиеся в более труднодоступных местах. Стоимость инвестиционных проектов на добычу и транспортировку нефти и газа в среднем увеличиваются в три-четыре раза за десятилетие в расчете на единицу топлива [4].

Если в индустриальную эпоху главный экономический вектор был направлен на крупномасштабное производство, укрупнение предприятий, то в эпоху постиндустриальной экономики интенсивно развиваются не требующие больших издержек малые производства. В отличие от индустриальной экономики новые технологические решения не требуют огромного количества невозобновляемых природных ресурсов и энергии. Да, в тех странах, как, например, в Китае и Индии, где развивается индустриальная экономика, требуется поддерживать рост потребления энергии, и без углеводородной и атомной энергетики обойтись нельзя (и тут нельзя не согласиться с выводами на стр. 107-110 Гордиенко В.А. и др.). Но тогда, когда рост производства и потребления энергии остановился, как в развитых странах, не столь важно становится получать как можно больше энергии. Ресурсо- и энергосбережение стало не только экологическим, но и экономическим фактором постиндустриального развития. Структура мировой энергетики стала сильно диверсифицирована. В настоящее время можно констатировать, что в ближайшее десятилетие базового энергоносителя, который был присущ для предыдущих технологических укладов, не будет. Энергобаланс между основными энергоносителями (уголь, нефть, газ) будет паритетным. Ситуация с разукрупнением производства в мировой энергетике, углублением диверсификации стала действенным стимулом для развития возобновляемой энергетики [3].

Современный технологический уровень развития возобновляемой энергетики соответствует восходящей фазе инновационного цикла, когда неуклонно происходит снижение издержек. Что касается положения дел в солнечной энергетике, то стоимость электричества, вырабатываемого за счет энергии солнца, динамично падает. Если в конце 1960-х гг. стоимость фотоэлектрической панели составляла около \$100 тыс. на киловатт мощности, то в настоящее время стоимость колеблется в \$2-3 тыс. за кВт/ч установленной мощности [6]. Рентабельность солнечной энергетики резко выросла. Принципиальным ограничением для снижения является высокая стоимость кремния солнечного качества - 40-100 \$/кг. Поэтому создание новых технологий получения кремния, обеспечивающих радикальное - на порядок - снижение его стоимости, является задачей номер один. Ситуацию с солнечным кремнием можно сравнить с ситуацией с алюминием после его открытия в 1825 г., когда он стоил как серебро и использовался для украшений. Только после разработки технологии электролиза в 1886 г. алюминий стал дешевым и доступным материалом.

В настоящее время солнечный кремний с чистотой 99,99% стоит столько же, сколько уран для АЭС, хотя содержание кремния в земной коре превышает содержание урана в 100 тыс. раз. Урановый топливный цикл значительно сложнее и опаснее хлорсиланового способа получения солнечного кремния. Учитывая рассеянность и малое содержание урана в земной коре по сравнению с кремнием, трудно понять, почему урановое топливо для ядерных реакторов и кремний для солнечных электростанций имеют одинаковую стоимость. Существуют несколько причин, объясняющих такую ситуацию. В развитие технологии и производства урана вложены миллиардные средства, которые выделялись, в основном, по военным программам и объемы производства урана в 6 раз превышают объемы производства солнечного кремния.

Хлорсилановая технология производства солнечного кремния, разработанная около 40 лет назад, до настоящего времени практически не изменилась, сохранив все отрицательные черты химических технологий 1960-х годов: высокая энергоемкость, низкий выход кремния, экологическая опасность. Экологические ограничения, нарастающие в последующие десятилетия, не представляли возможным пользоваться этой технологией.

С 1970-х годов в СССР, Германии и США проводились исследования по созданию технологий получения кремния, исключаяющих хлорсилановый цикл. В конце 1980-х годов немецкие и американские компании сообщили о завершении разработки технологии получения солнечного кремния карботермическим восстановлением особо чистых кварцитов. В 1990 г. КПД лабораторных образцов из солнечного кремния по этой технологии стала сравнима с элементами из хлорсиланового кремния. Новая технология производства кремния основана на методе прямого восстановления из природно-чистых кварцитов. В новой технологии химические методы заменены на экологически приемлемые электрофизические методы.

Кроме разработки экологически чистых технологий, ведется поиск увеличения КПД фотопреобразования. Большинство продаваемых сегодня серийных моделей солнечных панелей имеют КПД в диапазоне от 14 до 24%. На сегодня многие лаборатории мира уже сообщили о достижении ими КПД прямого преобразования солнечной энергии в электрическую в 34-45%. Если данные по эффективности верны, то солнечную энергетику ожидает большой «рывок вперед». Весьма

перспективными являются фотоэлектрические элементы представляющие собой квантовые и наноструктуры. Разработаны легчайшие тонкопленочные фотоэлектрические элементы, которые могут наноситься даже на ткани, существуют проекты оконного стекла с функциональностью фотоэлемента. В основном это достигнуто за счет создания каскадных гетерогенных структур. По мнению академика Ж.И. Алферова для многопереходных фотоэлементов, состоящих из нескольких десятков каскадов, предельный КПД составляет почти 87% [2]. По сравнению со всеми другими видами производства электроэнергии солнечная обладает наибольшим потенциалом долгосрочного роста. Создание новой энергетической базы никогда не обходилось дешево. Колоссальные средства были вложены при разработке, создании, распределения и потребления углеводородной электроэнергетики на начальном этапе развития. Без национальных программ создания ядерного оружия не были бы построены первые атомные станции. По мнению все того же академика Ж.И. Алферова солнечная фотоэлектроэнергетика тоже возникла не на пустом месте. За полвека существования полупроводников получило развитие электроника, лазерная техника, космическая электроэнергетика. Эти области электропреобразовательной техники подготовили базу для ускоренного развития солнечной энергетики.

В СССР существовали собственные производства поликремния электронного качества для нужд военно-промышленного комплекса. Эту продукцию с 1956 г. выпускали на Подольском химико-металлургическом заводе (в настоящее время крупнейший в России производитель монокристаллического кремния – 444 т/год). В 1962 г. введено в действие предприятие по выпуску полупроводниковых материалов в Светловодске (Кировоградская обл.), в 1964 г. на Запорожском титано-магниеком комбинате был введен в строй второй по величине в Европе цех по производству полупроводникового кремния (в 2008 г. Запорожский завод полупроводников модернизирован, продукция – 2,5 тыс. т/год, к 2012 г. планируется 3,9 тыс. т/год, проектная мощность – 10 тыс.). В 1980 г. выпуск полукристаллического кремния наладили на Донецком химико-металлургическом заводе (в 1990 г. выпускал 45% всего объема СССР, производство остановлено в 1993 г.).

На территории России в период с 2003 по 2008 гг. не существовало промышленного производства поликристаллического кремния для солнечной энергетики. В настоящее время трихлорсилан производится в двух местах: Усолье-Сибирское (Иркутской обл., мощность 1 тыс. т/год) и Новочебоксарск (Чувашия, мощность 5 тыс. т/год). Ситуация на российский рынке монокристаллического кремния (пластин) практически не изменилась с 2006 г. Все предприятия работают на привозном сырье, так как нет исходного материала – поликристаллического кремния. В основном поставщиками для российских заводов поликристаллического кремния являются иностранные партнеры. Таким образом, получается, что отечественное выращивание монокристаллов кремния – часть зарубежной цепочки производства солнечных батарей.

Наиболее чистой формы промышленного производства кремния – поликремния, выпускается все в том же Усолье-Сибирском (в 2008 г. запущена пилотная линия по производству поликремния мощностью 200 т/год, проектная мощность — 3,7 тыс. т/год) и на горно-химическом комбинате в Железногорске (Красноярский край) с выпускаемой продукцией 200 т/год и проектной мощностью 2 тыс. т/год.

По сравнению с положением дел во всем мире в России солнечная энергетика практически отсутствует, в то время как спрос на солнечную энергетику стимулируется правительственными программами в тех странах, которые стремятся уменьшить свою зависимость от нефти и сократить влияние на окружающую среду. Эти программы также являются одним из важнейших инструментов стимуляции развития инновационных технологий.

Темпы производство поликристаллического кремния для нужд солнечной энергетике с каждым годом наращиваются. В мировом производстве полупроводникового кремния 90% производительных мощностей контролируют девять крупнейших компаний из США, Японии, Германии и Италии, активно вводит новые мощности Китай. Семерка ведущих мировых производителей поликристаллического кремния довела свои годовые мощности до уровня 114,5 тыс. т, почти удвоив их по сравнению с 2008 г. Расширяется и география изготовления солнечных модулей. В процессе диффузий инноваций производства, а за ним и технологии, перемещаются в другие страны. Из наших ближайших соседей это, например, Украина и Казахстан [1, 5].

Кроме технологии прямого фотопреобразования, в солнечной энергетике ведутся разработки и создания солнечных тепловых электростанций, которые используют технологию концентрации солнечных лучей с использованием параболических зеркал и установок башенного типа. Сконцентрированные солнечные лучи нагревают жидкий теплоноситель с последующей генерацией энергии с помощью паровой турбины. В центре станции стоит башня. По кругу от башни на некотором расстоянии располагаются гелиостаты — зеркала площадью в несколько квадратных метров, закреплённое на опоре и подключённое к общей системе позиционирования. Основная и самая трудная задача — это позиционирование всех зеркал станции так, чтобы в любой момент времени все отраженные лучи от них попали на резервуар. Фактически на станциях такого типа можно получить сравнительно большой КПД (около 20 %) и высокие мощности.

Опытные башенные солнечные станции действуют в США и Испании, параболические в США, Австралии, Испании, Германии. В 2007 г. в пустыне Невады запущена солнечная параболическая электростанция мощностью 64 МВт. Тогда же в Севилье, Испания был открыта первая в Европе солнечная тепловая электростанция. В СССР первая промышленная солнечная электростанция башенного типа была построена в 1985 г. в Крыму в качестве резервного источника электричества для планируемой там АЭС. СЭС-5 имела пиковую мощность 5 МВт. Столько же, сколько у первого ядерного реактора. При эксплуатации этой станции было выявлено множество трудностей. Одна из них — система позиционирования отражателей практически полностью расходовала энергию, вырабатываемую станцией. Также возникали трудности с загрязнением зеркал.

Широкое применение в мире находят солнечные установки теплоснабжения. Мировой лидер по площади тепловых солнечных коллекторов является Китай (около 60% всех установок в мире). В Европе лидером выступает Германия (47% всех установленных в Европе солнечных коллекторов) [7]. Эти технологии потенциально перспективны и еще требуют дальнейших научно-исследовательских изысканий.

За последние десять лет фотоэлектрэнергетика, наряду с ветроэнергетикой, из всех ВИЭ демонстрирует наибольший прирост. В 2009 г., несмотря на продол-

жающийся мировой экономический спад, она выросла еще на 46% по сравнению с 2008 г. (рис. 1). Лидирующие позиции укрепила «триада» мировых центров роста – Европа (в основном за счет Германии), Япония и США (рис. 2).

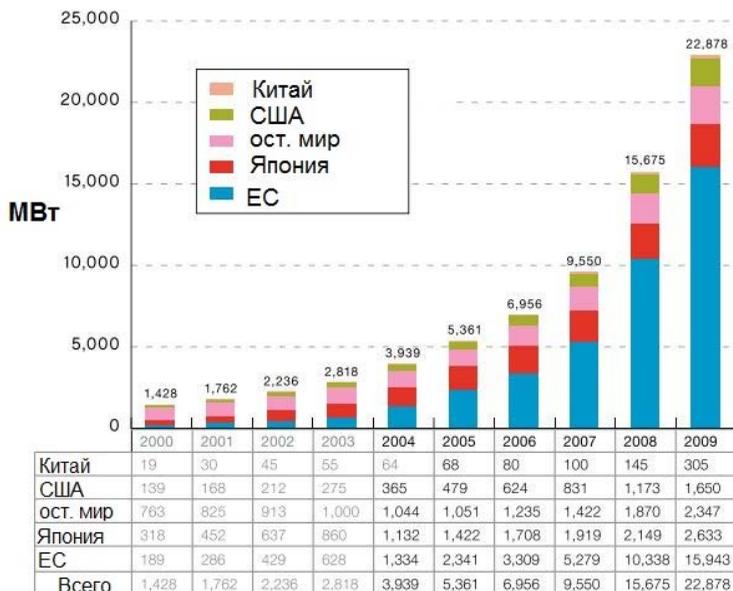


Рис. 1. Динамика суммарных установленных мощностей солнечных модулей по регионам мира за 2000-2009 гг. [9].

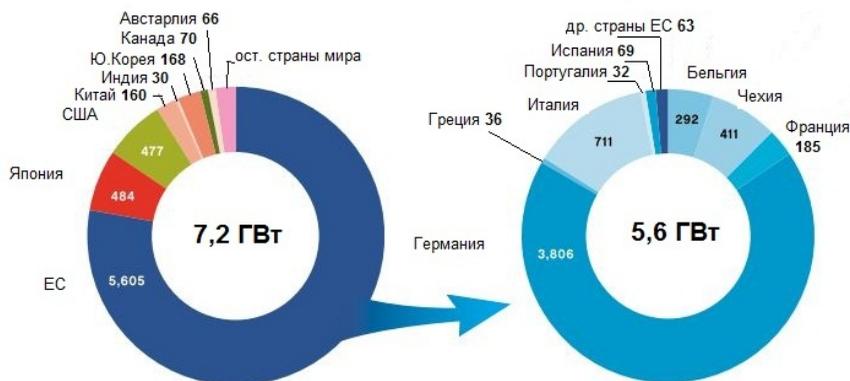


Рис. 2. Суммарная установленная мощность солнечных модулей по странам мира и Европы в 2009 г. [9].

Одним из главных показателей инновационного развития той или иной отрасли являются темпы роста инвестиций в нее. В настоящее время, наблюдается тенденция значительного роста, как вводимых мощностей, так и инвестиций в ВИЭ по всему миру. В 2008-2009 гг. новые инвестиции в сектор ВИЭ превысили половину всех инвестиций в общее производство энергии. В 2010 г. инвестиции в возобновляемую энергетику в целом достигли рекордных объемов – \$211 млрд, т.е. увеличились с 2009 г. на 32%, а с 2004 г. — на 540%. Финансовые вливания Китая составили более одной пятой доли от общего объема (\$48,9 млрд, что на 28% больше по сравнению с 2009 г.), а развивающиеся страны в целом впервые опередили в данной отрасли развитые экономики.

В 2010 г. впервые прирост мощностей, основанных на возобновляемых источниках энергии, превысил ввод в действие мощностей традиционных. По показателям имеющихся мощностей и инвестиций по многим параметрам лидируют Китай, США, Германия, Индия и Бразилия. Уже более 100 стран объявили о цели обеспечения большей доли ВИЭ в своем энергопотреблении. Например, Бразилия собирается производить до 75 % всего электричества за счет ВИЭ к 2030 г., цель Китая – 15% ВИЭ к 2020 г [8]. На фоне этого российская цель – 1,5 % к 2010 г. и 4,5 % ВИЭ в производстве электроэнергии к 2020 г. – выглядит очень скромно.

Литература

1. Алибеков А.О., Берёзкин М.Ю. Развитие солнечной энергетики в Казахстане. – Возобновляемые источники энергии: Материалы седьмой всероссийской научной молодежной школы с международным участием. – М.: МИРОС, 2010.
2. Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. – 2004, том 38, вып. 8. – с. 937-948.
3. Берёзкин М.Ю. Экологические и технологические стимулы развития возобновляемой энергетики. – Физические проблемы экологии (Экологическая физика). – М: МАКС Пресс, 2010. – №17.
4. Берёзкин М.Ю., Синюгин О.А. Постиндустриальные тенденции конкурентоспособности энергетики мира / В сб. Конкурентоспособность в системе мирового хозяйства: пространственный анализ / Под ред. Н.С. Мироненко. – М.: Пресс-Соло, 2002.
5. Берёзкин М.Ю., Синюгин О.А. География инноваций и возобновляемая энергетика мира // Малая энергетика. – 2011, №1-2.
6. Перспективы энергетических технологий. В поддержку Плана действий «Группы восьми». Сценарии и стратегии до 2050 г. ОЭСР/МЭА, WWF России (перевод на русский язык, ред. часть 1 А. Кокорин, часть 2 Т. Муратова). – М.: 2007. – 586 с.
7. Попель О.С. Перспективы развития возобновляемых источников энергии: роль ВИЭ в энергетике // Энергия: экономика, техника, экология. – 2007, №7.
8. Renewables 2010 Global status report. – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2011.
9. Global market outlook for photovoltaics until 2014. – European Photovoltaic Industry Association, 2001.

АНАЛИЗ СВЯЗИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЛЕДОВОГО РЕЖИМА
АЗОВСКОГО МОРЯ С ИНДЕКСАМИ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

А.Е. Букатов, Е.А. Павленко

В настоящее время широко признано, что климатические условия на Земле изменяются как в глобальном масштабе, так и на уровне отдельных регионов. Исследование современного климата в районе Азовского моря актуально по нескольким причинам. Азовское море, несмотря на свои небольшие размеры, имеет важное народнохозяйственное значение. Район Азовского моря – это зона активного судоходства, рыбного промысла, гидротехнического строительства и курортного хозяйства. В районе Азовского моря интенсивно развиваются сельское хозяйство и промышленность. Таким образом, изучение изменчивости гидрометеорологических условий на Азовском море представляет большой практический и научный интерес. Следует отметить, что Азовское море находится в зоне умеренных широт Европы – области относительно больших ожидаемых по прогнозам меридиональных градиентов температуры [1]. Кроме того изменения микроклимата морских побережий в условиях глобального потепления имеет ряд особенностей, определяющихся близостью водной поверхности, понижением рельефа и бризовой циркуляцией.

Наиболее важными характеристиками климата являются температура воздуха и атмосферные осадки. Знание их режима необходимо для разнообразных практических потребностей, особенно для районирования сельскохозяйственных культур. Облачность является существенным фактором радиационного баланса и одной из основных характеристик атмосферных процессов. По оценкам, приведенным в Четвертом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата, повышение глобальной осредненной приземной температуры воздуха за 1906-2005 гг. составило $0,74^{\circ}\text{C}$ ($0,56 \div 0,92^{\circ}\text{C}$) [2]. Этот общий рост температуры складывается из двух периодов потепления. Первый между 1910 и 1945 гг., второй с середины 1970-х годов [3]. В современных исследованиях климата России и Украины показано, что в режиме основных климатических параметров произошли заметные изменения, выходящие за пределы оценок глобальной изменчивости. В частности в среднем для территории России интенсивность потепления за 100-летие (1901-2000 гг.) составила $0,9^{\circ}/100$ лет [3, 4]. Повышение температуры воздуха сезонно неоднородно, наиболее выражено зимой и весной [1, 3 – 5]. В работах [6, 7] исследуются многолетние изменения температуры в Азовском регионе. Показано, что для станций Таганрог и Керчь за 1882-2007 гг. повышение температуры составило $0,5 \div 1,1^{\circ}\text{C}$.

На фоне происходящего потепления климата наблюдается изменение режима атмосферных осадков и облачности. В работах [1, 8, 9] приведены оценки линейных трендов осадков в XX веке для территории Украины. Увеличение количества осадков за период 1900-1990 гг. в среднем составило $0,5$ мм/год. Рост осадков в основном проявляется в зимний период. В [7] показано, что для станций Бердянск, Таганрог и Керчь за 1891-2007 гг. увеличение осадков составило $1,1 \div 1,6$ мм/год.

Для европейской части России во второй половине XX века также отмечена слабая тенденция к росту осадков [3, 4]. За 1901-1995 гг. на юго-востоке Украины выявлено увеличение количества облачности на 0,2-0,4 балла в летний период [1].

К вопросам исследования ледового режима Азовского моря обращались многие авторы [7 – 16]. Это обусловлено тем, что ледовые условия определяют навигацию в холодный период года. Смещение сроков ледовых явлений оказывает влияние на биологические циклы в экосистемах, что отражается в свою очередь на рыбопродуктивности. Кроме того, лед накапливает загрязняющие вещества, способствует их миграции и перераспределению. Поэтому сбор всей доступной информации о характеристиках ледового режима и исследование факторов влияющих на его изменчивость необходимы для прогнозирования ледовых условий и являются актуальной задачей. В [12] рассматриваются основные характеристики ледовых процессов и тенденции их многолетней изменчивости. Результаты исследования современного состояния ледовых условий в Азовском море и Керченском проливе на базе спутниковой информации за последние 15 лет представлены в работе [13]. В [15] рассмотрена взаимосвязь между формами атмосферной циркуляции по Вангенгейму-Гирсу и повторяемостью суровых и мягких зим на Азовском море за 1886-2005 гг.

Колебания климата в современный период происходят под влиянием естественных (вулканическая деятельность, солнечная активность, изменение астрономических параметров, динамика атмосферной циркуляции), и антропогенных факторов (парниковые газы, аэрозоли). Поэтому представляет интерес поиск статистических связей между динамикой климатических характеристик и факторами, определяющими изменения регионального климата. К индикаторам климатической изменчивости, отражающим крупномасштабные процессы в системе океан-атмосфера для большинства стран Европы, относят климатические индексы Северо-Атлантического (NAO) [17 – 22] и Восточно-Атлантического (EA) [19, 23] колебаний. NAO отражает квазисинхронное увеличение и уменьшение атмосферного давления в Азорском максимуме и Исландском минимуме. EA – колебание аномалий давления с центрами в районе Исландии, Великобритании и в восточной части тропической Атлантики, Северной Африке. Колебание, охватывающее восточную Атлантику и западную Россию (EATL/WRUS), влияет на формирование климатических аномалий в Евразии [19]. EATL/WRUS характеризуется четырьмя центрами аномалий давления: положительные центры – в Европе и северном Китае, отрицательные – в районе северо-восточной Атлантики и Каспийского моря. Таким образом, тенденции климатических изменений в Европейском регионе невозможно правильно объяснить, не принимая в расчет колебания во времени этих индексов.

В работах [6, 7] изложены результаты исследований климатической изменчивости гидрометеорологического режима Азовского моря: рассмотрены многолетние изменения характеристик, проведен анализ их многолетнего сезонного хода в прибрежных районах Азовского моря. Однако следует отметить, что используемые в цикле этих исследований многолетние данные прибрежных станций имеют различные длины периодов наблюдений (начало периодов наблюдений на станциях колеблется от 1882 по 1926 гг.). Таким образом, выводы, полученные по этим данным для различных станций не вполне сопоставимы между собой. Представляет интерес провести сравнение сезонной изменчивости метеорологических харак-

теристик и тенденций их многолетних изменений на прибрежных станциях моря, используя ряды данных за одинаковые периоды наблюдений для всех рассматриваемых станций. Также, в работах [6, 7] получены оценки линейных трендов за более чем 100-летний период только для станций Таганрог и Керчь (температура воздуха), а также для станции Бердянск (осадки). Интересно получить такие оценки и по другим станциям Азовского моря. Кроме того, более детального рассмотрения требует анализ взаимосвязей динамики климатических характеристик в Азовском регионе с изменчивостью атмосферной циркуляции.

Рассмотрим региональные, сезонные и межгодовые особенности климатической изменчивости температуры приземного слоя воздуха, атмосферных осадков, облачности и ледового режима в районе Азовского моря на основе данных инструментальных наблюдений на прибрежных станциях (рис. 1). Проведем анализ статистических связей между динамикой климатических характеристик в регионе и изменениями значений индексов атмосферной циркуляции NAO, EA, EATL/WRUS.



Рисунок 1. Схема расположения станций.

Климатическая изменчивость температуры воздуха.

Основой исследования послужил архив NCDC GHCN среднемесячных данных инструментальных измерений приземной температуры воздуха на прибрежных станциях Азовского моря с 1900 по 1990 г. [24]. Анализ однородности рядов наблюдений и методика контроля качества содержатся в работах [25, 26]. Для исследования выбраны станции с наиболее длинными и полными рядами наблюдений (пропуски в наблюдениях не превышают 10%): Керчь, Геническ, Ростов-на-Дону, Приморско-Ахтарск. Архив температуры воздуха NCDC GHCN для выбранных станций дополнен по 2008 г. на основе ежедневных данных наблюдений NCDC GSOD [27]. В случаях пропусков в рядах для отдельных месяцев проводилось восстановление данных методом разностей. Приведение считалось целесообразным, если расстояние между станциями не превышало 300 км, и удовлетворялся критерий:

$$r(a, b) > \frac{1}{2} \frac{\sigma(a)}{\sigma(b)}, \quad (1)$$

где $r(a, b)$ – коэффициент корреляции между временными рядами приводимой станции (b) и станции аналога (a);

$\sigma(a), \sigma(b)$ – среднеквадратические отклонения [28].

На основе полученных данных сформирован массив среднемесячных рядов приземной температуры воздуха за период 1900-2008 гг. на прибрежных станциях Азовского моря. В работе также использован массив среднемесячных индексов NAO за 1900-2008 гг. [29], EATL/WRUS за 1950-2008 гг. [30].

Выполнен статистический анализ динамики рядов, включающий расчет следующих характеристик: линейных трендов (для всего периода исследования и за последние десятилетия), оценок статистической значимости их величин, коэффициентов вариации, среднеквадратических отклонений, коэффициентов корреляции между различными параметрами. Рассчитаны среднееголетние месячные и годовые величины температуры за 1961-1990 гг. (период, рекомендованный ВМО для расчета климатических норм) и за 1991-2008 гг. Проведен сравнительный анализ годового хода температуры в данные периоды.

Изменения среднего уровня рядов оценивались в линейном приближении методом наименьших квадратов. Уравнение тренда имеет вид:

$$\tilde{y} = a_1 x + a_0, \quad (2)$$

где $x=1 \dots n$,

n – длина ряда.

Пусть $A = a_1(n-1)$ – величина тренда за рассматриваемый промежуток времени [31]. Для определения статистической значимости тренда рассчитывались коэффициенты детерминации (R), определяющие вклад тренда в общую дисперсию ряда. Оценка тренда считается значимой, если $R \geq t / \sqrt{n-2+t^2}$, где t – параметр Стьюдента [32].

Для анализа статистических связей между колебаниями температуры воздуха на различных станциях, а также между температурой и индексами атмосферной циркуляции использовался параметрический коэффициент парной линейной корреляции. Для характеристик, между колебаниями которых наблюдается наиболее тесная связь, проведен анализ внутривековой изменчивости коэффициентов корреляции (по скользящим 30-летним периодам с шагом сдвига 1 год) и взаимный спектральный анализ. С целью достижения стационарности рассматриваемых рядов перед спектральным анализом удалены их средние составляющие и линейные тренды [31]. Чтобы убрать случайный шум в периодограмме, проведено сглаживание данных окном Хемминга [33] (ширина окна скользящего среднего принята равной 5).

Коэффициенты корреляции между временными рядами среднегодовой температуры воздуха на прибрежных станциях составляют $0,73 \div 0,94$ (уровень вероятности $p=99\%$), что позволяет сделать вывод о согласованности колебаний температуры на выбранных станциях. На рисунке 2 представлена межгодовая из-

менчивость среднегодовой температуры воздуха (линия 1), 11-летнее скользящее среднее (линия 2), и линейная аппроксимация ряда (линия 3) для станции Керчь.

Как видно из поведения скользящих средних, понижение температуры воздуха конца XIX века сменилось повышением в 1916 г. В начале 1940-х гг. это потепление снова сменилось кратковременным похолоданием. С середины 50-х до начала 70-х гг. наблюдался период повышения температуры, сменившийся снова похолоданием. Наиболее интенсивное потепление по данным станции Керчь отмечено с начала 90-х гг.

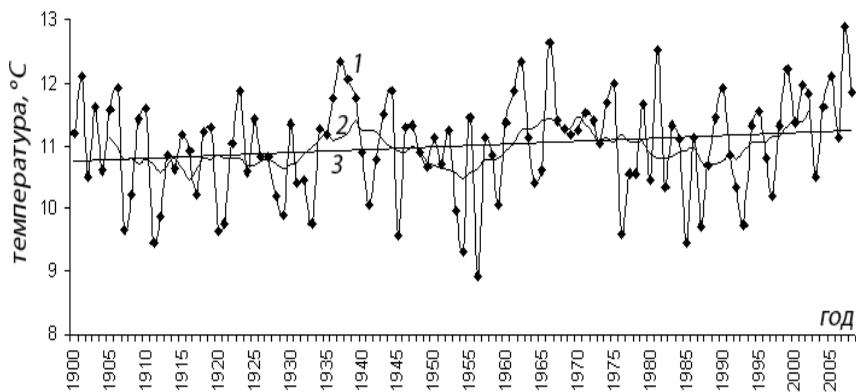


Рисунок 2. Межгодовая изменчивость среднегодовой температуры воздуха на станции Керчь.

За весь период исследования 1900-2008 гг. тренд среднегодовой температуры воздуха в районе Азовского моря составляет $0,5 \pm 2,6^\circ\text{C}/100$ лет (табл. 1). Для всех станций оценки годового тренда статистически значимы. Повышение температуры пространственно и сезонно неоднородно, наиболее выражено в Ростове-на-Дону и Приморско-Ахтарске зимой и в первой половине весны. Тренды среднемесячной температуры положительны на всех станциях, во все сезоны года, исключая Керчь, где выявлена тенденция к похолоданию в мае, июне, октябре и ноябре. Средние квадратические отклонения (σ), характеризующие величину климатической изменчивости, минимальны для станции Керчь, максимальны для станции Ростов-на-Дону. Наиболее устойчивый термический режим — в летний период $\sigma = 1,3 \pm 1,7$ (июль), наиболее неустойчивый — в зимний период $\sigma = 3,3 \pm 4,0$ (февраль).

Известно, что наиболее интенсивное повышение глобальной температуры воздуха наблюдается с середины 70-х годов [3]. В районе исследования также прослеживается увеличение скорости роста температуры. За период 1975-2008 гг. интенсивность потепления составила $3,2 \pm 4,4^\circ\text{C}/100$ лет. Величина тренда наибольшая для станции Генчиск, а наименьшая для Керчи. Следует отметить, что в последние десятилетия повышение температуры наиболее выражено летом и осенью.

Таблица 1. Тренды температуры воздуха (1900-2008 гг.), коэффициенты корреляции между температурой воздуха и индексами NAO (1900-2008 гг.), EATL/WRUS (1950-2008 гг.).

Станция месяц	Керчь	Геническ	Пр.- Ахтарск	Ростов-на- Дону
<i>Тренды температуры, А [°С/100лет]</i>				
1	1,9	1,6	2,0	3,4
2	2,6	2,6	3,1	4,2
3	0,9	2,1	2,7	3,9
4	0,8	1,5	2,2	3,7
5	-0,1	0,3	0,9	2,5
6	-0,2	0,3	0,7	2,5
7	0,1	0,4	1,0	1,9
8	0,6	1,0	1,3	1,9
9	0,2	0,9	1,2	1,8
10	-0,7	0,2	0,9	1,6
11	-0,8	0,7	1,2	1,8
12	0,2	1,0	1,5	2,6
год	0,5	1,1	1,6	2,6
<i>R_{NAO} (температура, NAO)</i>				
1	-0,02	0,09	0,04	0,08
2	0,00	0,09	0,06	0,09
3	0,05	0,17	0,05	0,10
4	0,03	0,01	-0,02	-0,07
5	0,15	0,10	0,08	0,07
6	-0,06	-0,06	-0,08	-0,07
7	0,21	0,23	0,15	0,16
8	0,25	0,27	0,18	0,18
9	0,19	0,17	0,18	0,15
10	0,00	0,03	-0,01	0,03
11	-0,10	-0,05	-0,11	-0,14
12	0,01	0,11	-0,04	0,02
год	0,03	0,06	0,02	0,01
<i>R_{EATL/WRUS} (температура, EATL/WRUS)</i>				
1	-0,43	-0,54	-0,49	-0,48
2	-0,38	-0,25	-0,21	-0,17
3	0,01	0,13	-0,03	0,05
4	-0,30	-0,27	-0,37	-0,48
5	-0,26	-0,31	-0,38	-0,44
9	-0,59	-0,62	-0,65	-0,68
10	-0,55	-0,50	-0,52	-0,55
11	-0,38	-0,39	-0,30	-0,29
12	-0,46	-0,41	-0,38	-0,40
год	-0,26	-0,25	-0,31	-0,31

Примечание. Жирным шрифтом отмечены оценки значимые на 90% и выше уровне.

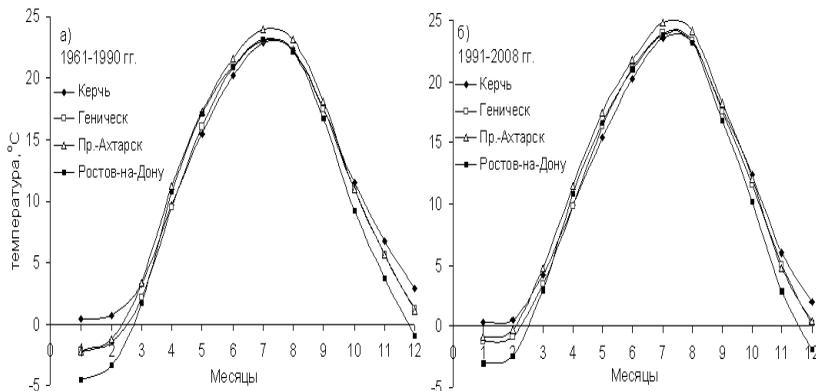


Рисунок 3. Среднегодовой годовой ход температуры воздуха.

Среднегодовой годовой ход температуры воздуха на прибрежных станциях Азовского моря анализировался для стандартного базового периода 1961-1990 гг. (рис. 3а), рекомендованного ВМО, и периода 1991-2008 гг. (рис. 3б). Наиболее низкая температура в годовом ходе для выбранных периодов наблюдается в январе, а наиболее высокая – в июле. Такая форма годового хода характерна для континентального типа климата. Влияние Азовского моря на формирование температурного режима района уступает воздействию суши вследствие его мелководности, небольших размеров и внутриконтинентального положения. Возможность аккумуляции тепла в воде здесь ограничена, перемешивание охватывает всю толщу вод, нагревание и охлаждение водных масс происходит быстро. Амплитуда годового хода температуры равна $22,3 \pm 27,6^\circ\text{C}$ за период 1961-1990 гг. и $23,3 \pm 26,8^\circ\text{C}$ за период 1991-2007 гг.. Наибольшая амплитуда соответствует станции Ростов-на-Дону, а наименьшая амплитуда – станции Керчь. Таким образом, степень континентальности климата увеличивается с юго-запада на северо-восток района. Изменение амплитуды колебаний годовой температуры воздуха в современный период относительно базового связано, вероятно, с особенностями циркуляции атмосферы в данные периоды.

Среднегодовая температура воздуха в районе исследования составляет $9,7 \pm 11,3^\circ\text{C}$ и $10,1 \pm 11,6^\circ\text{C}$ для базового и современного периодов соответственно. Максимальная среднегодовая температура воздуха наблюдается на станции Пр.-Ахтарск, минимальная – на станции Ростов-на-Дону. Коэффициенты корреляции между температурой воздуха и индексами NAO, EATL/WRUS для среднемесячного и среднегодового уровня изменчивости представлены в таблице 1. Статистически значимые величины коэффициентов корреляции между изменениями значений индекса NAO и колебаниями температур воздуха (R_{NAO}) положительны, получены для осенне-летнего периода. Наиболее тесная связь отмечена в. Максимум R_{NAO} получен для станции Геническ в августе ($R_{NAO}=0,27$, $p=99\%$).

Связь между индексом EATL/WRUS и изменениями температуры воздуха ($R_{EATL/WRUS}$) за 1950-2002 гг. более тесная, коэффициенты корреляции отрицательны. Наибольшие величины $R_{EATL/WRUS}$ наблюдаются в осенний сезон, с абсолют-

ным максимумом для станции Ростов-на-Дону в сентябре ($R_{EATL/WRUS} = -0,68$, $p=99\%$). Анализ внутривековой изменчивости коэффициентов $R_{EATL/WRUS}$ по скользящим 30-летним периодам показал, что максимумы $R_{EATL/WRUS}$ приходятся на начало осеннего сезона 1951-1980 гг.

На рисунке 4 показаны спектральные характеристики колебаний годовых индексов EATL/WRUS и среднегодовой температуры воздуха для станции Ростов-на-Дону, полученные за 1950-2008 г. Погрешность расчета оценок спектральной плотности составляет 5% при максимальном временном сдвиге 18 лет. Основной вклад в общую дисперсию среднегодовой температуры воздуха вносят колебания с периодом 2,1÷2,2 года, и 4,8 года.

В вариациях индекса EATL/WRUS максимумы спектральной плотности соответствуют периодам 4,8 лет. Также значительный вклад в общую дисперсию индекса EATL/WRUS вносят колебания с периодом 2,4 года. В ко-спектре рассматриваемых характеристик максимальный спектральный пик прослеживается на периоде 4,8 года. Связь является значимой, когерентность превышает 95% уровень. Сдвиг фаз составляет 163°.

Таким образом, на основе анализа массивов инструментальных наблюдений на прибрежных станциях Азовского моря установлено, что прирост температуры за 1900-2008 гг. составляет в районе исследования 0,5÷2,6°C/100 лет. Повышение температуры пространственно и сезонно неоднородно, наиболее выражено на северо-востоке района зимой (февраль 2,6÷4,2°C) и в первой половине весны (март 0,9÷3,9°C). Следует отметить, что за период 1975-2007 гг. интенсивность потепления возросла до 3,2÷4,4°C/100 лет, и повышение температуры наиболее выражено летом и осенью. Наиболее значимо на изменение температуры воздуха влияет изменчивость величин индекса EATL/WRUS, коэффициенты корреляции отрицательны. В ко-спектре рассматриваемых характеристик максимальный спектральный пик прослеживается на периоде 4,8 года.

Сравнение годового хода температуры за рекомендованный ВМО базовый период 1961-1990 гг. и за последние десятилетия показал, что амплитуда годового хода в современный период заметно уменьшилась. Нормы 1961-1990 гг. не во всех случаях правильно описывают современный климатический режим.

Климатическая изменчивость атмосферных осадков.

Для исследования климатической изменчивости режима атмосферных осадков использовались данные архива NCDC GHCN месячных и ежедневных сумм осадков на прибрежных станциях Азовского моря с 1900 по 1990 гг. [24, 34]. Известно, что трудность получения выводов о климатических изменениях в рядах осадков связана со сложностью учета различного рода систематических погрешностей. Поэтому, следует отметить, что данный архив содержит поправки устраняющие нарушение однородности временных рядов количества осадков вследствие смены приборов (повсеместная замена дождемера с защитой Нифера на осадкомер Третьякова в 50-х годах), введения поправок на смачивание в текущие результаты измерения осадков с 1966 г., а также изменения числа сроков измерений осадков в сутки [35, 36]. Для анализа выбраны станции: Керчь, Геническ, Мариуполь, Ростов-на-Дону. Пропуски в наблюдениях ($\leq 10\%$) восстанавливались методом отношений. Использовался такой же критерий целесообразности приведения, как и для рядов температуры. В качестве данных для станций-аналогов при восстановлении рядов осадков, кроме вышеперечисленных станций, использовались данные архи-

ва NCDC GHCN для станций Тамань и Таганрог. Полученный архив для выбранных станций дополнен по 2005 г. для Геническа и по 2008 г. для остальных станций на основе ежедневных данных наблюдений NCDC GSOD [27]. В дополнительные данные для рядов осадков введены поправки устраняющие нарушения однородности рядов ежедневных сумм осадков вследствие введения поправок на смачивание и изменения числа сроков измерений осадков в сутки в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [35]. Статистический анализ динамики рядов осадков и их связей с колебаниями климатических индексов NAO, EATL/WRUS проводился аналогично схеме анализа разработанной для температуры воздуха.

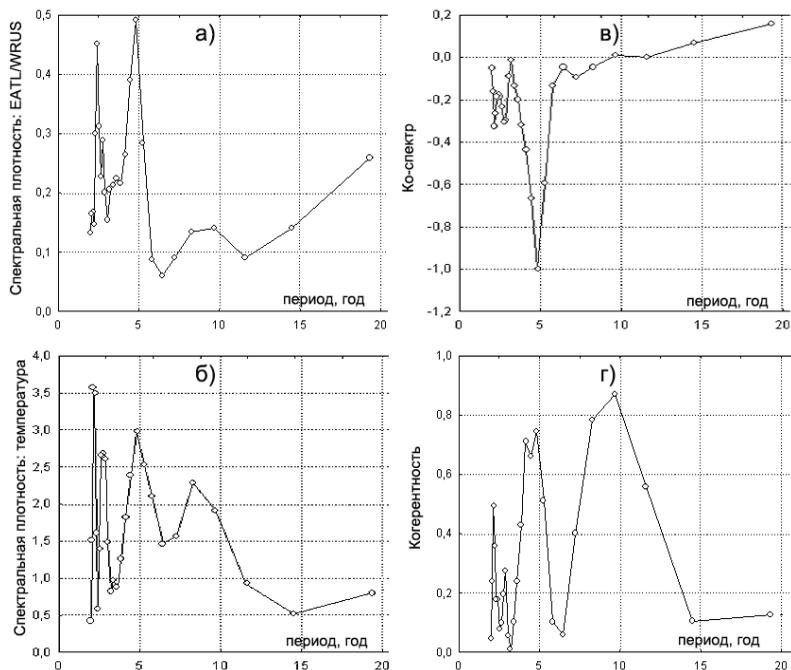


Рисунок 4. Спектральные характеристики колебаний годовых значений индекса EATL/WRUS и среднегодовой температуры воздуха на станции Ростов-на-Дону.

Коэффициенты корреляции между временными рядами годовых сумм осадков на прибрежных станциях составляют $0,40 \div 0,64$ ($p=99\%$), что позволяет сделать вывод о сходных тенденциях изменчивости режима атмосферных осадков на выбранных станциях. Межгодовая изменчивость аномалий годовых сумм осадков от среднего за 1900-2008 гг. (линия 1), 11-летнее скользящее среднее годовых сумм (линия 2), линейная аппроксимация ряда (линия 3) для станции Керчь представлена на рисунке 5.

Как видно из поведения скользящих средних, увеличение годового количества осадков в начале XX века сменилось уменьшением в 1910-1915 гг. продол-

жавшимся до середины столетия. В конце 1940-х начале 50-х наметилась тенденция к увеличению годовых сумм осадков, которая сменилась их уменьшением в начале 60-х гг. В период 1975 – 2000 гг. годовое количество осадков увеличивалось. А с начала XXI века прослеживается тенденция к уменьшению годовых сумм осадков.

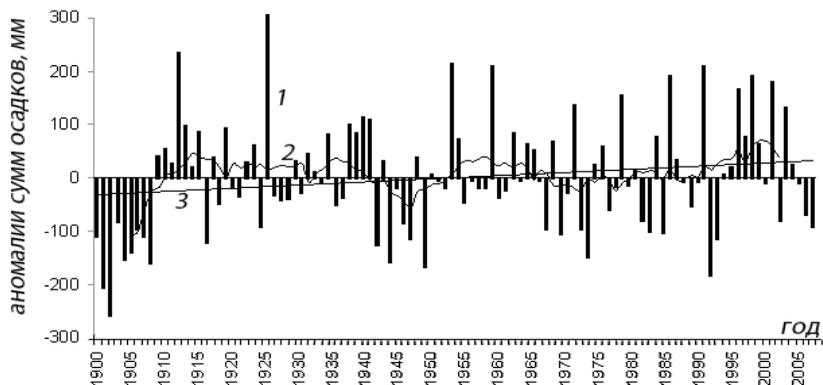


Рисунок 5. Межгодовая изменчивость аномалий годовых сумм осадков на станции Керчь.

По оценкам линейных трендов (табл. 2) выявлена тенденция увеличения годового количества осадков за период 1900–2008 гг. Годовой тренд на прибрежных станциях составляет 55,8-208,6 мм/100 лет. Наиболее значительно увеличение количества осадков проявляется в холодный период (ноябрь - апрель). В теплый период изменения в режиме осадков невелики и оценки линейных трендов в основном не являются статистически значимыми. Характеристики изменчивости максимальны для июня, августа, сентября. В холодный период для большинства станций отмечается уменьшение значений коэффициентов вариации, следовательно, уменьшение изменчивости осадков. Следует отметить, что с 1975 г. и по настоящее время рост осадков наиболее выражен осенью. Тенденции климатической изменчивости осадков в районе Азовского моря согласуются с закономерностями изменения режима атмосферных осадков для территории Украины на протяжении XX века [1].

Годовое количество выпадающих осадков увеличивается с юго-запада, на северо-восток от 390 мм в Геническе до 592 мм в Ростове-на-Дону (по оценкам для базового периода 1961-1990 гг.). За 1991-2005(8) гг. среднее годовое количество осадков в районе Азовского моря составило 425–619 мм (минимальное годовое количество осадков соответствует Геническу, а максимальное Ростову-на-Дону). Близость обширной водной поверхности, понижение рельефа и бризовая циркуляция создают над побережьем инверсию, мешающую развитию восходящих токов [28], что ослабляет местные процессы развития конвекции и осадкообразование. В большей степени совместное влияние этих факторов проявляется на юго-западе района исследования, с чем связано более низкое количество годовых сумм осадков.

Таблица 2. Тренды количества осадков (1900-2005(8) гг.), коэффициенты корреляции между количеством осадков и индексами NAO (1900-2008 гг.), EATL/WRUS (1950-2008 гг.).

Станция месяц	Керчь	Геническ	Мариуполь	Ростов-на-Дону
<i>Тренды осадков, А [мм/100лет]</i>				
1	3,2	16,2	19,9	25,3
2	3,4	14,1	19,3	22,8
3	4,9	20,3	16,1	13,5
4	0,5	11,6	21,4	8,3
5	-0,2	5,9	11,5	5,4
6	9,8	1,3	29,7	9,5
7	-9,6	-7,2	5,8	-3,3
8	20,9	14,7	4,6	10,2
9	11,3	5,7	24,2	13,7
10	-5,9	-7,2	-1,1	2,3
11	13,6	9,9	23,9	11,9
12	3,9	12,7	35,3	26,8
год	55,8	105,3	208,6	141,7
<i>R_{NAO} (осадки, NAO)</i>				
1	-0,25	-0,29	-0,28	-0,20
2	-0,18	-0,31	-0,30	-0,22
3	-0,14	-0,15	-0,18	-0,16
4	0,00	-0,03	-0,09	-0,17
5	-0,06	0,03	-0,12	-0,02
6	0,11	-0,02	-0,06	0,18
7	0,00	0,10	0,11	0,08
8	-0,14	-0,14	-0,19	-0,15
9	-0,29	-0,21	-0,18	-0,24
10	-0,20	-0,40	-0,35	-0,18
11	-0,32	-0,33	-0,24	-0,35
12	-0,15	-0,08	-0,09	-0,31
год	-0,17	-0,28	-0,28	-0,31
<i>R_{EATL/WRUS} (осадки, EATL/WRUS)</i>				
1	0,06	-0,14	-0,11	0,05
2	0,13	0,00	-0,03	0,14
3	0,06	0,18	0,27	0,15
4	-0,01	-0,25	-0,07	-0,04
5	-0,03	0,01	-0,05	-0,01
9	0,29	0,28	0,01	0,17
10	-0,07	-0,01	-0,24	0,01
11	0,37	0,01	0,18	0,38
12	-0,03	-0,24	-0,07	0,09
год	0,24	-0,01	-0,01	0,16

Примечание. Жирным шрифтом отмечены оценки значимые на 90% и выше уровне.

Среднегодовое количество осадков на прибрежных станциях Азовского моря для периода 1961-1990 гг. показано на рисунке 6а и для периода 1991-2005(8) гг. – на рисунке 6б. В годовом климатическом ходе месячных сумм осадков для базового периода выделяется полугодовая волна с двумя экстремумами в зимний (декабрь) и летний (июнь) периоды: на юго-западе (Керчь, Геническ) – основным летним и вторичным зимним, на северо-востоке (Мариуполь, Ростов-на-Дону) – основным зимним и вторичным летним. В последние десятилетия прослеживается тенденция изменения распределения экстремумов в годовом ходе месячных сумм осадков. Основной максимум соответствует летнему периоду для всех станций. Причем в Ростове-на-Дону, Керчи и Мариуполе он наблюдается в июне, а в Геническе в августе. Рост величины летнего экстремума в годовом ходе количества осадков в современный период относительно базового отмечен для всех рассматриваемых станций. Зимний экстремум смещается на конец осеннего периода.

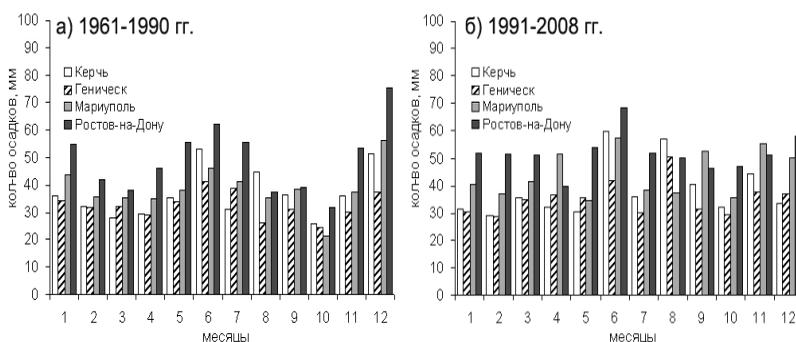


Рисунок 6. Среднегодовое количество осадков.

Коэффициенты корреляции между изменениями величин индекса NAO и динамикой сумм осадков (R_{NAO}) в регионе отрицательны, с абсолютным максимумом R_{NAO} для станции Геническ в октябре ($R_{NAO} = -0,40$, $p=99\%$) (табл. 2). Хотя взаимосвязь между центрами действия атмосферы проявляется в течение всего года, амплитуда колебаний максимальна в холодный период, когда атмосфера динамически наиболее активна. Максимумы R_{NAO} наблюдаются осенью и зимой. Годовые значения R_{NAO} значимы для всех станций. Анализ внутривековой изменчивости месячных R_{NAO} (по скользящим 30-летним периодам с шагом сдвига 1 год) показал что, в период 1900–2008 гг. прослеживается увеличение влияния колебаний индекса NAO на динамику месячных сумм осадков в регионе. Наиболее тесная связь прослеживается в зимне-осенний сезон 1949-1984 гг. Связь между колебаниями сумм осадков и изменениями величин индексов EATL/WRUS слабая, статистически значимые коэффициенты корреляции в основном положительны (табл. 2).

Спектральный анализ подтверждает наличие влияния изменчивости индекса NAO на изменчивость режима выпадения атмосферных осадков в регионе Азовского моря. На рисунке 7 показаны спектральные характеристики колебаний годового индекса NAO и годовых сумм осадков, полученных на основе данных за

1900–2008 гг. для станции Ростов-на-Дону. Для данной величины выборки погрешность расчета оценок спектральной плотности составляет 5% при максимальном временном сдвиге 34 год. Из рисунка 7б видно, что основной вклад в общую дисперсию сумм осадков вносят колебания с характерным периодом $3,4 \pm 3,6$ и 12 лет. В спектре годовых индексов NAO пик спектральной плотности соответствует периодам 2,6 и 7,7 лет, которые являются типичными периодами NAO [37]. В ко-спектре индекса NAO и сумм осадков максимум спектральной плотности соответствует периоду 3,6 лет. Когерентность для этого периода невелика (рис. 7г). Сдвиг фаз составляет 159° .

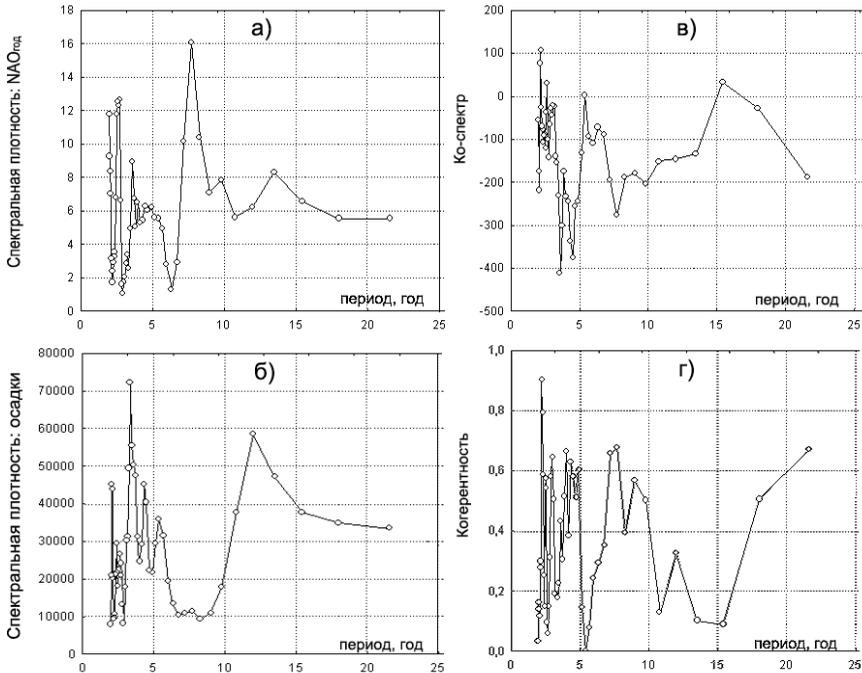


Рисунок 7. Спектральные характеристики колебаний годовых значений индекса NAO и годовых сумм осадков на станции Ростов-на-Дону.

Таким образом, на основе анализа массива многолетних данных проведено исследование региональных и сезонных особенностей климатической изменчивости атмосферных осадков в районе Азовского моря. Рассмотрены статистические связи изменчивости осадков с индексами атмосферной циркуляции. За 1900–2008 гг. годовое количество осадков увеличилось на $55,8\text{--}208,6$ мм/100 лет. Наиболее значительно увеличение количества осадков проявляется в холодный период (ноябрь - апрель). Однако, с 1975 г. и по настоящее время рост осадков в большей степени проявляется осенью.

Наиболее значимо на изменчивость режима атмосферных осадков влияет колебание индекса NAO. Коэффициенты корреляции между параметрами отрицательны. В ко-спектре годовых значений индекса NAO и сумм осадков максимум спектральной плотности соответствует периоду 3,6 лет.

Сравнение месячных, годовых сумм осадков за рекомендованный ВМО базовый период 1961-1990 гг. и за последние десятилетия показал, что нормы 1961-1990 гг. не по всем параметрам согласуются с современным климатическим режимом.

Климатическая изменчивость режима общей облачности.

Анализ климатической изменчивости количества общей облачности проведен на основе глобального массива CRU TS 2.1 с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ за период 1901-2002 гг. [38, 39]. Для исследования использованы данные в ближайших к выбранным метеостанциям (Керчь, Генчешек, Мариуполь, Пр.-Ахтарск, Ростов-на-Дону) узлам регулярной сетки. Статистический анализ динамики рядов общей облачности и их связей с колебаниями климатических индексов проводился аналогично схеме анализа разработанной для температуры воздуха.

Коэффициенты корреляции между временными рядами количества общей облачности составляют $0,68 \pm 0,96$ ($p=99\%$). Вариации среднегодового количества общей облачности (линия 1), 11-летнее скользящее среднее (линия 2) и линейная аппроксимация ряда (линия 3) для станции Керчь представлены на рисунке 8. Из поведения скользящих средних заметно, что выделяются интервалы 1900-1910 гг., 1930-1975 гг. увеличения облачности и её уменьшения – 1910-1930 гг., 1975-2002 гг.

За период 1901-2002 гг. годовые тренды количества общей облачности в районе Азовского моря невелики ($0,003 \pm 0,2$ балла/100лет), и оценки этих изменений не являются статистически значимыми. Для периода 1975-2002 гг. годовой тренд облачности составляет $-0,6 \pm 1,6$ балла/100 лет. Тренды среднего годового и месячного количества общей облачности для периода 1975-2002 гг. приведены в таблице 3. Максимальный вклад в уменьшение облачности вносит август.

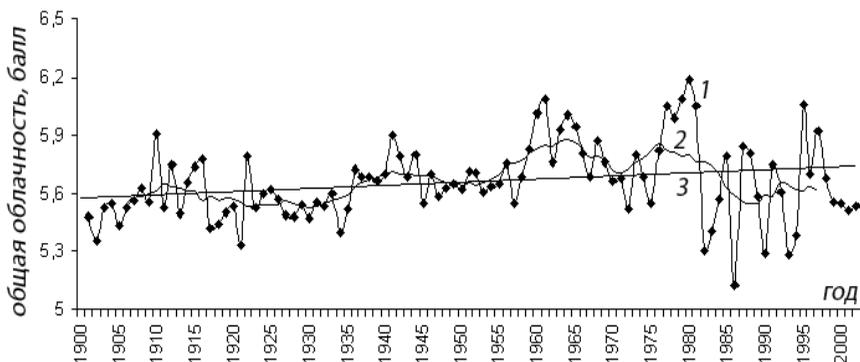


Рисунок 8. Межгодовая изменчивость количества общей облачности на станции Керчь.

Таблица 3. Тренды количества общей облачности (1975-2002 гг.), коэффициенты корреляции между колебаниями общей облачности и значениями индексов NAO (1900-2002 гг.), EATL/WRUS (1950-2002 гг.).

Станция месяц	Керчь	Геническ	Мариуполь	Пр.- Ахтарск	Ростов- на-Дону
<i>Тренды облачности, А [балл/100лет]</i>					
1	-1,3	-3,0	-0,6	-0,7	-1,2
2	-1,6	-1,1	0,2	-0,2	0,8
3	-0,2	-1,7	-1,2	-0,4	-0,7
4	-3,0	-2,2	-1,5	-1,9	-1,1
5	-1,6	-1,1	-0,7	-0,4	-0,8
6	0,5	0,9	1,7	1,2	0,3
7	-1,1	-2,1	-1,3	-1,0	-1,8
8	-4,9	-5,5	-4,8	-4,3	-3,4
9	-1,4	-1,4	-1,4	-1,3	-0,8
10	-2,2	-2,7	-0,6	-0,4	0,7
11	2,3	0,2	-0,7	0,5	0,2
12	1,5	1,0	1,2	0,8	0,9
<i>R_{NAO}, (облачность, NAO)</i>					
1	-0,01	0,03	0,10	0,04	0,15
2	-0,01	0,01	0,15	0,10	0,20
3	-0,11	-0,12	0,07	0,07	0,18
4	-0,11	-0,13	-0,13	-0,15	-0,17
5	-0,09	-0,10	-0,19	-0,15	-0,16
6	0,09	0,07	-0,01	0,00	-0,02
7	-0,06	-0,05	-0,10	-0,12	-0,12
8	-0,17	-0,24	-0,25	-0,17	-0,23
9	-0,09	-0,19	-0,16	-0,10	-0,16
10	-0,14	-0,15	-0,22	-0,19	-0,22
11	-0,16	-0,15	-0,15	-0,19	-0,19
12	-0,01	0,06	0,12	0,10	0,16
год	-0,43	-0,44	-0,35	-0,38	-0,28
<i>R_{EATL/WRUS}, (облачность, EATL/WRUS)</i>					
1	-0,10	-0,22	-0,30	-0,26	-0,35
2	0,12	0,04	0,02	0,10	0,09
3	-0,12	-0,18	-0,12	-0,07	-0,04
4	-0,11	-0,18	-0,08	-0,02	0,08
5	-0,32	-0,34	-0,25	-0,21	-0,14
9	0,14	0,19	0,24	0,23	0,32
10	0,27	0,16	0,25	0,31	0,31
11	0,29	0,09	0,25	0,37	0,37
12	0,04	-0,06	-0,08	0,00	-0,08
год	-0,07	-0,19	-0,07	-0,03	0,03

Примечание. Жирным шрифтом отмечены оценки значимые на 90% и выше уровне.

Величины линейных трендов среднемесячного количества облачности максимальны для станции Геническ, минимальны для станции Ростов-на-Дону. Характеристики изменчивости режима общей облачности наибольшие в августе, сентябре на юге и юго-западе региона. Величины среднеквадратического отклонения составляют $1 \div 1,1$. Изменчивость количества общей облачности наименьшая в зимний период ($\sigma=0,5 \div 0,6$).

Связь между динамикой сумм атмосферных осадков и общей облачности за период 1901–2002 гг. положительная, коэффициенты корреляции $0,24 \div 0,45$ ($p \geq 95\%$). Коэффициенты корреляции между изменениями величин индекса NAO и динамикой режима общей облачности (R_{NAO}) в регионе отрицательны (табл. 3). Исключением является период с января по март, когда коэффициенты в основном положительны. Абсолютный максимум R_{NAO} отмечен для станции Мариуполь в августе ($R_{NAO} = -0,25$, $p=90\%$). Коэффициенты R_{NAO} наибольшие в конце лета и осенью. Годовые значения R_{NAO} отрицательны и значимы для всех станций. Годовые коэффициенты между колебаниями облачности и изменениями величин индексов EATL/WRUS не являются статистически значимыми. С января по май коэффициенты в основном отрицательны с максимумом $R_{EATL/WRUS} = -0,35$ ($p=95\%$) для Ростова-на-Дону, а с сентября по декабрь положительны с максимумом $R_{EATL/WRUS} = -0,37$ ($p=99\%$) также для Ростова-на-Дону.

Климатическая изменчивость ледового режима.

Для исследования использованы материалы натурных данных о характеристиках основных элементов ледового режима, полученных на береговых станциях Азовского моря за 1893–1994 гг. (табл. 4). Также в работе использованы среднесуточные данные по температуре воздуха на станции Геническ за период 1884–2005 гг. [40] и массив среднемесячных данных по температуре на прибрежных станциях моря за 1924–1994 гг. [24]. В среднесуточные данные введены поправки, устраняющие неоднородность ряда вследствие различия сроков наблюдений в сутки в разные годы, в соответствии с рекомендациями, приведенными в [41]. Для исследования статистических связей между характеристиками ледового режима на различных станциях и динамикой атмосферной циркуляции использован архив индексов NAO (NCAR) [29], EA (NCAR/CPC) [30] за холодный период года. Известно, что ледовый режим Азовского моря хорошо согласуется с суммами градусодней мороза в регионе (суммами среднесуточных отрицательных температур воздуха). Суммы температур в умеренные зимы составляют 200–400°C, в мягкие зимы $\leq 200^\circ\text{C}$, в суровые $\geq 400^\circ\text{C}$ [12 – 14]. По этому критерию выполнена типизация зим за 1884–2005 гг. на суровые, умеренные и мягкие на основе данных для Геническа. Рассчитана повторяемость данных типов зим в регионе для различных периодов.

На основе полученных данных рассмотрены среднемноголетние сроки наступления основных ледовых явлений (фиксируемых ледовых событий, отражающих этапы (стадии) ледовых процессов). Рассчитаны среднемноголетние характеристики ледового режима: продолжительность ледового сезона (период, начиная с даты первого ледообразования и кончая днем, предшествующим дате окончательного очищения [42]), число очищений за зиму и максимальная толщина припайного льда. Проведен анализ многолетней изменчивости ледовых условий моря. Найдены линейные тренды временных рядов сроков первого ледообразования, окончательного очищения моря ото льда и продолжительности ледового сезона. Для определения статистической значимости трендов рассчитаны коэффициенты детер-

минации. На основе корреляционного анализа выявлены статистические связи изменений ледовых условий с колебаниями температуры воздуха в регионе и климатическими индексами NAO, EA. Также проведен взаимный спектральный анализ колебаний индекса NAO и ледовых характеристик (максимальной толщины припайного льда и продолжительности ледового сезона). Описание методики подготовки рядов к корреляционному и спектральному анализам подробнее описаны в параграфе, посвященном климатической изменчивости температуры воздуха.

Таблица 4. Станции и периоды наблюдений.

Станция	Период
Таганрог	1893–1994 гг.
Геническ (лиман)	1893–1994 гг.
Ейск (залив)	1916–1994 гг.
Пр.-Ахтарск	1916–1994 гг.
Темрюк (глухой канал)	1922–1994 гг.
Бердянск	1923–1994 гг.
Керчь	1924–1994 гг.
Мысовое	1926–1994 гг.

Повторяемость умеренных зим в районе Азовского моря за период 1884–2005 гг. составила 43%, мягких – 36%, суровых – 21%. Современное повышение температуры воздуха в исследуемом регионе, наиболее выраженное зимой и в первой половине весны, проявилось в изменении суровости зим. Количество мягких зим заметно возросло, суровых зим стало значительно меньше. За период 1975–2005 гг. повторяемость умеренных зим составила 42%, мягких – 48%, суровых – 10%. Непостоянство ледовых условий в зависимости от суровости зим является основной особенностью ледового режима Азовского моря.

Лед на Азовском море образуется ежегодно. Ледостав продолжается в течение 2–5,5 месяцев. В таблице 5 приведены среднеголетние даты наступления ледовых явлений для береговых станций моря. Ледообразование в Азовском море по среднеголетним данным начинается в Таганрогском заливе в конце ноября. На севере, северо-востоке моря диапазон дат появления начальных форм льда колеблется от середины октября до середины января в зависимости от степени суровости зим. Начальные виды льда в прибрежных пунктах на западе и востоке Азовского моря в среднем за многолетний период появляются в декабре. Многолетний диапазон дат первого ледообразования в этих районах составляет 3,5 месяца. Самое раннее первое ледообразование отмечается в начале ноября, а самое позднее – в середине февраля. В южных районах моря лед появляется значительно позже, что объясняется непосредственной близостью Черного моря, из которого в пролив проникают относительно теплые черноморские воды. Появление начальных видов льда в среднем отмечается в первой половине января. Самое раннее появление начальных видов льда в южной части моря возможно в конце ноября, а самое позднее отмечается в начале марта. В отдельные мягкие и умеренные зимы на станциях, расположенных в южной части Азовского моря, явления ледообразования не наблюдаются.

Таблица 5. Среднеголетние даты наступления ледовых явлений на Азовском море.

Станция \ Ледовые явления	Таганрог	Бердянск	Геническ	Ейск	Пр.-Ахтарск	Керчь	Темрюк	Мысовое
Средние даты								
Первое ледообразование	26.11	17.12	10.12	11.12	04.12	07.01	28.12	11.01
Первое образование заберега или припая	11.12	30.12	13.12	16.12	21.12	10.01	31.12	13.01
Начало устойчивого ледообразования	10.12	26.12	27.12	26.12	23.12	12.01	02.01	15.01
Первое полное замерзание	18.12	05.01	06.01	24.12	27.12	17.01	06.01	23.01
Начало образования устойчивого припая	22.12	03.01	01.01	01.01	28.12	20.01	31.12	19.01
Окончательное замерзание	28.12	16.01	05.01	06.01	04.01	29.01	10.01	08.02
Начало взлома/ первая подвижка припая	–	–	13.03	03.03	03.03	–	–	–
Окончательное разрушение припая	18.03	08.03	13.03	14.03	07.03	25.02	28.02	04.03
Окончательное очищение ото льда	28.03	18.03	26.03	20.03	16.03	09.03	04.03	24.03

Окончательное очищение моря ото льда в среднем происходит в марте. Очищение моря начинается с юго-восточных районов. Затем очищается южная и юго-западная часть, куда под влиянием господствующих северо-восточных ветров выносятся льды из других районов моря. В мягкие зимы окончательное очищение в этих районах возможно во второй половине января. В суровые зимы очищение происходит в конце апреля – начале мая. Последней ото льда освобождается вершина Таганрогского залива, которая характеризуется более суровыми климатическими условиями. Здесь в мягкие зимы очищение наблюдается в конце февраля. Самое позднее очищение залива ото льда по среднеголетним данным происходит в конце апреля.

Среднеголетняя продолжительность ледового сезона, максимальная толщина льда, а также среднее число очищений за зиму представлены в таблице 6. Продолжительность ледового сезона зависит от района моря. В вершине Таганрогского залива средняя продолжительность ледового периода составляет 122 дня. В южных районах моря – 61 день. Наибольшей толщины ледяной покров в среднем достигает в первой половине февраля. В Таганрогском заливе образуется наиболее мощный практически пресный лед, его среднеголетняя максимальная толщина составляет 42 см. В южной части моря средняя максимальная толщина льда – 21–

26 см. Следует отметить, что в суровые зимы толщина льда может достигать 80 см в Таганрогском заливе и 44 см в южных районах моря (Керчь).

Так как глубина моря невелика, то и теплозапас незначителен. Поэтому неустойчивость ледового режима, основными чертами которого являются неоднократные вскрытия и замерзания, а также непостоянство фаз ледовых явлений, в основном обусловлена сменой погодных условий. В ледовый сезон возможно неоднократное появление и исчезновение льда. Число очищений за зиму в среднем составляет от 2 раз на северо-востоке до 6 на юге.

Таблица 6. Среднегоголетние характеристики ледового режима Азовского моря.

Характеристика \ Станция	Среднее число, величина							
	Таганрог	Бердянск	Геничеськ	Ейск	Пр.-Ахтарск	Керчь	Темрюк	Мысовое
Число очищений за зиму	2	4	3	4	4	6	3	3
Продолжительность ледового сезона, дни	122	91	106	100	101	61	67	72
Максимальная толщина льда, см	42	30	29	37	27	21	26	24

Анализ изменчивости ледовых условий района за 1924–1994 гг. показал, что прослеживается слабая тенденция к более позднему появлению начальных форм льда, в основном, в южных районах моря. Смещение сроков максимально для станции Керчь, тренд достигает 13 дней за 70 лет. В Геничеське, Таганроге и Ейске наблюдается противоположная тенденция, ледообразование смещается на более ранние сроки. Однако изменения в датах первого ледообразования небольшие. Для всех станций оценки трендов не являются статистически значимыми. Окончательное очищение моря ото льда по большинству пунктов стало отмечаться в более ранние сроки. Значимый тренд сроков окончательного очищения составил $-15 \div -18$ дней за 70 лет (с максимумом по абсолютной величине для станции Ейск). Таким образом, за многолетний период продолжительность ледового сезона в Азовском море сократилась (за исключением района Геничеська). Значимый тренд составил $-19 \div -28$ дней за 70 лет. Сокращение продолжительности ледового сезона наиболее заметно в районах Керчи, Бердянска и Ейска. Межгодовая изменчивость продолжительности ледового сезона для станции Таганрог представлена на рисунке 9.

По результатам корреляционного анализа можно заключить, что внутри-вековые изменения индексов NAO и EA в холодный период года согласуются с динамикой ледового режима Азовского моря. Коэффициенты корреляции между индексами NAO, EA за декабрь–март и датами окончательного очищения моря ото льда для всех станций отрицательны (табл. 7). За период 1924–1994 гг. наибольший коэффициент корреляции с индексами NAO получен для станции Геничеськ ($R_{NAO} = -0,36$, $p = 99\%$). Коэффициент корреляции с индексами EA максимален для Приморско-Ахтарска ($R_{EA} = -0,47$, $p = 99\%$). Связи между продолжительностью ледового сезона, максимальной толщиной припайного льда и рассматриваемыми

индексами также отрицательные, и наиболее заметные для станций северо-восточного побережья моря.

Коэффициент корреляции между продолжительностью ледового сезона и индексами NAO максимальный для Таганрога ($R_{NAO} = -0,33$, $p = 99\%$). Корреляционная оценка степени влияния индексов EA на продолжительность ледового сезона наибольшая также для станции Таганрог ($R_{EA} = -0,31$, $p = 99\%$). Наиболее тесные связи между максимальной толщиной льда и индексами NAO, EA отмечены для Ейска, коэффициенты корреляции равны $-0,45$ и $-0,40$ ($p = 99\%$) соответственно. Таким образом, увеличение значений индексов NAO, EA в холодный период года соответствует более раннему очищению моря ото льда, сокращению ледового сезона и уменьшению максимальной толщины льда.

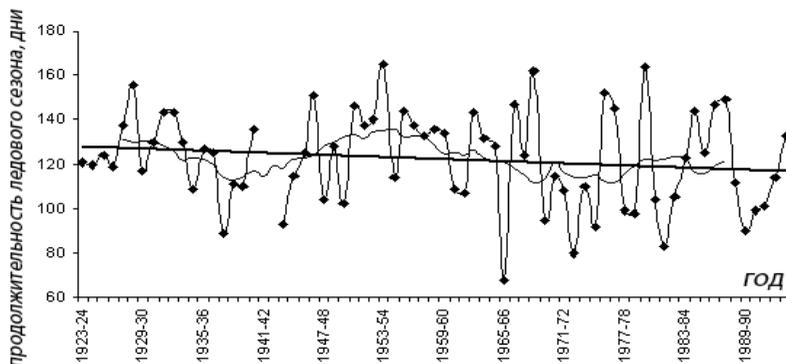


Рисунок 9. Межгодовая изменчивость продолжительности ледового сезона для станции Таганрог.

В то же время хорошо заметна согласованность колебаний температуры воздуха в регионе с динамикой ледовых условий (табл. 7). За период 1924–1994 гг. корреляционные оценки значимы для всех станций, исключая коэффициенты корреляции между температурой воздуха и максимальной толщиной льда в южных районах моря. Наибольшие коэффициенты корреляции получены для станций северо-восточного побережья моря. Для Ейска коэффициент корреляции сроков окончательного очищения моря ото льда с колебаниями температуры воздуха составляет $-0,74$ ($p = 99\%$).

Известно, что влияние NAO на климатические условия Европейского региона заметно усилилось в конце прошлого столетия [17]. Отмеченная закономерность прослеживается и во взаимосвязи внутривековой изменчивости NAO и динамики ледового режима Азовского моря. Это усиление вероятно связано как с положительным трендом индексов NAO с начала 70-х годов. XX века [18], так и с интенсификацией в этот период глобального повышения температуры воздуха. Для станций, расположенных в южной части Азовского моря связь наиболее тесная в 1946–1975 гг. Коэффициент корреляции для станции Мысовое составил $-0,49$ ($p = 99\%$). Для остальных станций корреляционные оценки наибольшие для периода 1963–1992 гг. с максимумом по абсолютной величине коэффициента корреляции для Бердянска ($R_{NAO} = -0,47$, $p = 99\%$). Аналогичные тенденции отмечены в из-

менчивости коэффициентов корреляции между колебаниями других характеристик ледового режима (продолжительности ледового сезона, максимальной толщины льда) и индекса NAO.

Таблица 7. Коэффициенты корреляции характеристик ледового режима с индексом NAO, EA и температурой воздуха за декабрь–март.

	Таганрог	Бердянск	Генчеськ	Ейск	Пр.-Ахтарск	Керчь	Темрюк	Мысовое
Окончательное очищение ото льда								
R_{NAO}	-0,31	-0,32	-0,36	-0,17	-0,31	-0,30	-0,14	-0,31
R_{EA}	-0,44	-0,38	-0,24	-0,40	-0,47	-0,26	-0,30	-0,15
R_{TB}	-0,67	-0,61	-0,53	-0,74	-0,56	-0,53	-0,59	-0,45
Продолжительность ледового сезона								
R_{NAO}	-0,33	-0,19	-0,19	-0,09	-0,24	-0,25	-0,10	-0,18
R_{EA}	-0,31	-0,18	-0,03	-0,19	-0,27	0,01	0,04	0,03
R_{TB}	-0,51	-0,62	-0,51	-0,65	-0,54	-0,41	-0,48	-0,35
Максимальная толщина льда								
R_{NAO}	-0,21	-0,32	-0,30	-0,45	-0,14	-0,30	–	-0,17
R_{EA}	-0,22	-0,28	-0,23	-0,40	-0,03	-0,21	–	0,05
R_{TB}	-0,54	-0,54	-0,40	-0,53	-0,49	0,00	–	-0,19

Примечание. Жирным шрифтом отмечены оценки значимые на 90% и выше уровне.

Спектральный анализ подтверждает наличие влияния изменчивости индекса NAO на ледовый режим Азовского моря. На рисунке 10 показаны спектральные характеристики колебаний индекса NAO и максимальной толщины припайного льда на станции Таганрог, полученные на основе данных за 1924–1994 гг. Погрешность расчета оценок спектральной плотности составляет 5% при максимальном временном сдвиге 21 год.

Из рисунка 10б видно, что основной вклад в общую дисперсию максимальной толщины льда вносят колебания с характерным периодом 2÷2,5 года. Также в спектре толщины льда обнаружен пик спектральной плотности на периоде 7,8 лет. Известно, что приблизительно такой же период имеет место в вариациях индекса NAO в зимне-весенний период (рис. 10а) [37]. Взаимная связь между отдельными гармониками анализируемых рядов иллюстрируется ко-спектром (рис. 10в). Когерентность для периода 7,8 лет превышает 95 % уровень значимости (рис. 10г). Сдвиг фаз составляет 154°. В ко-спектре индекса NAO и продолжительности ледового сезона также прослеживается спектральный пик на рассматриваемом периоде, и связь является значимой.

Таким образом, по материалам натуральных данных о характеристиках ледовых явлений за 1893–1994 гг., полученных на береговых станциях, проведено исследование изменчивости ледового режима Азовского моря. Рассмотрены статистические связи характеристик ледового режима моря с индексами Северо-Атлантического (NAO) и Восточно-Атлантического (EA) колебаний.

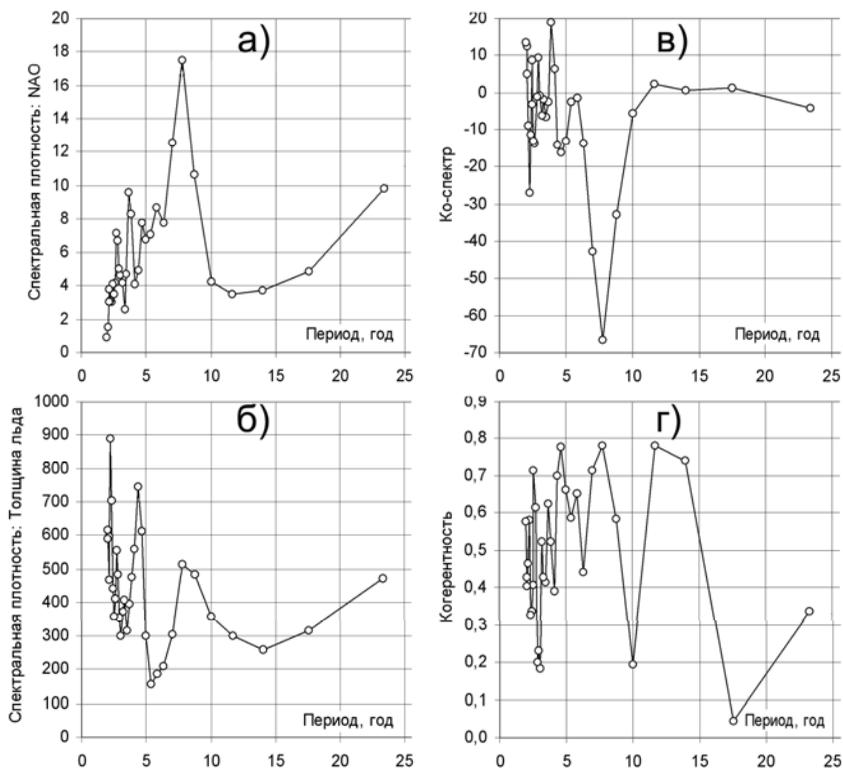


Рисунок 10. Спектральные характеристики колебаний индекса NAO (за период с декабря по март) и максимальной толщины льда.

Современное повышение температуры воздуха в исследуемом регионе, наиболее выраженное зимой и в первой половине весны, проявилось в изменении суровости зим. Количество мягких зим заметно возросло, суровых зим стало значительно меньше. Изменения в датах первого ледообразования невелики. Для всех станций оценки трендов не являются статистически значимыми. Полное окончательное очищение моря ото льда по большинству пунктов стало отмечаться раньше. Значимый тренд сроков окончательного очищения составил $-15 \div -18$ дней за 70 лет. Вместе с тем сократилась продолжительность ледового сезона. Значимый тренд составил $-19 \div -28$ дней за 70 лет. Сокращение продолжительности ледового сезона наиболее заметно в районах Керчи, Бердянска и Ейска.

Внутривековые изменения индексов NAO и EA в холодный период года согласуются с динамикой ледового режима Азовского моря. При этом соответствующие коэффициенты корреляции отрицательны: увеличение индексов NAO, EA в холодный период года соответствует более раннему очищению моря ото льда и сокращению ледового сезона. В то же время хорошо заметна согласованность ко-

лебаний температуры воздуха в регионе с изменчивостью ледовых условий. Корреляционные оценки отрицательны и значимы для всех станций. Спектральный анализ подтверждает наличие влияния изменчивости индексов NAO на ледовый режим моря. В спектре ледовых характеристик обнаруженный значимый пик на периоде 7,8 лет соответствует типичному периоду NAO. В 60–90 гг. XX века влияние NAO на динамику ледового режима региона усилилось.

Литература

1. *Ефимов В.В., Губанова Е.В.* Изменения климата Украины в XX веке. – Севастополь: МГИ НАНУ, 2003, 42 с.
2. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // IPCC.– 2007.– <http://www.ipcc.ch/>.
3. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Колебания и изменения климата на территории России // Известия Академии наук. Физика атмосферы и океана.– 2003. –Т. 39. № 2.– С. 166 - 185.
4. *Груза Г.В., Ранькова Э.Я.* Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология.– 2004.– № 4.– С. 50 – 66.
5. *Волощук В.М., Бойченко С.Г.* Реакція сезонного ходу приземної температури України на глобальне потепління клімату // Доповіді НАНУ.– 1997.– № 9.– С. 113 - 118.
6. *Горбач С.Б., Дьяков Н.Н., Фомин В.В., Мартынов Е.С.* Многолетние изменения температуры воздуха в Азовском регионе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАНУ. 2009. – вып. 18. – С. 158 – 167.
7. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 1: Азовское море // *Ильин Ю.П., Фомин В.В., Дьяков Н.Н., Горбач С.Б.* – МЧС и НАНУ, УкрНИГМИ.– Севастополь, 2009.– с. 402.
8. *Волощук В.М., Бойченко С.Г.* Вплив загального глобального потепління клімату на середньорічну інтенсивність атмосферних опадів в Україні // Доповіді НАНУ.– 1998.– № 6.– С. 125 - 130.
9. Клімат України. Під ред. *В.М.Ліпінського, В.А. Дячука, В.М.Бабіченко.* – Киев: Видавництво Раєвського, 2003, 343 с.
10. Гидрометеорологический справочник Азовского моря. – Л.: Гидрометеиздат. 1962. – 270 с.
11. Справочник по гидрологическому режиму морей и устьев рек СССР // Киев. – Т.3, Азовское море, вып.1. Прибрежная зона моря. 1970.– С. 24 – 49.
12. *Гоптарев Н.П., Таран Б.М.* Ледовые условия. // В кн.: Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 5, Азовское море. С.–Пб.: Гидрометеиздат, 1991. – С. 59 – 73.
13. *Боровская Р.В., Ломакин П.Д., Панов Б.Н., Спиридонова Е.О.* Современное состояние ледовых условий в Азовском море и Керченском проливе на базе спутниковой информации. Препринт. – Севастополь: МГИ НАНУ. 2008. – 42 с.
14. *Фомичева Л.А.* Льды в Азовском море // Труды ГОИН. 1986, вып. 168.– С. 3 – 10.

15. Думанская И.О., Федоренко А.В. Анализ связи ледовых характеристик неарктических морей европейской части России с макроциркуляционными атмосферными процессами. // Метеорология и гидрология. 2008.– № 12.– С. 82 – 95.
16. Букатов А.Е., Моисеева Е.А. Климатическая изменчивость ледового режима Азовского моря. // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАНУ. 2009. – С. 273 – 279.
17. Зверьяев И.И., Гулёв С.К. Сезонность и нестационарность изменчивости Европейского климата в двадцатом веке // Доклады Академии Наук. 2007.– т. 416, № 5. – С. 676 – 679.
18. Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperature and precipitation // Science. 1995.–Vol. 269. – P. 676 – 679.
19. Barnston, A.G. and Livezey R.E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. // Mon. Wea. Rev., 1987. – 115. – P. 1083 – 1126.
20. Букатов А.Е., Бабий М.В, Моисеева Е.А. Климатическая изменчивость температуры воздуха, количества осадков и режима облачности в районе Азовского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАНУ. 2009. – вып. 18. – С. 168 – 179.
21. Osborn T.J. Resent variations in the winter North Atlantic Oscillation // Weather. – 2006. –61, №12. – P. 353 - 355.
22. Ефимов В.В., Шакалова Е.С. О формировании атмосферных сезонных осадков в Черноморском регионе // МГЖ. – 2008. – №4. – С. 43 - 51.
23. Нестеров Е.С. О восточно-атлантическом колебании циркуляции атмосферы. // Метеорология и гидрология. 2009.– №12.– С. 32 – 40.
24. <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/ghcn/v2>
25. Peterson, T.C. and Vose R.S.. An overview of the Global Historical Climatology Network temperature database // Bulletin of the American Meteorological Society. – 1997.– 78 (12).– P. 2837 - 2849.
26. Peterson T.C., Vose R., Schmoyer R. and Razuvaev V. Global Historical Climatology Network (GHCN) quality control of monthly temperature data // International Journal of Climatology.– 1998.– 18 (11).– P. 1169 - 1179.
27. <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/gsoad/>
28. Алисов Б.П., Дроздов О.А., Рубинштейн Е.С. Курс климатологии. Ч. I и II. – Л.: Гидрометеиздат, 1952. – 487 с.
29. <http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell>
30. <http://www.cpc.noaa.gov/data/teledec/telecontents.shtml>
31. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии. – М.:Изд. МГУ, 1988. – 248 с.
32. Брукс М.И., Краузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. – Л., Гидрометиздат, 1963. – 415 с.
33. Blackman R.B. and Tukey J.W. The measurement of power spectra from the point of view of communication engineering // Dover Publications. 1958. –190 p.
34. <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/ghcn/daily/>
35. Groisman P.Y. and Rankova E.Y. Precipitation trends over the Russian permafrost-free zone: removing the artifacts of pre-processing // International Journal of Climatology.– 2001.– 21.– P. 657 - 678.

36. *Groisman, P.Y., Koknaeva V.V., Belokrylova T.A. and Karl T.R.* Overcoming biases of precipitation measurement: A history of the USSR experience // *Bulletin of American Meteorological Society.* – 1991. – 72 (11). – P. 1725 - 1733.
37. *Полонский А.Б., Семилетова Е.П.* О статистических характеристиках североатлантического колебания // *Морской гидрофизический журнал.* – Севастополь. 2002. – №3. – С. 28 – 42.
38. *Mitchell T.D., Jones P.D.* An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids // *International Journal of Climatology.* – 2005. – 25. – P. 693 - 712.
39. <http://www.cru.uea.ac.uk/>
40. <http://www.meteo.ru/>
41. Справочник по климату СССР. – Л.: Гидрометеиздат. 1967. – Вып. 10. Часть II. – 607 с.
42. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. – Л.: Гидрометеиздат. 1984. – Вып. 9. Часть 1. – 311с.

СОВРЕМЕННОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ В РАЙОНЕ ТИХООКЕАНСКОГО АКТИВНОГО ПОЯСА

Воронина Е.В., Копнин А.С.

*Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова
кафедра физики Земли.*

Цель данной работы - изучение современного поля снимаемых напряжений, сбрасываемых в процессе вспарывания непосредственно на разрыве, в районе активного пояса Тихого океана. Особенностью этого региона является наличие множества зон субдукции - мест, где океаническая кора погружается в мантию: Курило-Камчатская, Алеутская, Филиппинская, Японская и другие островные дуги, западное побережье Северной и Южной Америки. Именно здесь и происходит подавляющее число землетрясений, в том числе разрушительных и провоцирующих цунами.

Наиболее выразительным проявлением современной субдукции служат сейсмофокальные зоны, наклонно уходящие на глубину (рис.1, рис.2.) На рис.1а показаны эпицентры наиболее сильных землетрясений северо-западной части Тихого океана, на рис.1б – гипоцентры землетрясений на глубинном разрезе поперек зоны субдукции. На рис. 2а,б – аналогичные данные для центральной и юго-восточной части Тихого океана. Близ поверхности - под глубоководным желобом, а нередко и на его океанском обрамлении - очаги размещаются внутри литосферы, главным образом в ее верхней части. Нередко эти сбросы непосредственно устанавливаются сейсмическим профилированием. Максимальная сейсмическая активность сосредоточена на следующем отрезке отрезке Бенъофа, где она порождается конвергентным взаимодействием двух литосферных плит. Очаги размещаются преимущественно на их контакте, решение фокальных механизмов указывает на усилия сдвига, направление которых соответствует относительному смещению в ходе субдукции [1].

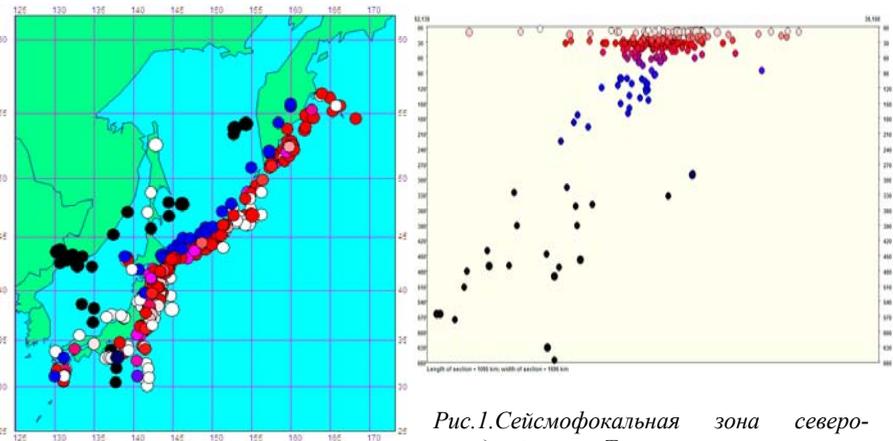


Рис.1. Сейсмофокальная зона северо-западной части Тихого океана.

Стоит заметить, что наклон сейсмофокальных зон меняется с глубиной, тем самым вырисовывается ее поперечный профиль [1]. Небольшие углы наклона у поверхности с глубиной, как правило, увеличиваются: сначала очень незначительно, затем следует отчетливый перегиб, за которым возможно и дальнейшее постепенное нарастание наклона, вплоть до вертикального (как в случае профиля у западного побережья Южной Америки).

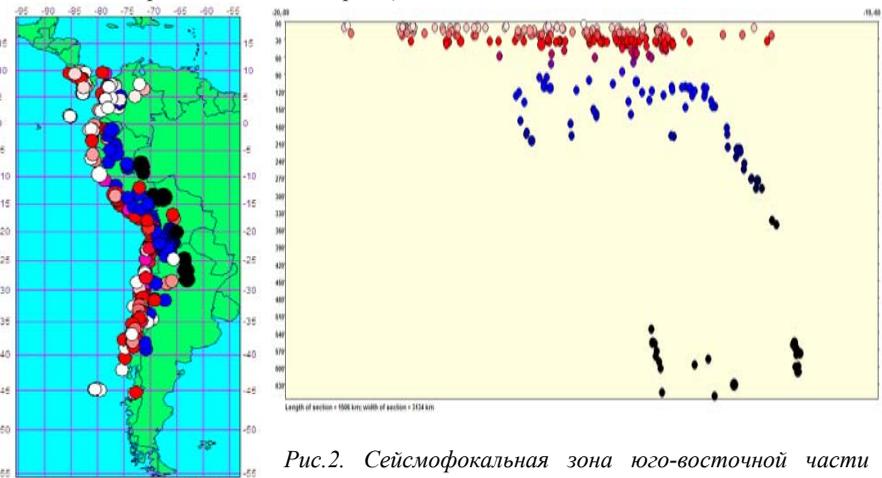


Рис.2. Сейсмофокальная зона юго-восточной части Тихого океана.

Однако на первом построенном профиле наблюдается равномерный уклон, и перегиб практически отсутствует. Вероятной причиной неравномерного нарастания крутизны уходящей в мантию сейсмофокальной зоны и соответствующих из-

гибов ее профиля считают уплотнение субдуцирующей литосферы вследствие фазовых переходов [1].

Близ поверхности преобладают растяжения, ориентированные полого, вкрест простирания желоба и обусловленные, как полагают, образованием сбросов при упругом изгибе литосферы перед ее погружением в зону субдукции. С такой трактовкой сбросов согласуется, их простирание, продольное по отношению к желобу и изменяющееся при его поворотах. Нередко эти сбросы непосредственно устанавливаются сейсмическим профилированием.

Глубже, где субдуцирующая плита погружается в астеносферу, очаги сдвиговых напряжений уже не обнаруживаются. Здесь и далее сейсмическая активность выражена очагами, которые возникают внутри субдуцирующей литосферы. Сейсмические очаги образуются в этой литосфере под действием напряжений, ориентированных наклонно в направлении субдукции.

Во многих случаях до глубин около 300 км прослеживается двойная сейсмофокальная зона [1]: очаги тяготеют к двум плоскостям, параллельным поверхности литосферы и отстоящим приблизительно на 25-40 км одна от другой. К нижней плоскости приурочены очаги сжатия, к верхней плоскости — очаги растяжения.

Источники напряженного состояния литосферы Земли.

Источники напряжений в земной коре можно разделить на три группы: - факторы, связанные с эндогенными, то есть внутренними, процессами, происходящими не только в земной коре, но также и в мантии Земли. Именно эти процессы генерируют как глобальное поле напряжений Земли, так и региональную динамику земной коры;

- экзогенные факторы, такие как покровные оледенения, нагрузка искусственных водохранилищ, эрозийная деятельность рек, откачка нефти, газа, воды с глубин в несколько километров. В формировании глобального поля напряжений эта группа факторов играет меньшую роль;

- космические факторы, например, ротационные силы Земли или силы, возникающие при быстром изменении скорости вращения планеты, а также приливное воздействие Луны.

Из всех перечисленных источников самый существенный вклад в общее поле напряжений вносят эндогенные процессы, которые и формируют поля напряжений разных рангов [2].

Из эндогенных процессов наиболее существенной является термогравитационная неустойчивость вещества мантии Земли, в особенности астеносферного слоя, в котором вязкость на 2-3 порядка меньше, чем в вышележащих слоях верхней мантии и земной коры [2]. Медленные движения вещества астеносферного слоя через вязкое трение передают усилия в вышележащую часть мантии и земную кору, то есть в литосферу, вызывая в ней напряжения и соответственно деформации. Напряжения могут возникать вследствие восходящих и нисходящих конвективных струй в мантии Земли, по некоторым предположениям, образующих двухъярусную систему конвективных ячеек. Реальное существование подобных очень медленных струйных потоков в мантии Земли подтверждается различными данными, и в первую очередь сейсмотомографией. Например, такие узкие, но весьма контрастные положительные и отрицательные гравитационные аномальные зоны приурочены к глубоководным желобам и молодым горно-складчатым соору-

жениям в Андах, Индонезии, Алеутской, Курильской, Японской и других островных дугах [2].

В горных областях подобного типа гравитационные аномалии обычно положительны [2], что свидетельствует об избытке масс, которому должно отвечать увеличение давления на глубинах примерно от 50 до 100 км, что и является источником напряжений в литосфере и земной коре. Создаваемое давление значительно превышает нормальное литостатическое, то есть давление, вызванное весом вышележащих пород.

Сейсмофокальные зоны также свидетельствуют о наличии сильнейшего сжатия в тех местах, где океаническая, более тяжелая и холодная кора погружается под континентальную, более легкую. Неоднородности верхней мантии, выявляемые под срединно-океаническими хребтами и древними платформами, также являются источниками напряжений в литосфере и земной коре. Поскольку современная поверхностная структура Земли определяется перемещением литосферных плит, то и напряжения сжатия-растяжения концентрируются в участках плит, имеющих соответствующий геодинамический режим. В срединно-океанических хребтах, в области дивергентных границ преобладает растяжение, а в зонах субдукции, представляющих собой конвергентные границы - сжатие. Жесткость (прочность) литосферных плит позволяет передавать напряжения, возникшие в одной ее части, на другие, находящиеся в нескольких тысячах километров от первых. Взаимодействие литосферных плит вносит наибольший вклад в создание современного поля напряжений в самой верхней оболочке Земли. При более детальном рассмотрении устанавливается еще большее количество факторов, вызывающих локальные поля напряжений. Например, постоянно действующая сила гравитации, которая хоть сама и не производит тектонической работы, но влияет на формирование местного поля напряжений. Дополнительные источники напряжений в земной коре связаны с участками разогрева, местного плавления, вулканизма. Однако, возникающие при этом термонапряжения действуют на ограниченном пространстве, лишь искажая более обширное поле напряжений.

Дополнительные напряжения в земной коре вызываются контрастным рельефом, растущими горными сооружениями. Вес последних влияет на формирование напряжений в соседних участках литосферы, которая упруго реагирует на эту нагрузку. Локальные напряжения могут быть созданы движением подземных вод или каких-либо иных флюидов в газо- и водонасыщенных породах. Напряжения в литосфере, возникающие в результате экзогенных процессов, существенно меньше напряжений, вызываемых эндогенными причинами.

Космические факторы, в частности ротационные силы, создают напряжения, не превышающие 0,1 МПа, а приливные силы в результате взаимодействия Луны, Солнца и Земли провоцируют напряжения до 10 МПа, в то время как эндогенные силы формируют поля напряжений в несколько сот мегапаскалей [2].

Результаты измерений напряжений, существующих на различных по геодинамической природе границах плит, хорошо подтверждали те теоретические модели, которые были созданы для описания механизмов напряжений. Например, все активные континентальные окраины, где океаническая кора погружается под континентальную, характеризуются сжимающими горизонтальными напряжениями, причем ориентировка оси сжатия, как правило, оказывается перпендикулярной простиранию активной окраины. Особенно хорошо это подтверждается сейс-

мологическими данными. Горизонтальное сжатие в пределах Курильской и Японской островных дуг оценивается в 200-400 МПа [2]. Примечательно, что и внутренние участки литосферных плит, находящиеся вдали от активных краин, также находятся в состоянии субгоризонтального сжатия.

Таким образом, большая часть земной коры охвачена субгоризонтальным сжатием. Обстановки растяжения хотя и распространены довольно широко, но сосредоточены преимущественно в узких рифтовых зонах как в океанах, так и на континентах или в морских впадинах с корой океанического типа, например: в Японском, Филиппинском, Тирренском, Альборанском, Эгейском морях [2]. В некоторых из них, судя по распределению магнитных аномалий, можно предполагать оси спрединга (растяжения), однако чаще всего оно носит рассеянный характер.

Напряжения, снимаемые на разрывах в процессе землетрясений.

Напряжения, снимаемые на разрыве, характеризуют процесс динамического разрушения среды и являются важными для определения ее физических параметров. Наиболее применимой кинематической моделью очага землетрясения является модель упругого сдвига, в которой смещение Δu устанавливается на поверхности разрыва S в упругой среде. Смещение является функцией пространственных координат и времени. На практике поле смещений оказывается очень непростым из-за сложности структуры очаговых зон землетрясений.

Обычно предполагается, что вектор смещения параллелен площадке разрыва. Положим величину подвижки \bar{D} , равной значению Δu по завершении разрыва. Тогда, средняя подвижка по разрыву $\bar{D} = \frac{1}{S} \int D(r) dS$, где: $D(r)$ - смещение на элементах разрыва, r - радиус-вектор подвижки, S - площадь площадки разрыва. В большинстве случаев форма функции смещения в процессе вспарывания $D(r)$ трудноопределима, и только среднее значение подвижки по разрыву \bar{D} может быть определено достоверно.

Амплитуда сейсмических волн, период которых превышает характерное время вспарывания разрыва, пропорциональна величине [3]:

$$M_0 = \mu \bar{D} S,$$

статического сейсмического момента. Здесь μ - модуль сдвига в области источника.

Размер площадки разрыва S сложнее определить сейсмологическими методами. Наиболее точно он определяется по значениям критической частоты спектров, излучаемых длиннопериодных волн. [4,6,7]. Экспериментально установлена линейная зависимость $\lg(S)$ от $\lg(M_0)$ с угловым коэффициентом 2/3 [4,6,7]. Эта линейная зависимость может быть объяснена исходя из постоянства снимаемых напряжений, что может быть справедливо для очень ограниченного диапазона напряжений (3-6 МПа).

Таким образом,

$$M_0 = \frac{1}{C} \mu \Delta \varepsilon S^{\frac{3}{2}} = \frac{1}{C} \Delta \sigma S^{\frac{3}{2}},$$

где $\Delta \sigma = \mu \Delta \varepsilon$ - снимаемые напряжения, C – константа порядка единицы, зависящая от геометрии площадки разрыва.

Логарифмируя и преобразуя полученное равенство, имеем:

$$\lg S = \frac{2}{3} \lg M_0 - \frac{2}{3} \lg \frac{\Delta \sigma}{C}.$$

По литературным данным, практически все экспериментальные точки лежат в области, соответствующей снимаемым напряжениям (1-10) МПа. Для сильнейших землетрясений это диапазон (10-100) МПа.

В действительности распределение снимаемых на площадке разрыва напряжений крайне неравномерно, что обусловлено сложностью процесса испаривания по нескольким площадкам разрыва. Таким образом, выше среднего значение напряжений было получено с некоторой неопределенностью. Тем не менее, точно выяснено, что значение снимаемых на разрыве напряжений, для землетрясений средней силы, усредненное в масштабе расстояний до 30 километров и больше, не превышает 10 МПа (обычно около 5 МПа) [4]. Значение снимаемых при слабых землетрясениях напряжений лежит в диапазоне (0,1-10) МПа, за редким исключением [5].

Исходные данные и результаты.

Для построения современного поля напряжений были использованы данные каталогов геофизической службы США [9].

В этих каталогах содержатся данные о времени, координатах (широта и долгота), глубине гипоцентра, моментной магнитуде, величине статического сейсмического момента, ориентации главных осей напряжений и нодальных плоскостей. Возможен поиск событий по совокупности параметров. В этой работе использовались данные о землетрясениях с моментной магнитудой более 6, произошедших в период с 1991 по 2010 гг. в районе Тихоокеанского активного пояса. Используя данные об ориентации осей сжатия-растяжения в проекции на поверхность Земли (азимутальный угол) и координатах эпицентров землетрясений, были построены карты ориентации современного поля напряжений, представленные на **рис.3** и **рис.4**.

Стоит заметить, что для большого числа рассмотренных землетрясений ориентация осей сжатия и растяжения довольно близки. Такая ситуация характерна для событий районов Курило-Камчатской дуги, западного побережья Америки, Алеутской дуги, Индонезии. Взаимное отклонение осей сжатия-растяжения здесь не превышает 20°.

Это является свидетельством доминирующего вертикального смещения в очагах землетрясений, характерного для механизмов типа взбросов и сбросов [3].

Однако, в других регионах ситуация противоположная. В районе архипелага Кермадек, Новой Зеландии и Соломоновых островов главные оси напряжений взаимно перпендикулярны с отклонением около 10°, что свидетельствует о преимущественно горизонтальном смещении и определяет механизмы очага типа сдвигов.

Такой результат в целом согласуется с данными других авторов [7].



Рис.3. Ориентация осей сжатия в очаговых зонах сильных землетрясений.



Рис.4. Ориентация осей растяжения в очаговых зонах сильных землетрясений.

Расчет снимаемых напряжений

Был произведен расчет снимаемых напряжений в районе Курило-Камчатской дуги и восточной окраины Тихого океана по следующему алгоритму. По известным значениям моментной магнитуды M_w и эмпирической зависимости M_w от величины средней подвижки по разрыву \bar{D} была проведена оценка \bar{D} [6]:

$$M_w = 6,93 + 0,82 \lg \bar{D}, \quad \text{откуда} \quad \bar{D} = 10^{\frac{M_w - 6,93}{0,82}}.$$

Затем, по известным значениям статического сейсмического момента M_0 и рассчитанным величинам \bar{D} , были найдены оценки площади площадки разрыва:

$$S = \frac{M_0}{\mu \bar{D}}.$$

Значения модуля сдвига μ на глубинах до 150 км изменяются в диапазоне от 26 ГПа у поверхности до 52 ГПа [4]. Для оценки S было взято среднее для земной коры значение модуля сдвига μ - 30 ГПа.

Далее, из представления о связи M_0 с величиной снимаемых напряжений $\Delta\sigma$ были рассчитаны значения снимаемых напряжений:

$$\Delta\sigma = \frac{M_0 C}{S^{3/2}}$$

Стоит заметить, что рассчитаны были так называемые кажущиеся снимаемые напряжения без учета константы C - геометрической константы, определяющей форму очаговой зоны. Однако, величина кажущихся снимаемых напряжений совпадает с $\Delta\sigma$ по порядку величины, так как, например, для плоской очаговой зоны $C=0,5$. Расчет был проделан для района северо-западной части Тихого океана - Курило-Камчатской дуги и прилегающих территорий, и - юго-восточной части Тихого океана, для западного побережья Латинской Америки (табл.1, табл.2). Приведены характеристики наиболее сильных землетрясений с магнитудой более 7,5.

Таким образом, при среднем значении снимаемых напряжений 14 МПа в районе Курило-Камчатской дуги и 10 МПа на восточной окраине Тихого океана их величина лежит в диапазоне (5–30) МПа и (4–37) МПа соответственно, для землетрясений с моментной магнитудой больше 7,5. Эти значения хорошо коррелируют с результатами, полученными исследователями для оценки величины снимаемых напряжений по сейсмическим данным [4,8]. Неточность в определении $\Delta\sigma$ обусловлена, в первую очередь, тем, что в расчетах не учитывается влияние формы очаговой зоны (геометрическая константа C порядка единицы), а также не берется в рассмотрение изменение модуля сдвига с глубиной и в связи с неоднородностью среды.

Повышенные значения снимаемых напряжений обычно соответствуют повышенной скорости испарывания в более плотных структурах горной породы. По полученным нами данным делать выводы о прочностных параметрах среды не представляется возможным. Этот вопрос требует более представительных наблюдений.

Таблица 1. Результаты вычислений снимаемых напряжений в районе Курило-Камчатской дуги.

Дата	Широта	Долгота	Глубина, км	Магнитуда M_w	Сейсм. момент M_0 , $10^{20} H \cdot m$	Снимаемые напряжения $\Delta\sigma$, МПа
1991/12/22	45.580	151.550	31.2	7.6	2.8	5,22
1993/01/15	43.060	144.290	100.0	7.6	2.7	5,32
1993/07/12	42.710	139.280	16.5	7.7	4.7	6,14
1994/10/04	43.600	147.630	68.2	8.3	30	30,42
1994/12/28	40.560	142.990	27.7	7.7	4.9	6,01
1995/12/03	44.820	150.170	25.9	7.9	8.2	10,79
1997/12/05	54.310	161.910	33.6	7.7	5.3	5,78
2003/09/25	42.210	143.840	28.2	8.3	31	29,93
2006/04/20	60.890	167.050	12.0	7.6	3.0	5,04
2006/11/15	46.710	154.330	13.5	8.3	35	28,17
2007/01/13	46.170	154.800	12.0	8.1	18	16,92

Таблица 2. Результаты вычислений снимаемых напряжений в районе восточной окраины Тихого океана.

Дата	Широта	Долгота	Глубина, км	Магнитуда M_w	Сейсм. момент M_0 , $10^{20} H \cdot m$	Снимаемые напряжения $\Delta\sigma$, МПа
1991/04/22	10.100	-82.770	15.0	7,6	3.3	4,81
1992/09/02	11.200	-87.810	15.0	7,6	3.4	4,74
1995/07/30	-13.820	-67.250	28.7	8,0	12	13,60
1996/02/21	-24.170	-70.740	15.0	7,5	2.2	3,87
1996/11/12	-9.950	-80.230	37.4	7,7	4.6	6,21
2001/01/13	-15.040	-75.370	56.0	7,7	4.6	8,16
2001/06/23	12.970	-89.130	29.6	8,4	37	37,04
2001/07/07	-17.280	-72.710	25.0	7,6	3.2	4,88
2005/06/13	-17.450	-72.450	94.5	7,7	5.3	10,62
2007/08/15	-20.020	-69.230	33.8	8,0	11	14,20
2007/11/14	-13.730	-77.040	37.6	7,7	4.8	6,08

Заключение.

В результате проведенной работы можно сформулировать следующие выводы:

1. современное поле напряжений в рассматриваемом регионе достаточно неоднородно, что обусловлено локальной тектоникой отдельных участков, а также напряжениями в самой субдуцирующей плите;
2. средние величины снимаемых напряжений (10-15 МПа) соответствуют результатам полученным другими исследователями, однако эти значения, возможно, завышены, т.к. в работе не учитывалось влияние формы очага и зависимость модуля сдвига от глубины;
3. величины снимаемых напряжений могут быть использованы для анализа прочностных свойств активной среды, и их анализ является актуальной задачей физики очага.

Литература

1. В.Е. Хаин, М.Г. Ломизе. Геотектоника с основами геодинамики. М: Изд-во МГУ, 1995 г.
2. Н.В. Короновский. Напряженное состояние земной коры. Сорковский образовательный журнал, 1997 г.
3. Е.В.Воронина. Физика очага землетрясений. М., МГУ, Физ. Фак-т, 2010.
4. Kanamori H.. The state of stress in the Earth's lithosphere. 1980
5. И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. Основы механики горных пород. Л: «Недра», 1989г.
6. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. 1994.
7. Heidbach, M. Tingay, A. Barth, J. Reinecker. World stress map. 2009
8. Ю.Л. Ребецкий. Механизм генерации тектонических напряжений в областях больших вертикальных движений. 2008 г.
9. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/>

**ЧИСЛЕННАЯ ГИДРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ,
ИНИЦИИРУЕМЫХ АТМОСФЕРНЫМИ ПРИЛИВАМИ**

А.А. Гаврилов

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

Представлена численная гидротермодинамическая модель зарождения и эволюции метеорологических крупномасштабных процессов на Земле, инициируемых атмосферными приливами, как термическими, так и гравитационными (солнечными и лунными). С помощью численных экспериментов показано, что атмосферные приливы играют существенную роль в формировании метеорологических крупномасштабных процессов (а, значит, и долгосрочной погоды) в среднеширотной и полярной тропосфере обоих полушарий.

Ранее [1-3] нами был предложен новый концептуальный подход к зарождению метеорологических крупномасштабных процессов на Земле. В рамках этого подхода зарождение таких процессов может обуславливаться, помимо других известных механизмов, также и атмосферными приливами, которые являются источниками регулярных возмущений для неустойчивой в гидротермодинамическом смысле зональной циркуляции в тропосфере. В работах [4-5] нами было показано, что незначительные по величине атмосферные приливы, как термические, так и гравитационные, инициируют зарождение значительных, превышающих их по амплитуде на 2-3 порядка, крупномасштабных возмущений температуры, давления, плотности и скорости ветра в земной тропосфере обоих полушарий.

В данной работе представлены результаты новых исследований в этом направлении.

1. Разработанная численная гидротермодинамическая модель зарождения и эволюции метеорологических крупномасштабных процессов на Земле, обусловленных атмосферными приливами, основана на созданных нами алгоритмах чис-

ленных решениях линеаризованных уравнений геофизической гидродинамики для земных атмосферных термических приливов. Эти алгоритмы успешно были применены нами в начале 90 годов прошлого столетия для создания полуэмпирической модели атмосферных термических приливов (АТП) [6-7]. При ее создании мы использовали теорию возмущений [8]. Т.е. полная система уравнений геофизической гидродинамики линеаризовывалась и полученная нестационарная система уравнений для возмущений первого порядка считалась исходной для определения глобальных широтно-высотных распределений метеорологических параметров атмосферных приливов в любое время суток и года путем ее численного решения.

Для нашего случая, при наличии гравитационных потенциалов Солнца и Луны с учетом влияния силы вязкости, ионного торможения и электромагнитных сил и зонального ветра V_0 нестационарная гидротермодинамическая система уравнений АТП в сферической системе координат θ, φ, r , вращающейся вместе с Землей с угловой скоростью ω , для нахождения возмущений первого порядка запишется в следующем виде:

$$\frac{dv}{d\tau} + lv - (1 - \mu^2) \left\{ \frac{\partial V}{\partial \mu} v - \frac{\partial V}{\partial z} w \right\} = \hat{F}v + s \cdot \sqrt{1 - \mu^2} \cdot U_g(\mathcal{G}), \quad (1)$$

$$\frac{du}{d\tau} + lv - \sigma(1 - \mu^2) \left\{ \frac{\partial p}{\partial \mu} + \frac{1}{\bar{H}} \left(\rho - \frac{p}{2} \right) \right\} = \hat{F}u, + \sqrt{1 - \mu^2} \frac{\partial}{\partial \mu} U_g(\mathcal{G}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \mathbf{S} + \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{H} \left(\frac{1}{2} + \frac{\partial H}{\partial z} \right) w = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} + \mathbf{G} + \gamma \frac{\partial w}{\partial z} - \left(\frac{1 - \gamma/2}{H} \right) w = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \frac{1}{2H} \left(\frac{1}{2} + \frac{\partial H}{\partial z} \right) w = -\frac{1}{\gamma} \left\{ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} + \frac{1}{H} \left(\mathbf{S} - \frac{\mathbf{G}}{2} \right) \right\}. \quad (5)$$

Здесь первые два уравнения движения, третье уравнение неразрывности, четвертое - притока тепла, а последнее получено дифференцированием уравнения статики

$$H \frac{dp}{dz} = \frac{p}{2} - \rho. \quad (6)$$

В уравнениях приняты следующие обозначения:

$$u = \frac{u_1}{a\omega} \cdot \sin \theta \sqrt{p_0}, \quad v = \frac{v_1 \sin \theta}{a\omega} \sqrt{p_0}, \quad w = \frac{w_1}{\omega} \sqrt{p_0}, \quad (7)$$

$$\rho = \frac{\rho_1 g H}{\sqrt{p_0}}, \quad q = \frac{Q_0(\gamma - 1)}{\omega g H} \sqrt{p_0}, \quad H = \frac{RT_0}{g}, \quad V = \frac{V_0}{a \cdot \omega \cdot \sin \theta} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{\rho_1}{\sqrt{\rho_0}}, \quad \tau = \omega t, \quad \mu = \cos \theta, \quad \sigma = \frac{gH}{(a\omega)^2}, \quad \tilde{H} = \frac{\sigma}{2\mu\nu}, \quad (9)$$

$$\hat{L} = \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{2H}, \quad \hat{F} = \tilde{\nu}\hat{L}^2 - \tilde{K}, \quad \frac{d}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial \tau}, \quad l = 2\mu(l + \nu - \chi), \quad (10)$$

$$G = -\gamma \frac{\partial}{\partial \mu} \frac{u}{\mu} + \frac{(1-\gamma/2)}{\tilde{H}} u - q \quad (11)$$

$$S = -\frac{\partial}{\partial \mu} \frac{v}{\mu} + \frac{1}{\tilde{H}} \left(\frac{1}{2} + \frac{H}{\tilde{H}} \frac{\partial}{\partial z} \frac{H}{z} \right) u, \quad (12)$$

$$U_g(\vartheta) = U_s(\vartheta) + U_l(\vartheta); \quad U_s(\vartheta) = \sum_{i=2}^{i=n} U_i(\vartheta); \quad U_l(\vartheta) = \sum_{j=2}^{j=n} U_j(\vartheta); \quad (13)$$

$$U_i(\vartheta) = g \cdot a(M/M_s) \cdot (a/R_s)^{i+1} \cdot P_i(\cos \vartheta); \quad (14)$$

$$U_j(\vartheta) = g \cdot a(M/M_l) \cdot (a/R_l)^{j+1} \cdot P_j(\cos \vartheta); \quad (15)$$

где

$u_1, v_1, w_1, \rho_1, \rho_1$ - колебания соответственно меридиональной, зональной и вертикальной скорости, давления и плотности;

ρ_0, ρ_0, T_0 - средние значения давления плотности и температуры; Q_0 - приток тепла в ед. объем;

γ - отношение удельных теплоемкостей;

R - газовая постоянная;

ν - вязкость;

K - ионное торможение;

χ - холловская проводимость;

s -долготное волновое число;

$z_0=200$ км - высота верхней границы атмосферы;

a - радиус Земли;

$R_s; R_l$ - расстояние от рассматриваемой точки единичной массы в атмосфере Земли до Солнца и Луны соответственно;

ϑ - зенитный угол в горизонтальной системе координат;

$U_s(\vartheta), U_l(\vartheta)$ - гравитационный потенциал Солнца и Луны соответственно;

$U_i(\vartheta), U_j(\vartheta)$ - члены разложения гравитационного потенциала в ряд по степеням $a/R_s; a/R_l$ соответственно;

$P_i(\cos \vartheta)$; $P_j(\cos \vartheta)$; - полиномы Лежандра.

Величины, определяющие среднее состояние атмосферы, связаны уравнением состояния, статики, геострофического и термического ветра

$$\rho_0 = \rho_0 g H; \quad \frac{\partial \rho_0}{\partial z} = -\frac{\rho_0}{H}; \quad \frac{\partial \rho_0}{\partial \mu} = -\frac{\rho_0}{H},$$

$$\frac{\partial T_0}{\partial \mu} = \frac{2 \cdot \omega \cdot \mu \cdot \frac{\partial V}{\partial z} \cdot H \cdot a}{R \cdot \sqrt{1 - \mu^2}} \quad (16)$$

2. Присутствие в решаемых уравнениях градиентов зонального ветра по широте ($\frac{dV_0(\theta, z)}{d\theta}$) и по высоте ($\frac{dV_0(\theta, z)}{dz}$) может приводить к неустойчивым

растущим решениям. На возможность такого сценария указывал, например, и Л.А. Дикий [8]: "...сколь бы ни была мала скорость ветра, найдется такая область спектра, что вводимого возмущения уже достаточно для слияния собственных значений... Вторая область, где сразу же может появиться неустойчивость, это область длинных и медленных гравитационно-гироскопических волн...". Для решения системы уравнений (1)-(5) мы спланировали и провели серию численных экспериментов.

Первоначально необходимо было выбрать модель зонального ветра в тропосфере, возмущение которого атмосферными приливами в дальнейшем исследовалось, а также определиться с моделями атмосферных приливов, которые являются регулярными возмущениями зональной циркуляции в наших численных экспериментах. Для расчетов была выбрана, одна из типичных многочисленных моделей зональной циркуляции в тропосфере [9], с максимальными западными ветрами в зимнем полушарии и с чуть-чуть меньшими западными ветрами в летнем полушарии. В качестве регулярных возмущений рассматривались атмосферные приливы, как термические, обусловленные поглощением солнечной радиации озоном и водяным паром атмосферой, так и гравитационные. В численных экспериментах рассчитывались параметры только лунных атмосферных приливов, поскольку они мощнее и более изменчивы, по сравнению с солнечными гравитационными.

Поскольку до этого на нашей модели АТП исследовались атмосферные термические приливы, то в первом численном эксперименте были проверены возможности АТП для расчета атмосферных гравитационных приливов. На рис. 1, в качестве примера, представлен широтно-высотный рельеф амплитуды полусуточного приливного давления с $s=2$, обусловленного Луной. Можно отметить, что наши расчетные значения для амплитуды давления полусуточного лунного прилива хорошо соответствуют современным моделям лунных атмосферных приливов, например модели [10]. Отметим также амплитуду полусуточного лунного давления на уровне Земли в районе экватора. Там ее значение максимально и равно в этом численном эксперименте 70 мкбар, что соответствует значению амплитуды лунной полусуточной гармонике температуры 0.01С.

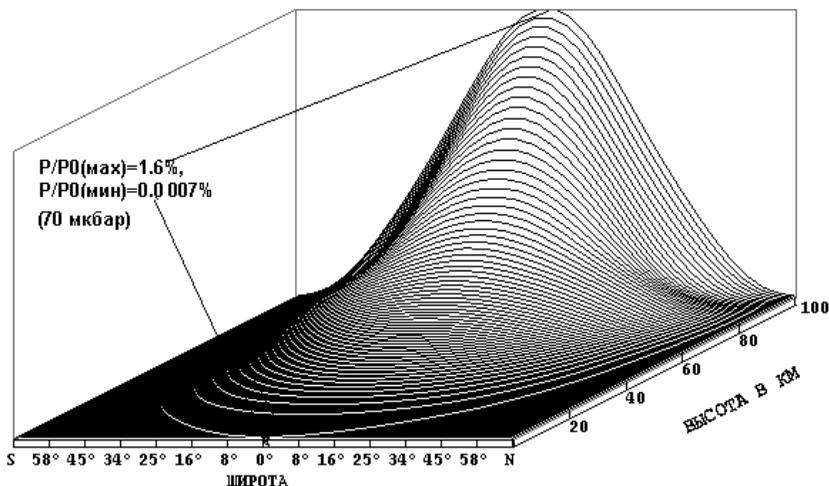


Рис.1. Широтно-высотный рельеф амплитуды полусуточного приливного давления за счет луны (P/P_0 в %; P_0 -среднесуточное давление на уровне z_i). (Лето в N полушарии).

3. После задания модели зонального ветра в тропосфере и источников регулярных возмущений зонального потока (атмосферных приливов) система уравнений (1)-(5) интегрировалась численно согласно алгоритму, разработанному в [6]. Неустойчивые растущие решения системы уравнений (1)-(5) для метеорологических параметров представлялись в следующем виде:

$$u, v, w, p, \rho, T \approx \exp(\zeta \cdot t) \cdot \exp - i \cdot (\Omega \cdot t + s\varphi). \quad (17)$$

В выражении (14) $1/\zeta$ -характерное время нарастания решения; $2 \cdot \pi / \Omega$ - период неустойчивого решения для каждого конкретного долготного волнового числа s .

На рис. 2 приведен, полученный в численном эксперименте, широтно-высотный рельеф неустойчивого растущего решения для температуры, которое инициируется в численной модели регулярными возмущениями в виде солнечных 8 часовых термических приливов (обусловленных поглощением солнечной радиации озоном и водяным паром) с $s=3$, которые также вычисляются в этом численном эксперименте. Время нарастания амплитуды этого возмущения в e раз составило ≈ 45 часов. Период вариации возмущения составил 14.6 суток.

Как видно из рисунка, растущее возмущение расположено в средних и высоких широтах обоих полушарий. Разумеется, меняя профиль зональной циркуляции в численных экспериментах, можно менять местоположение профиля неустойчивого возмущения по широте.

Профиль на рис. 2 построен через 20 суток развития гидротермодинамического процесса нарастания возмущения, инициированного атмосферным термическим приливом. Как видно из рисунка, некоторые точки профиля температуры имеют значения -25°C , $+16^{\circ}\text{C}$. Из теории атмосферных термических приливов [10] известно, что самый значительный из атмосферных термических приливов, полусуточный, ответственен за температуру с максимальным значением всего 0.1°C на уровне Земли. Конечно, к расчетам нарастающих решений на линеаризованной модели нужно и относиться, как к линейным, но, общую картину зарождения и эволюции, нарастающих за счет гидродинамической неустойчивости решений, инициированных атмосферными приливами, наша модель описывает корректно.

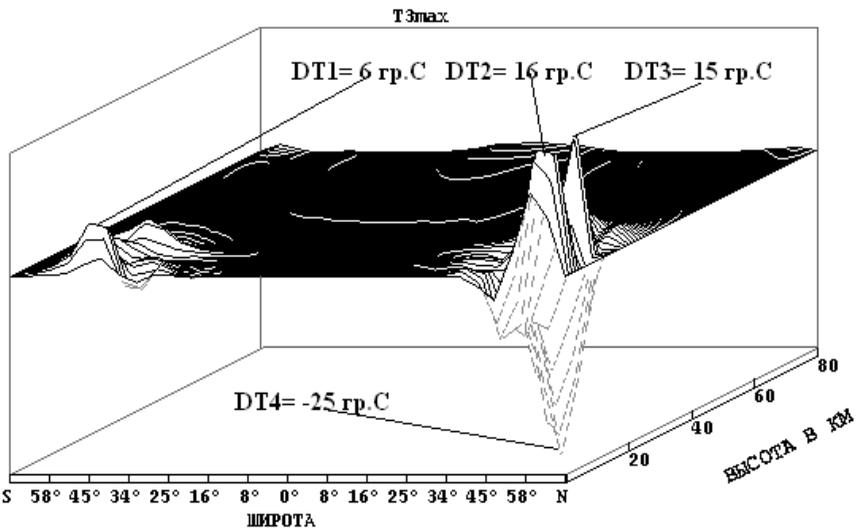


Рис. 2. Широтно-высотный рельеф возмущений температуры (в градусах С), инициируемых 8 часовым атмосферным приливом ($s=3$). Источник приливов – поглощение солнечной радиации озоном и водяным паром в период летнего солнцестояния в Северном полушарии.

На рис. 3 приведен, полученный в следующем численном эксперименте, широтно-высотный рельеф неустойчивого растущего решения для температуры, которое инициируется в численной модели регулярными возмущениями в виде лунных 8 часовых атмосферных приливов, с тем же долготным волновым числом $s=3$. Как видно из рисунка, рельеф возмущения температуры похож на рельефом возмущения температуры, инициируемым термическими приливами, и который был приведен на рис. 2.

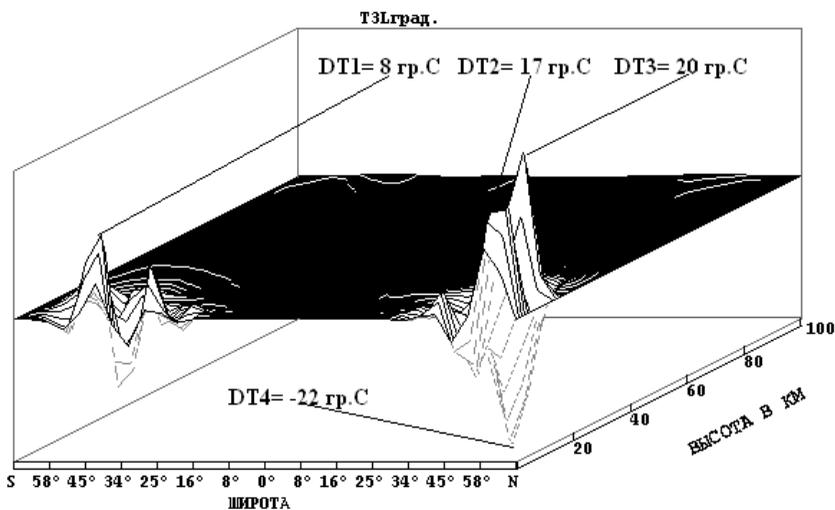


Рис. 3. То же самое, что и на рис. 2, но для регулярных возмущений в виде лунного 8 часового прилива.

4. Перейдем к описанию следующего численного эксперимента данной работы. В линейных численных моделях решения пропорциональны начальным возмущениям, поэтому вполне логично ожидать, что решения системы уравнений (1)-(5) будут зависеть от начальных параметров регулярных возмущений, в том числе и от фазы φ_1 лунного приливообразующего источника. Поскольку специфика атмосферных лунных приливов обусловлена, так называемым лунным запаздыванием, то характерные фазы (фазы максимумов) лунных приливов испытывают постоянные изменения. Поэтому для следующего численного эксперимента значение фазы 8 часового приливообразующего источника, по отношению к значению фазы в предыдущем численном эксперименте, сдвигалось на π , что соответствует временному сдвигу фазы на 4 часа для 8 часового прилива. Такие вариации значений сдвигов фаз для лунных приливов можно легко обнаружить в любом астрономическом ежегоднике.

На рис. 4 приведен широтно-высотный рельеф растущего решения, которое обусловлено регулярным возмущением - 8 часовым лунным атмосферным приливом с $s=3$, с той же амплитудой, но со смещенной начальной фазой на π относительно ее значения из предыдущего эксперимента.

Для этого численного эксперимента было также рассчитаны характерное время роста неустойчивого решения и период его изменения. Как и следовало ожидать, их значения совпали со значениями этих параметров неустойчивости из предыдущего численного эксперимента. В тоже время, анализ рис. 4 показал, что контуры рельефа возмущенной температуры, инициируемой 8 часовым лунным

атмосферным приливом, имеют совершенно другой вид по сравнению с его характерными очертаниями, приведенными на рис. 3.

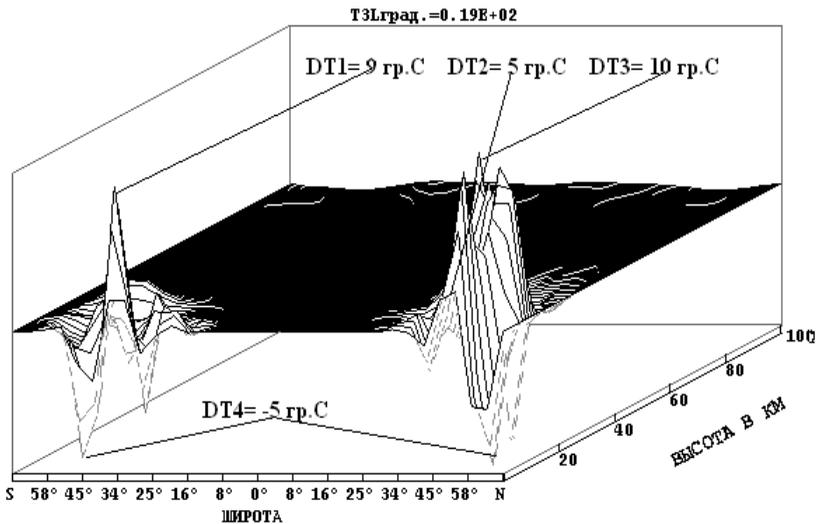


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но для значения фазы атмосферного лунного 8 часового прилива, сдвинутого на π , относительно его значения из предыдущего эксперимента.

Даже беглый анализ визуальных результатов численных экспериментов, представленных на рис. 3 и на рис. 4, показывает, что атмосферные лунные приливы могут инициировать зарождение длиннопериодных метеорологических крупномасштабных процессов, начальная фаза зарождения которых жестко связана с, непрерывно меняющимся, положением на небесной сфере лунного приливообразующего источника. При этом важно подчеркнуть, что основные характеристики зародившихся, благодаря атмосферным приливам, метеорологических крупномасштабных возмущений - характерное время роста возмущений и период их характерных изменений, жестко зависят только от долготного расположения (волнового числа s) начальных регулярных возмущений (в нашем случае атмосферных приливов), инициирующих их зарождение.

5. Анализ результатов численных экспериментов еще раз подтвердил наши выводы о том, что незначительные по величине атмосферные приливы (в том числе и лунные), при наличии типичной зональной циркуляции в тропосфере, инициируют зарождение значительных, превышающих их по амплитуде на 2-3 порядка, крупномасштабных возмущений температуры, давления, плотности и скорости ветра в тропосфере.

Проведенный анализ также показал, что неустойчивые решения, возникающие в численных экспериментах, обусловлены исключительно наличием вертикальных градиентов зональной циркуляции в тропосфере.

Для каждого численного эксперимента определялись также меридиональные функции тока ψ_u , которые позволяли наглядно описать эволюцию растущих решений, возникающих в численной модели. Меридиональные функции тока ψ_u для сферической вращающейся системы координат определялись интегрированием известной зависимости меридиональной скорости ветра U от производной $\partial\psi_u / \partial z$, заимствованной, например, из [6]. В [6] для этой зависимости получено следующее выражение:

$$U = e^{\frac{z}{H}} \cdot \frac{1}{\sin \theta} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (18)$$

Построенные широтно-высотные изолинии меридиональных функций тока растущих решений наглядно продемонстрировали, что крупномасштабные возмущения, которые инициируют атмосферные приливы, как термические, так и гравитационные, представляют собой цепочку тороидальных (тэйлоровских) вихрей, расположенных по направлению меридиана от одного полюса до другого.

В качестве примера, на рис. 5 приведены широтно-высотные изолинии меридиональной функции тока, построенные нами в одном из численных экспериментов для условий летнего солнцестояния в Северном полушарии. Регулярными начальными возмущениями в данном численном эксперименте служили атмосферные 8 часовые лунные приливы с $s=3$.

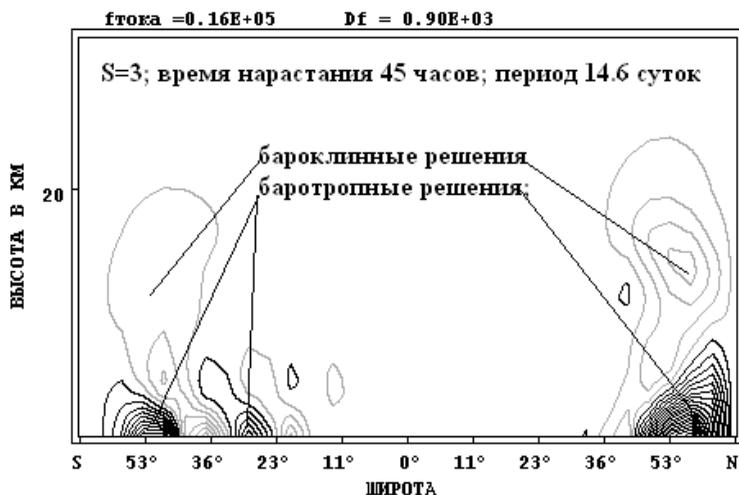


Рис. 5. Широтно-высотные изолинии меридиональной функции тока метеорологических возмущений, инициируемых лунным 8 часовым атмосферным приливом. Темные линии- вращение по часовой стрелке, серые-против часовой.

На рис. 5 достаточно четко видны в Северном полушарии и ячейки Феррела, и полярные ячейки, которые, как считается [11], формируют меридиональную циркуляцию и вариации в зональной циркуляции, т.е. долгосрочную погоду.

6. Для более детального анализа растущих решений системы уравнений (1)-(5) были проведены численные эксперименты для долготных чисел s в интервале значений от 1 до 6 для различных периодов регулярных приливных возмущений в интервале значений от 1 суток (суточный прилив) до 3 часов (3 часовой прилив). Оказалось, что параметры растущих решений получились идентичными для термических и гравитационных приливов, которые их инициировали. Из этого следует: что, например, полусуточный прилив с $s=6$ инициирует такое же растущее решение системы уравнений (1)-(5), как и 3 часовой прилив с тем же самым долготным волновым числом $s=6$, независимо от вида возбуждения (термического, или гравитационного) приливообразующего источника.

Полученные результаты позволяют сделать очень важный, на наш взгляд, вывод о природе полученных растущих решений: в приближении линеаризованных уравнений геофизической гидродинамики атмосфера с конкретными заданными параметрами, для каждого долготного волнового числа s имеет свое собственное неустойчивое решение, которое в дальнейшем будем называть «модой».

Далее для анализа баротропных и бароклиных решений были проведены две серии численных экспериментов. Для баротропных решений широтные градиенты температуры, которые вычислялись согласно уравнению (16), тождественно занулялись, в отличие от бароклиных решений. В обеих сериях были рассчитаны характерные времена нарастания и периоды для каждой из мод. Значение периодов баротропных решений (для данной модели зональной циркуляции в тропосфере) менялось от 6 суток для $s=6$ до 36 суток для $s=1$. Значения периодов для бароклиных решений, для соответствующих значений s были систематически выше в 1.3-1.5 раза. Рассчитанные характерные времена нарастания для бароклиных решений составляли порядка 20 часов для долготного волнового числа $s=6$, но они возрастали \approx в 6 раз с уменьшением долготного волнового числа до значения $s=1$. Для баротропных решений значение этого параметра возрастало \approx на 30% для соответствующего значения s .

Анализ полученных результатов позволил классифицировать нарастающие, как баротропные, так и бароклиные решения в терминах геофизической гидродинамики. Для баротропных решений в численных экспериментах было получено, что вертикальные компоненты скорости растущих возмущений w близки к нулю, поэтому эти решения (моды) можно уверенно отнести к классу решений для инерционно-гироскопических волн (аналог двумерных волн Россби). А бароклиные решения по аналогии - к классу внутренних (трехмерных) инерционно-гироскопических волн.

7. На основании полученных результатов можно предложить, логически безупречную, с геофизической точки зрения, цепочку событий формирования долгосрочной погоды, по крайней мере, в средних и высоких широтах обоих полушарий. В атмосфере, которая является тепловой машиной (правда, с очень низким к.п.д.), происходит постоянно неравномерное поглощение солнечной радиации по широте. По этой причине в толще атмосферы возникают горизонтальные градиенты температуры, а значит и давления и возникает меридиональный перенос. Под влиянием вращения Земли меридиональный перенос трансформируется в запад-

ный в среднеширотной тропосфере обоих полушарий и, менее мощный, восточный перенос в экваториальной тропосфере. Эволюция переноса (циркуляции) и формируют климат на Земле. Целый спектр геофизических и астрономических факторов приводит к появлению возмущений, которые из-за гидротермодинамической неустойчивости атмосферы инициируют метеорологические крупномасштабные процессы, формирующие меридиональную циркуляцию и вариации в зональной циркуляции, т.е. погоду. **Атмосферные приливы, как термические, так и гравитационные (в том числе и лунные) играют существенную роль в зарождении метеорологических крупномасштабных процессов, а значит и в формировании долгосрочной погоды.**

В заключение отметим, что лунные приливы могут инициировать зарождение крупномасштабных гидротермодинамических образований и в мировом океане, поскольку в нем также существуют значительные сдвиги в зональных течениях.

Литература

1. *Чл-корр. РАН А.П. Капица, А.А. Гаврилов.* Оценка и прогноз дальнего воздействия озона и водяного пара атмосферы Антарктиды на циркуляцию и температуру нижней термосферы над регионами России// Доклады РАН, 2010, т.434, №1, сс. 112-116.
2. *А.А. Гаврилов.* Оценка и прогнозирование воздействия атмосферных приливов на гидротермодинамические атмосферные процессы над регионами России// В сб. трудов лауреатов калужских региональных премий. 2010г. Выпуск 6. Калуга. Из-во "Наша полиграфия". С. 18-26.
3. *Гаврилов А.А.* Атмосферные приливы, как инициаторы зарождения крупномасштабных метеорологических процессов// Научная перспектива.- 2011.- №3.- С. 67-70. <http://www.naupers.ru>
4. *А.А. Гаврилов.* Влияние атмосферных приливов на земную погоду// В сб. трудов лауреатов калужских региональных премий. 2011г. Выпуск 7. Калуга. Из-во "Наша полиграфия". С. 27-35.
5. *Gavrilov A.A., Kapitsa A.P.* Zonal circulation perturbation caused by atmospheric tides// International Symposium Atmospheric Radiation and Dynamics (ISARD-2011). - Abstracts. - P. 173-174.
6. *Гаврилов А.А., Кайдалов О.В.* Численная модель приливов на высотах 70-100 км и ее сравнение с экспериментальными данными // Геомагнетизм и аэронавигация. - 1990. - Т.30. N3.-с. 474-482.
7. *Gavrilov A.A., Kajdalov O.B.* Investigation of the interaction between variations in atmospheric thermal tides and anomalous ozone concentration// Advances in Space Research, 1996, Volume 17, Issue 11, p. 157-160.
8. *Л.А. Дикий.*// Теория колебаний земной атмосферы // Л. Гидрометеиздат. 1969. 196 с.
9. *Tapio Schneider.* The General Circulation of the Atmosphere// Annu.Rev.Earth.Planet.Sci. - 2006. - P. 655-688.
10. *Чепмен С., Линдзен Р.*// Атмосферные приливы. М., "Мир", 1972, 296 с.
11. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И.*// Метеорологический словарь. Л., Гидрометеиздат. 1974. - 568 с.

УДК: 622.349.5

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ: МЕЖДУ МИ-
ФОМ И РЕАЛЬНОСТЬЮВ.А. Гордиенко^а, С.Н. Брыкин^б, Р.Е. Кузин^с, И.С. Серебряков^б,
М.В. Старкова^б^аМосковский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет.^бФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами „РосРАО“».^сОАО «Ведущий НИИ химической технологии» (ВНИИХТ).

*Я убежден, что ядерная энергетика необходи-
ма человечеству и должна развиваться, но
только в условиях практически полной безо-
пасности.*

Академик А.Д. Сахаров

1. Введение

Масштабы строительства, прогнозы развития атомных электростанций (АЭС), теплоэлектроцентралей (АТЭЦ) и станций теплоснабжения (АСТ) во многих странах свидетельствуют о возрастающей, а для некоторых стран решающей роли ядерной энергетике в электроснабжении и выработке тепла среднего и низкого потенциала для промышленного и коммунально-бытового теплоснабжения.

Россия – одна из немногих стран, где серьёзно рассматриваются варианты строительства атомных станций теплоснабжения. Объясняется это тем, что в России существует централизованная система водяного отопления зданий, при наличии которой целесообразно применять атомные станции для получения не только электрической, но и тепловой энергии. Первые проекты таких станций были разработаны ещё в 1970-е г., однако из-за наступивших в конце 80-х гг. экономических потрясений и жёсткого противодействия общественности, до конца ни один из них реализован не был. Исключение составляют Билибинская АЭС небольшой мощности, снабжающая теплом и электричеством посёлок Билибино в Заполярье (10 тыс. жителей) и местные горнодобывающие предприятия, а также оборонные реакторы (главной задачей которых является производство плутония). Это, прежде всего, Сибирская АЭС, поставлявшая тепло в Северск и Томск, а также реактор АДЭ-2 на Красноярском горно-химическом комбинате, с 1964 г. до его остановки в 2010 г. поставлявший тепловую и электрическую энергию для города Железногорска.

На рис.1 поданным МАГАТЭ приведен график роста мощности АЭС в мире и производства электроэнергии за 1971-2006 гг., а на рис.2 – прогнозы развития на 2020-30 гг. Двенадцать из тридцати стран, имеющих действующие ядерные реакторы, строят сейчас новые реакторы, а несколько других стран серьёзно рассматривают такую возможность. Иран является страной, не имеющей находящихся в

эксплуатации станций, но строящей атомную станцию. Помимо упомянутых выше стран, несколько развивающихся стран, таких, как Индонезия, Египет, Иордания и Вьетнам, заявили о возможности создания АЭС и сделали первые шаги в этом направлении.

Как любая крупномасштабная техногенная деятельность человека и как любой другой энергетический объект, атомные электростанции влияют на состояние экосистемы.



Рис.1. Рост мощности АЭС и производства электроэнергии за 1971-2006 гг. (по данным МАГАТЭ).

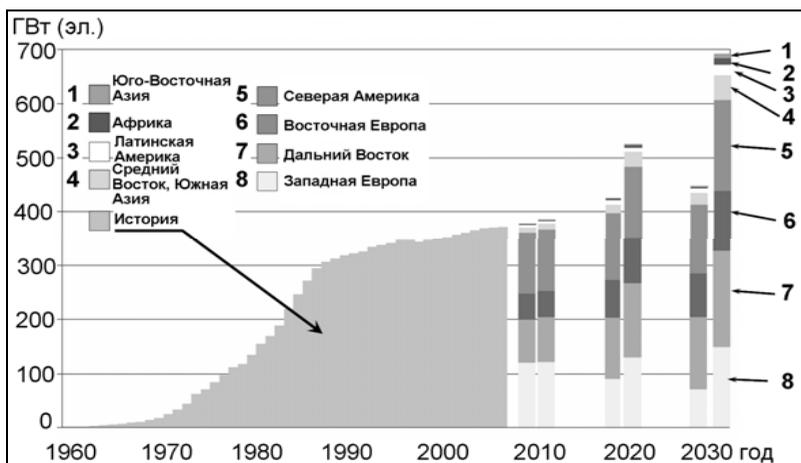


Рис.2. Прогнозы мощности АЭС в Мире на 2020-2030 гг. (по данным МАГАТЭ).

Однако исторически сложилось так, что в общественном сознании сформировалось неадекватное восприятие техногенных рисков различной природы. В настоящее время сложился устойчивый стереотип, согласно которому основными источниками поступления естественных радионуклидов (ЕРН) на поверхность Земли считаются урановые рудники и атомный энергетический комплекс с его ядерными реакторами. Одной из важнейших составляющих атомной энергетики являются атомные электростанции. По состоянию на 2009 год в мире действовало 437 энергетических ядерных реактора, генерирующих почти 16 процентов мировой электроэнергии [1, 2]. Нынешнее положение дел в области выработки электроэнергии на АЭС в разных странах мира крайне неодинаково. В 30 странах, имеющих действующие АЭС, процентная доля электроэнергии, обеспечиваемой ядерными реакторами, варьируется в диапазоне от 78% во Франции, 58% в Бельгии, 44% – в Швеции, 31% – в Германии, до всего лишь 2 % в Китае. Однако уже сейчас в Китае ведется строительство шести реакторов и планируется почти пятикратное увеличение мощностей к 2020 г. [2].

Доля атомной энергетики в общем энергобалансе России около 16 %. Высокое значение атомная энергетика имеет в европейской части России и, особенно на северо-западе, где выработка на АЭС достигает 42 %. В разработках проекта Энергетической стратегии России на период до 2030 г. предусмотрено увеличение производства электроэнергии на атомных электростанциях в 4 раза.

Радиационный фактор является барьером в общественном сознании для атомной энергетики при выборе вида энергоисточника. Негативное общественное восприятие этой отрасли во многом укрепилось в связи с ситуацией на японских АЭС после землетрясения и цунами 11 марта 2011 г., поэтому помимо призывов (возможно, в определенных случаях и справедливых) к необходимости ужесточения и изменения регулятивных требований и мер безопасности в процессе сертификации и выдачи разрешений на продление работы существующих и строительство новых АЭС, в печати появились множественные сообщения о необходимости вернуться к эксплуатации тепловых электростанций (ТЭС), работающих во многих случаях на ископаемых горючих сланцах и угле. При этом из-за сокращения поставок газа рассматривается возможный переход ряда уже действующих электростанций Европы с газа на уголь и мазут.

Однако более детальное знакомство с проблемой свидетельствует о том, что атомная энергетика в современном мире дает всего лишь не более 0.1% от всей дозы облучения людей на Земле [3]. На порядок больше дают вклад в радиоактивное облучение выбросы ТЭС и ТЭЦ, работающие на органическом топливе – угле, сланце, нефти, которые, наряду с другими энергетическими предприятиями, работающими на этом же топливе, являются самым мощным источником поступления радионуклидов (РН), и в частности радона, в атмосферу. Так, по данным [4], выбросы газообразных радиоактивных изотопов ^{220}Rn и ^{222}Rn , не улавливаемых действующими системами очистки ТЭС, составляют около $6 \cdot 10^{10}$ Бк/ГВт (эл.) год. К этому следует добавить, что согласно проведенной оценке, количество извлекаемых при добыче угля ЕРН в Российской Федерации превышает количество извлекаемых ЕРН при эксплуатации урановых месторождений [5]. При сжигании угля, даже для современных ТЭС, работающих на угле с содержанием золы не более 10 % и оборудованных фильтрующей системой, позволяющей задерживать 97.5 %

золы, они практически полностью попадают во внешнюю среду. В результате, удельная активность выбросов ТЭС в 5–10 раз выше, чем для АЭС [6].

Журналисты и «зеленые» часто призывают шире использовать возобновляемые источники энергии: солнечную энергию, энергию воды, ветра и т.д. Однако много энергии от них не получишь. Лауреат Нобелевской премии по физике академик П.Л. Капица неоднократно подчеркивал, что солнечная энергия – рассеянная: отдача 1 м² освещенной Солнцем поверхности в средних широтах не более 100 Вт. Академик В.А. Легасов еще в 1981 г. дал ответ на вопрос: «Целесообразно ли покрыть пустыню Каракумы, где много солнечных дней, самыми дешевыми преобразователями солнечной энергии – алюминиевыми нагревателями?». Оказывается, затраты энергии и загрязнение окружающей среды при производстве необходимого для этого алюминия во много раз больше «выигрыша» от их использования.

Конечно, в некоторых условиях (например, в космических аппаратах) солнечная энергия незаменима. Но вряд ли она в обозримом будущем даст более 1% в суммарном мировом производстве энергии. По оценкам специалистов, солнечной энергии хватило бы на всех при населении мира в 200 млн.

Энергия рек использована практически полностью. Расчет на энергию ветра вряд ли оправдан. Возможно, перспективнее делать ставку на энергию морских течений. Единственный реальный сегодня и не имеющий серьезных ограничений в обозримом будущем источник энергии – атомная энергетика. Запасы урана достаточно велики, и атомной энергии хватит еще надолго, даже с учетом роста энергопотребления в XXI в.

Управляемый термоядерный синтез – практически неисчерпаемый и сравнительно дешевый источник энергии. Однако после недавнего приступа оптимизма здесь наступило явное затишье, и физики все дальше отодвигают экономически целесообразное решение этой проблемы (теперь уже не ранее XXII в.).

2. Характеристика основных выбросов АЭС



Одна из причин умеренно отрицательного отношения к эксплуатации АЭС заключается, по-видимому, в том, что АЭС представляют серьезную *потенциальную* радиационную опасность. Радиоактивное загрязнение окружающей среды при авариях на АЭС – это основной фактор, оказывающий влияние на состояние здоровья и условия жизнедеятельности людей на территориях, подвергшихся загрязнению.

Тем не менее, ради объективности, следует отметить, что с начала эксплуатации АЭС зарегистрировано только 4 реальных серьезных аварии. При этом первые три были обусловлены не столь самой атомной энергетикой, сколько человеческим фактором.

Первая в мире серьезная авария произошла на АЭС Чолк Ривер (штат Онтарио, Канада) в 1952 г. из-за технической ошибки персонала, которая привела к перегреву и частичному расплавлению активной зоны реактора. Во внешнюю среду попало более тысячи Кюри продуктов деления, а около 3800 м³ радиоактивно

загрязненной воды было сброшено прямо на землю, в мелкие траншеи неподалеку от реки Оттавы.

Вторая авария произошла на АЭС Тримайл Айленд (штат Пенсильвания, США) в 1979 г., когда из-за серии сбоев в работе оборудования и грубых ошибок операторов расплавилось 53% активной зоны одного из реакторов. Произошел выброс в атмосферу инертных радиоактивных газов ксенона и йода. Кроме того, в реку Сукуахана было сброшено 185 м^3 слаборадиоактивной воды.

Третья, крупнейшая ядерная авария в мире, с разрушением активной зоны реактора и выходом осколков деления за пределы зоны, произошла в 1986 года на четвертом блоке Чернобыльской АЭС (Украина). В атмосферу было выброшено 190 т радиоактивных веществ. Восемь из 140 т радиоактивного топлива реактора оказались в воздухе. Другие опасные вещества попали в атмосферу в результате пожара, длившегося почти две недели.

Четвертая серьезная авария – это уже упоминавшаяся выше авария на японских АЭС после землетрясения и цунами 11 марта 2011 г.

При нормальной эксплуатации АЭС количество радиоактивных веществ, поступающих во внешнюю среду за счет газоаэрозольных выбросов и жидких сбросов, невелико. Доза внешнего и внутреннего облучения организма человека на границе санитарно-защитной зоны вокруг АЭС и за ее пределами намного ниже установленных норм, так как защитные барьеры ослабляют количество поступающих во внешнюю среду радионуклидов во много раз. В качестве иллюстрации в табл. 1 приведены данные за 2010 г. по выбросам действующих Российских АЭС.

Таблица 1. Выработка электроэнергии и выбросы ИРГ и остальных радионуклидов основными действующими Российскими АЭС за 2010 г.

АЭС	Выработано за год, ГВт·ч	ИРГ, Бк/год	Остальные РН, Бк/год	ИРГ на 1 ГВт·ч	Остальные РН на 1 ГВт·ч
Балаковская	31.72	0	$8.6 \cdot 10^6$	0	$2.7 \cdot 10^5$
Калининская	22.40	$2.0 \cdot 10^{13}$	$1.7 \cdot 10^9$	$8.9 \cdot 10^{11}$	$7.6 \cdot 10^7$
Кольская	10.68	0	$1.7 \cdot 10^7$	0	$1.6 \cdot 10^6$
Курская	28.68	$5.2 \cdot 10^{14}$	$3.4 \cdot 10^9$	$1.8 \cdot 10^{13}$	$1.2 \cdot 10^8$
Ленинградская	27.55	$2.3 \cdot 10^{14}$	$3.1 \cdot 10^8$	$8.3 \cdot 10^{12}$	$1.1 \cdot 10^7$
Нововоронежская	11.77	$4.2 \cdot 10^{13}$	$6.4 \cdot 10^8$	$3.6 \cdot 10^{12}$	$5.4 \cdot 10^7$
Ростовская	12.41	$1.8 \cdot 10^{13}$	$2.2 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^{12}$	$1.8 \cdot 10^5$
Смоленская	20.83	$5.6 \cdot 10^{13}$	$1.0 \cdot 10^9$	$2.7 \cdot 10^{12}$	$4.9 \cdot 10^7$
ВСЕГО	166.04	$8.8 \cdot 10^{14}$	$7.1 \cdot 10^9$		
Среднее на 1 ГВт·ч				$5.3 \cdot 10^{12}$	$4.3 \cdot 10^7$

Выбросы АЭС на 99.9% состоят из инертных радиоактивных газов (ИРГ). В процессе деления образуется около 20 радиоизотопов криптона и ксенона, из которых основной вклад в ИРГ вносят изотопы криптона ^{88}Kr (период полураспада 2.8 ч) и ксенона ^{133}Xe (5.3 сут), ^{135}Xe (9.2 ч) дающие различный вклад, в зависимости от типа реактора. На долю всех оставшихся радионуклидов (в основном это ^{131}I , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{137}Cs и тритий ^3H) приходится менее одного процента. Еще в меньшем количестве наблюдаются выбросы небольшого количества продуктов коррозии реактора и первого контура и осколков деления ядер урана ^{51}Cr , ^{54}Mg , ^{95}Nb , ^{106}Ru , ^{144}Ce . Для Российских АЭС в среднем в численном выражении это составляет на 1 ГВт·ч выработанной электроэнергии $5 \cdot 10^{12}$ Бк для ИРГ, и $4 \cdot 10^7$ Бк для суммы всех остальных радионуклидов.

Большинство радионуклидов газоаerosольных выбросов, включая ИРГ, имеют довольно небольшой период полураспада и без ущерба для окружающей среды распадаются, не успевая поступить в атмосферу. Тем не менее, для обеспечения безопасности по отношению к этим радионуклидам на АЭС, как правило, предусмотрена специальная система задержки газообразных выбросов в атмосферу.

Характер и количество газообразных радиоактивных выбросов зависит от типа реактора и системы обращения с этими отходами. Сравнительные усредненные характеристики выбросов российских АЭС за последние 25 лет для двух типов основных используемых реакторов приведены в табл. 2. Данные за 1985-1996 приведены согласно [3]. В табл. 3 на примере трех АЭС разных поколений приведено сопоставление выбросов в окружающую среду основных изотопов (данные за 2010 г.).

Криптон как химический элемент не вовлекается в биологические процессы. Однако он поглощается тканями тела при дыхании и хорошо растворяется в жировых тканях человека и животного, поэтому может повышать частоту возникновения рака кожи.

Таблица 2. Сравнительные усредненные характеристики выбросов Российских АЭС за последние 25 лет для двух типов основных используемых реакторов.

Тип реактора	АЭС	Выбросы ИРГ по годам, Бк/год		
		1985-1990	1991-1996	2010
ВВЭР	Балаковская	$1.0 \cdot 10^{14}$	$3.1 \cdot 10^{13}$	–
	Калининская	$1.6 \cdot 10^{14}$	$2.8 \cdot 10^{13}$	$2.0 \cdot 10^{13}$
	Кольская	$5.4 \cdot 10^{14}$	$1.7 \cdot 10^{14}$	–
РБМК	Курская	$6.6 \cdot 10^{15}$	$3.9 \cdot 10^{15}$	$5.18 \cdot 10^{14}$
	Ленинградская	$4.2 \cdot 10^{15}$	$1.4 \cdot 10^{15}$	$2.29 \cdot 10^{14}$
	Смоленская	$3.8 \cdot 10^{15}$	$2.2 \cdot 10^{15}$	$5.64 \cdot 10^{13}$

Наиболее опасным в выбросах современных АЭС считается тритий (^3H). Он может замещать водород во всех соединениях с кислородом, серой, азотом. А эти соединения составляют значительную часть массы животных организмов. Доказано, что он легко связывается протоплазмой живых клеток и накапливается в пищевых цепях. Распадаясь, тритий превращается в гелий и испускает бета-частицы. Такая трансмутация должна быть очень опасна для живых организмов, т.к. при этом поражается генетический аппарат клеток. В организм человека ^3H поступает в

виде газа и тритиевой воды $^1\text{H}^3\text{HO}$ через легкие, кожу и желудочно-кишечный тракт. Газообразный $^3\text{H}_2$ в 500 раз менее токсичен, чем сверхтяжелая вода $^3\text{H}_2\text{O}$. Это объясняется тем, что молекулярный тритий, попадая с воздухом в легкие, быстро (примерно за 3 мин) выделяется из организма, тогда как тритий в составе воды задерживается в нем на 10 суток и успевает за это время передать организму значительную дозу радиации. Половина тритиевой воды выходит из организма каждые 10 дней [12]. Обычное, среднее содержание трития в выбросах АЭС не превышает $1 \cdot 10^9$ Бк для реакторов типа РБМК и $6 \cdot 10^9$ Бк для реакторов ВВЭР на 1 ГВт-час произведенной электроэнергии.

Таблица 3. Сопоставление выбросов в окружающую среду основных изотопов на примере трех АЭС (данные за 2010 г.).

Радионук- -лид	Нововоронежская		Белоярская		Ленинградская	
	Всего	На 1 ГВт-ч	Всего	На 1 ГВт-ч	Всего	На 1 ГВт-ч
СУММА	$4.2 \cdot 10^{13}$	$3.57 \cdot 10^{12}$	$5.47 \cdot 10^{12}$	$1.39 \cdot 10^{12}$	$2.29 \cdot 10^{14}$	$8.31 \cdot 10^{12}$
^{131}I	$2.2 \cdot 10^8$	$1.87 \cdot 10^7$	0	0	0	0
^{60}Co	$2.0 \cdot 10^8$	$1.70 \cdot 10^7$	$3.20 \cdot 10^5$	$8.14 \cdot 10^4$	$2.50 \cdot 10^8$	$9.07 \cdot 10^6$
^{134}Cs	$8.6 \cdot 10^7$	$7.31 \cdot 10^6$	0	0	$1.79 \cdot 10^7$	$6.50 \cdot 10^5$
^{137}Cs	$1.3 \cdot 10^8$	$1.10 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^7$	$3.56 \cdot 10^6$	$4.40 \cdot 10^7$	$1.60 \cdot 10^6$

3. Уголь в качестве одного из основных видов топлива



Уголь был первым из используемых человеком видом ископаемого топлива. Когда был изобретен паровой двигатель, уголь помог сделать то, с чего, пожалуй, началась новая история человечества – промышленную революцию.

Правда, в современном мире на первый план выдвинулись другие источники энергии: в 1960 году уголь давал около половины мирового производства энергии, а к 1970 году его доля упала до одной трети.

Впрочем, уголь до сих пор остается незаменимым в ряде случаев: например, кокс, без которого не сварить сталь, также производится из угля.

В России в 2005 году доля угля в энергобалансе страны составляла около 18 процентов (в среднем по миру 39 %), в производстве электроэнергии – немногим более 20 процентов. Доля угля в топливном балансе РАО ЕЭС составила в 2005 г. 26 %, а газа – 71 %. В связи с высокими мировыми ценами на газ российское правительство намеревалось увеличить долю угля в топливном балансе РАО ЕЭС до 34 % к 2010 г., однако данным планам не суждено было сбыться из-за прекращения деятельности РАО ЕЭС в 2008 г.

Несмотря на происходящие экономические изменения, стоимость 1 т условного топлива на угле в большинстве случаев является самой низкой по сравнению

с мазутом и газом. Основная трудность использования угля состоит в высоком уровне выбросов от сжигания угля – газообразных и твёрдых (зола). В большинстве развитых стран, включая Россию, действуют жёсткие требования по уровню выбросов, допустимых при сжигании угля. В странах ЕС используются жёсткие штрафные санкции к ТЭС, превышающим нормы (вплоть до 50 евро за каждый выработанный МВт·ч электроэнергии). Выходом из ситуации является использование различных фильтров (например, электрофильтров) в газоходах котлов, либо сжигание угля в виде водоугольных суспензий (водоугольное топливо). В последнем случае из-за более низкой температуры горения угля существенно (до 70 %) снижаются выбросы оксидов NO_x (температурный NO_x). Зола, получаемая от сжигания угля, в ряде случаев может быть использована в строительной индустрии. Ещё в СССР были разработаны ГОСТы, предусматривающие добавку золы в шлакопортландцементы. Трудностью использования золы является то, что удаление золы происходит в большинстве случаев путём гидрозолоудаления, что затрудняет её погрузку для дальнейшей транспортировки и использования.

Каменного угля на Земле гораздо больше, чем нефти и газа. По оценкам специалистов, его запасов может хватить на сотни лет. Однако каменный уголь – экологически грязное топливо, в нем много золы, серы, вредных металлов.

В Китае, например, основной вид топлива – именно каменный уголь. Из-за высокого содержания в нем серы в городах Северного Китая зимой трудно дышать. Из каменного угля можно получать и жидкое топливо для транспорта (его делали в Германии во время Второй мировой войны), но оно обходится очень дорого (450 долл./м), и сейчас его не выпускают. В России заводы по производству жидкого топлива из угля в Ангарске, Салавате, Новочеркасске закрыты из-за нерентабельности.

Теплотворная способность угля ниже, чем нефти и газа, а его добыча значительно дороже. Во многих странах, в том числе и в России, угольные шахты закрываются, ибо уголь в них слишком дорог и трудно добывать. В большинстве стран легко добываемый уголь уже добыт.

4. Уголь как источник естественной радиации

Уголь, подобно нефти и газу, представляет собой органическое вещество, подвергшееся медленному разложению под действием биологических и геологических процессов. Основа образования угля – растительные остатки, произраставшие миллионы лет назад. Вместе с тем, уголь всегда содержит природные радиоактивные вещества уранового и актиноуранового рядов (^{238}U и продукты его распада ^{234}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Po и т.д.; ^{235}U и продукты его распада ^{219}Rn и т.д.), ториевого ряда (^{232}Th и продукты его распада ^{220}Rn , ^{216}Po), а также долгоживущий радиоактивный изотоп ^{40}K . Таким образом, естественная радиоактивность угля формируется за счет природных радионуклидов. Уран в окислительных условиях земной поверхности, как правило, присутствует в виде хорошо растворимых соединений, и поэтому значительно более широко рассеян, чем торий, хотя среднее содержание урана в земной коре почти на порядок ниже, чем тория.

В углях в результате инфильтрации уран концентрируется в низкомолекулярном органическом веществе торфов, лигнитов, бурых углей. Большая часть урана находится в виде мелкодисперсных оксидов [7]. В антрацитах и каменных углях количество урана незначительно.

Концентрация радионуклидов в разных угольных пластах различается в сотни раз. В среднем содержание радионуклидов в угле примерно соответствует гранитным кларкам. За счет привнесения урана содержание радионуклидов может увеличиваться. Так, в подмосковном угле содержание урана в среднем составляет 9.15 г/т , а тория 11.65 г/т . Радиоактивность золы и выбрасываемых в атмосферу твердых частиц, образующихся при его сжигании, превышает 370 Бк/кг (достигая временами 520 Бк/кг). В то время как при сжигании кузбасских углей радиоактивность составляет 20-40 Бк/кг. По мере выработки месторождения концентрация радионуклидов в угле может меняться.

Таблица 4. Удельные активности естественных радионуклидов в углях некоторых Российских месторождений.

Месторождения углей	Удельная активность, Бк/кг								
	^{40}K			^{226}Ra			^{232}Th		
	уголь	зола	шлак	уголь	зола	шлак	уголь	зола	Шлак
Интинское	152	420	393	15	39	43	18	37	46
Райчихинское	137	399		38	89		34	90	
Нерюнгринское	67	180		38	142		35	160	
Ургальское	46	186	282	12	78	87	8	56	65
Харанорское	61	404	373	24	83	89	19	67	69
Чегдомыньское	153		472	51		151	33		117
Лучегорское (Бикинское)	47	334	299	21	89	90	10	70	54

Согласно [8], среднемировые концентрации радионуклидов в углях составляют ^{40}K – 140-850 Бк/кг, ^{226}Ra – 17-60 Бк/кг, ^{232}Th – 11-64 Бк/кг. На рис.3 в качестве иллюстрации приведены с учетом данных работы [9] характерные удельные активности этих изотопов для 10 российских месторождений. В табл. 4 приведены аналогичные данные для Интинского и основных дальневосточных месторождений угля с учетом изменения концентрации радионуклидов золе и шлаке.

Миграция ЕРН в процессе освоения сырья при определенных условиях может приводить также к образованию техногенных соединений. Техногенные и природные процессы не одинаковы по своим термодинамическим и физико-химическим характеристикам, поэтому в процессе переработки сырья формы ЕРН будут меняться, особенно под воздействием высоких температур.

ЕРН уранового ряда при формировании техногенных соединений образуют в большинстве своем соединения, практически не отличающиеся от известных природных минералов. ЕРН ториевого ряда изучены не так подробно, но есть основания предполагать, что сформированные техногенные соединения тория будут отличаться от природных. Отметим, что торий и калий обычно связываются с неорганической фракцией, в то время как уран имеет тенденцию к связи с органикой [10], выбрасываемой в атмосферу с паргазовой фракцией, и концентрируется в аэрозолях.

При определенных условиях мобилизация ЕРН возможна даже на объектах с содержанием ниже кларка, поэтому в процессе добычи, переработки, использования и транспортировки радиоактивные элементы, содержащиеся в субкларковых количествах, могут накапливаться в окружающей среде и в дальнейшем представлять опас-

ность для персонала и населения прилегающих территорий. При этом достаточно большие объемы добычи минерального сырья предопределяют значимое накопление суммарного количества ЕРН [11].

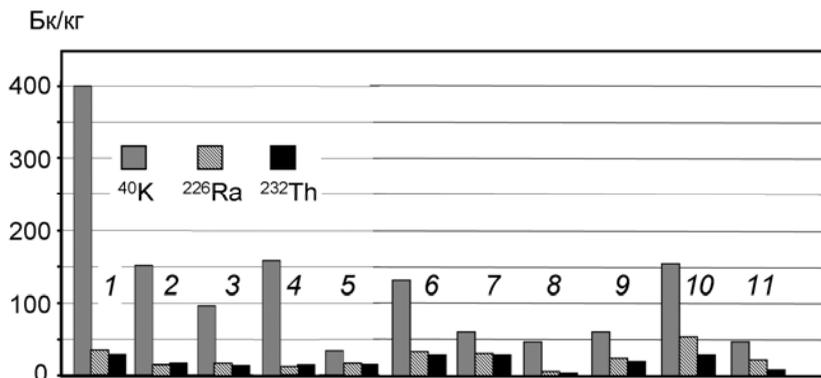


Рис. 3. Средние значения удельной активности радионуклидов ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th основных российских месторождений по данным [4, 9] в углях различных месторождений: 1 – среднемировые концентрации; 2 – Интинское; 3 – Воркутинское; 4 – Кузнецкое; 5 – Хакасское; 6 – Райчихинское; 7 – Нерюнгринское; 8 – Ургальское; 9 – Харанорское; 10 – Чегдомынное; 11 – Лучегорское.

5. Характеристика основных выбросов угольных ТЭС



Современные энергоблоки ТЭС являются сложными структурами. Оснащенные новыми технологиями, они становятся энерготехнологическими многоцелевыми блоками. Новые технологии включают системы сероочистки и азотоочистки дымовых газов, системы термической и плазмотермической подготовки и газификации угля, парогазовые схемы, энергохимические комплексы, системы утилизации теплоты уходящих газов, газотурбинные и (или) паротурбинные надстройки. При этом энерготехнологические угольные энергоблоки могут вырабатывать и отпускать потребителям два и более вида продукции (электрическую и тепловую энергию, синтетические жидкие и газообразные топлива, полукокс, товарную серу, продукцию для сельского хозяйства в виде аммонийных удобрений, продукцию для стройиндустрии, дорожного строительства и др.).

При этом энерготехнологические угольные энергоблоки могут вырабатывать и отпускать потребителям два и более вида продукции (электрическую и тепловую энергию, синтетические жидкие и газообразные топлива, полукокс, товарную серу, продукцию для сельского хозяйства в виде аммонийных удобрений, продукцию для стройиндустрии, дорожного строительства и др.).

В то же время, несмотря на меры по защите от вредных выбросов, современные теплоэнергетические объекты являются крупными комплексами, которые имеют разностороннее влияние на многие сферы жизни и деятельности общества (табл. 5). Масштабы этого воздействия – огромны.

Одна из особенностей воздействия ТЭС на окружающую среду – слабо контролируемые в настоящее время (в отличие от АЭС) выбросы радионуклидов.

Во время сжигания угля большая часть урана, тория и продуктов их распада выделяются из исходной матрицы угля и распределяются между газовой и твердой фракциями. Практически 100 % присутствующего радона переходит в газовую фазу и выходит с дымовыми газами [13].

Таблица 5. Доля теплоэнергетических комплексов (ТЭК) и ТЭС в воздействии на окружающую среду России [25].

Факторы	Отрасли ТЭК, %	Из них электротепло- энергетика, %
Парниковые газы	36,0	33,5
Токсичные газы и зола	44,0	28,0
Отчуждение земель	10,5	9,4
Забор свежей воды	25,5	24,5
Сброс сточных вод	36,0	33,5

Кроме дымовых газов, к основным источникам поступления радионуклидов в окружающую среду при сжигании угля на электростанции относят вынос частиц угля с открытых площадок углехранилищ (углеунос) и золоотвал [14]. При сгорании большая часть минеральной фракции угля плавится и образует стекловидный зольный остаток, значительная доля которого остается в виде шлака. Тяжелые частицы при этом попадают в золу, однако наиболее легкая часть золы, так называемая «летучая зола», вместе с потоком газов уносится в трубу электростанции. Удельная эффективность золы-уноса повышается с увеличением ее дисперсности. Высокодисперсная зола практически не улавливается оборудованием по очистке газов ТЭС [9], поэтому дымовые газы являются основным источником загрязнения от действия электростанций.

Например, в выбросах от Назаровской ТЭС содержатся в среднем 90% U, 76 % Th и 60-88 % Ra от их исходного содержания [15]. Прибалтийская ТЭС, работающая на сланцах, выбрасывает в атмосферу с дымовыми выбросами до 90 % урана, 28-60 % радия и до 78 % тория. В результате деятельности ТЭС вокруг нее образовалась зона повышенных концентраций ЕРН с радиусом примерно 40 высот труб станции, в которой произошло увеличение концентраций ЕРН для верхнего слоя почвы (3 см) на порядок. Концентрация ЕРН в факеле составляет: радия – до 50 мкБк/м³, тория – до 10 мкБк/м³ и урана – до 100 мкБк/м³ при фоне 1 мкБк в 1 м³ воздуха [16].

Суммарный выброс радионуклидов на угольных электростанциях, в среднем, составляет около $1.33 \cdot 10^{10}$ Бк на 1 ГВт·ч. В табл. 6 приведены среднегодовые выбросы радионуклидов ТЭС США по данным [17] в расчете на 1 ГВт·ч.

Видно, что основную долю вносят изотопы радона, которые в сумме дают $1.2 \cdot 10^{10}$ Бк на каждый ГВт·ч электроэнергии.

Необходимо отметить, что в продуктах сгорания происходит концентрирование микроэлементов, в том числе и радионуклидов. Степень концентрирования зависит от многих факторов, в число которых входит первоначальная концентра-

ция радионуклидов в угле, зольность, способ сжигания и условия работы электростанции [18]. Коэффициенты обогащения могут существенно различаться. Особенно интенсивно за счет термохимических процессов накапливается в золе изотоп ^{210}Pb , так что его концентрация увеличивается в 5-10 раз [15]. Известно, что свинец и его соединения токсичны. В частности, попадая в организм, свинец накапливается в костях, вызывая их разрушение. В табл. 7 представлены типичные соотношения концентраций основных радионуклидов в угле, шлаке и летучей золе по данным [19].

Таблица 6. Среднегодовые выбросы радионуклидов тепловой станции, Бк/ГВт·ч.

Радионуклид	Бк/ГВт·ч	Период полураспада
^{220}Rn	$4.07 \cdot 10^9$	55.6 с
^{222}Rn	$8.14 \cdot 10^9$	3.8 сут
^{238}U	$5.55 \cdot 10^7$	4.5 млрд. лет
^{234}U	$5.55 \cdot 10^7$	245 тыс. лет
^{226}Ra	$4.44 \cdot 10^7$	1600 лет
^{218}Po	$1.41 \cdot 10^8$	3 мин
^{214}Pb	$1.41 \cdot 10^8$	27 мин
^{214}Po	$1.41 \cdot 10^8$	0.00016 с
^{210}Pb	$1.41 \cdot 10^8$	22 года
^{210}Po	$1.41 \cdot 10^8$	138 сут
^{216}Po	$8.88 \cdot 10^7$	0.15 с
^{212}Pb	$8.88 \cdot 10^7$	11 час
^{40}K	$1.96 \cdot 10^8$	1.3 млрд. лет

Таблица 7. Удельная активность основных радионуклидов в углях, шлаках и золе в Бк/кг.

Изотоп	Уголь	Шлак	Летучая зола
^{238}U	9-31	56-185	70-370
^{226}Ra	7-25	20-166	85-281
^{232}Th	9-19	59	81-174
^{40}K	2-130	230-962	233-740

Летучая зола, выбрасываемая в воздух, представляет большую опасность из-за своей способности распространяться на значительные расстояния и проникать в легкие человека. Тонкие фракции летучей золы обогащены различными вредными веществами. Помимо радионуклидов, они содержат тяжелые металлы и микроэлементы Co, V, Cu, Zn, Cr, Ni, Cd, As, Be [20]. Например, в почвах, находящихся в зоне влияния ТЭС, наблюдались концентрации ванадия до 110 мг/кг, бериллия – до 15-50 мг/кг сухой почвы [3].

Рассеивание загрязнений с дымовыми газами происходит на большие площади, поскольку выбросы ТЭС в атмосферу осуществляются на высоте 100-300 м. В качестве иллюстрации можно привести следующий факт. В большинстве случаев зона влияния промышленных предприятий не превышает 0.5-1.5 км. Вблизи дорог

такая зона составляет до 50 м, а нарушение или даже полная деградация растительного покрова вблизи ТЭС, особенно работающих на низкокачественных углях, наблюдается в радиусе 4-15 км [15]. В снежном покрове в зоне влияния ТЭС, являющимся индикатором техногенного загрязнения, содержание радионуклидов может достигать значений для ^{40}K – 22.2-45.3 Бк/л, для ^{226}Ra – 4-9 Бк/л, для ^{232}Th – 3.4-7.8 Бк/л [21]. Средние выбросы основных радионуклидов, плотность загрязнения территории и их содержание в атмосфере в районе расположения номинальной среднестатистической ТЭС, по данным [15] представлены в табл. 8.

Таблица 8. Средние выбросы основных радионуклидов, плотность загрязнения территории и концентрация РН в воздухе в расчете на 1 ГВт·ч в районе расположения номинальной ТЭС.

Показатели	Радионуклиды					
	^{226}Ra	^{228}Ra	^{210}Pb	^{210}Po	^{232}Th	^{40}K
Годовой выброс, 10^{10} Бк	1.96	1.11	8.14	7.40	1.96	19.61
Плотность загрязнения территории, 10^7 Бк/км ²	38.85	9.25	114.70	70.30	–	388.5
Концентрация в воздухе, 10^{-8} Бк/л	6.29	4.07	14.80	14.43	6.29	–

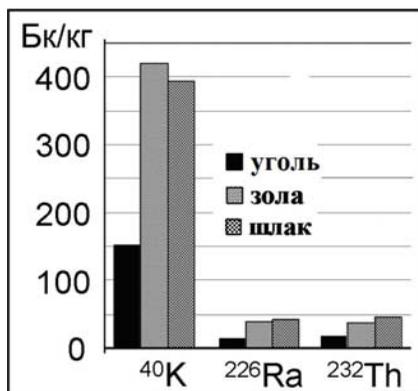


Рис. 4. Средние значения удельной активности радионуклидов ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в угле Интинского месторождения и продуктах его сжигания.

В работе [9] были проанализированы пробы угля Интинского месторождения Печорского угольного бассейна, а также продукты его сгорания зола и шлак. Концентрация урана в этом угле существенно меньше средних мировых значений, не превышает кларкового содержания и составляет 0.5-0.7 г/т, тория – порядка 2.9 г/т.

Соотношения концентраций радионуклидов в угле, шлаке и летучей золе в выбросах ТЭС-1 Северодвинска, которая работает на этом угле, представлены на рис. 4. В табл. 9 представлена оценка количества радионуклидов поступающих в атмосферу при сжигании такого угля на ТЭС-1. Производимые в больших объемах твердые отходы загрязняют, помимо всего прочего, подземные воды. Вокруг таких мест образуется зона расплывания загрязнителей, поскольку такая вода является растворителем многих токсичных веществ [3].

Таблица 9. Поступление радионуклидов в окружающую среду при работе ТЭС-1 Северодвинска на углях Интинского месторождения Печорского угольного бассейна.

Изотоп	Количество РН, поступающего в среду, Бк на 1 ГВт·ч			Всего
	Углеунос	Золоотвал	Дым	
⁴⁰ K	$1.22 \cdot 10^7$	$2.46 \cdot 10^{12}$	$3.15 \cdot 10^5$	$2.46 \cdot 10^{12}$
²²⁶ Ra	$1.19 \cdot 10^6$	$2.48 \cdot 10^{11}$	$3.45 \cdot 10^4$	$2.48 \cdot 10^{11}$
²³² Th	$1.41 \cdot 10^6$	$2.51 \cdot 10^{11}$	$4.28 \cdot 10^4$	$2.51 \cdot 10^{11}$
Всего	$1.48 \cdot 10^7$	$2.96 \cdot 10^{12}$	$3.92 \cdot 10^5$	$2.96 \cdot 10^{12}$

6. Некоторые сравнительные характеристики выбросов ТЭС и АЭС

В отличие от электростанций, работающих на угле, организация эксплуатации ядерного топлива на АЭС обеспечивает в настоящее время достаточно высокий уровень безопасности, начиная с отправки ядерного топлива и заканчивая хранением. Сжигание ядерного топлива происходит без участия окислителей, поэтому не вызывает нарушений биогеохимических циклов кислорода, углекислого газа, серы и азота.

При нормальной эксплуатации влияние АЭС на радиоактивное загрязнение воздуха является весьма малым по сравнению с естественной радиоактивностью атмосферы и не наносит заметного ущерба прилегающим территориям и наземным экосистемам, т.к. используемые на АЭС технические меры позволяют обеспечить весьма высокие коэффициенты удержания радионуклидов в реакторе. Существует ряд защитных барьеров, препятствующих выходу радионуклидов, в частности, упоминавшаяся выше задержка газов перед выбросом в трубу, в течение которой происходит распад короткоживущих радионуклидов.

Сравнение данных табл. 1 и табл. 9 показывает, что в среднем для функционирующих в настоящее время ТЭС и АЭС разница в уровнях радиоактивного загрязнения долгоживущими радионуклидами составляет несколько порядков. Следует также иметь в виду, что продукты сгорания угля в виде золы и шлаков образуют значительное количество трудно утилизируемых отходов, поэтому, как правило, не утилизируются, и являются дополнительными источниками радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Несмотря на то, что дымовые газы ТЭС, как правило, очищаются в золоуловителях с коэффициентом полезного действия 94-99 % [9], ядерная энергетика оказывается пока существенно чище традиционной теплоэнергетики и по химическим показателям. Помимо долгоживущих радионуклидов опасными компонентами дымовых газов ТЭС являются твердые частицы, диоксид серы, окислы азота и углекислый газ. Кроме того, в дымовых газах содержатся ароматические углеводороды канцерогенного воздействия, пары соляной и плавиковой кислот, токсичные металлы. Сравнительная оценка по данным [20] концентрации некоторых химических выбросов от ТЭС и АЭС на 1 ГВт·ч выработанной энергии приведены в табл. 10.

Как показали проводившиеся по заказу Еврокомиссии исследования, мелкодисперсная угольная пыль ежегодно приводит к смерти около 300 тыс. европейцев. В России дополнительная смертность от проживания вблизи угольных ТЭС оценивается в 8-10 тыс. человек в год. В то же время, имеющиеся в разных странах данные свидетельствуют, что по реальному воздействию на человека атомная промышленность находится во втором десятке вредных факторов. На первом месте по показателям профзаболеваний находится угольная промышленность (20-50 заболеваний против 0.4-0.7 в атомной промышленности на 10000 работающих) [22].

Таблица 10. Сравнительная таблица химических выбросов от ТЭС и АЭС на 1 ГВт·ч выработанной энергии [20].

Химический загрязнитель	Концентрация выбросов, отн.ед.	
	ТЭС	АЭС
SO ₂	$1.18 \cdot 10^{-3}$	$1.68 \cdot 10^{-7}$
Твердые частицы	$3.33 \cdot 10^{-4}$	$2.08 \cdot 10^{-8}$
NO _x	$1.28 \cdot 10^{-4}$	$1.92 \cdot 10^{-8}$
CO ₂	$1.09 \cdot 10^{-5}$	$1.82 \cdot 10^{-8}$

Таблица 11. Индивидуальные годовые риски смерти для населения России [24].

Факторы риска	Подвержено, млн чел.	Риск
Все причины	69 (мужчины)	$2.0 \cdot 10^{-2}$
Несчастные случаи	69 (мужчины)	$3.3 \cdot 10^{-3}$
Сильное загрязнение окружающей среды	15,2	$1 \cdot 10^{-3}$
Проживание вблизи ТЭС, работающих на угле	15 - 20	$5 \cdot 10^{-4}$
Зона отселения ЧАЭС	0,1	$8 \cdot 10^{-5}$
Проживание вблизи НПЗ	2,5	$1 \cdot 10^{-5}$
Проживание в 30-км. зоне ГХК	0,16	$3 \cdot 10^{-6}$
Проживание вблизи АЭС	0,3	$7 \cdot 10^{-7}$

К этому следует добавить и проблему количества необходимого топлива. Так для обеспечения работы в течение года ТЭС на угле мощностью 2 ГВт за год требуется 6 млн. t угля (примерно 150 000 вагонов), потребление кислорода составляет около $10^{10} \text{ м}^3/\text{год}$, накапливается около 1.4 млн. t (800 тыс. м^3) твердых отходов за год. Для АЭС аналогичной мощности требуется топлива примерно 2 вагона в год, кислород не потребляется, отработанное ядерное топливо (ОЯТ) составляет 40-50 t (около 5 м^3) в год.

Громадное количество твердых отходов ТЭС не имеет никакой энергетической ценности, а изготовленное новое топливо из 50 t ОЯТ позволяет заместить 2 млн. t угля, или 1.6 млрд. м^3 газа, или 1.2 млн. t нефти.

Мировая статистика показывает, что добыча этих 6 млн. t угля обойдется в 24 человеческие жизни и 90 травм шахтеров.

7. Заключение

Выше уже были упомянуты некоторые преимущества развития атомной энергетики. В качестве одного из ее преимуществ указывалось на значительную чистоту воздушного бассейна вокруг АЭС в сравнении с обстановкой вокруг ТЭС.

Исследования показывают, что годовая доза дополнительного облучения для живущих вблизи АЭС почти в 20 раз меньше среднего естественного фона на поверхности Земли ($1 \text{ мЗв}/\text{год}$). Риск от проживания вблизи АЭС оценивается в $7 \cdot 10^{-7}$ (табл. 11) [12, 24].

Ядерная энергетика положительно решает многие экологические проблемы, не потребляет ценного природного сырья и атмосферного кислорода, не выбрасывает в атмосферу парниковых газов и ядовитых веществ, и стабильно обеспечивает получение самой дешевой энергии. Замещая тепловую энергетику, атомная энергетика может сыграть существенную роль в сокращении выбросов углекислого газа, разрешении других экологических проблем.

Вместе с тем, следует отметить, что по сравнению с альтернативными электростанциями на ископаемом топливе атомные станции дорогостоящи в строительстве, но дешевы в эксплуатации. В целом ядерная энергетика более привлекательна в тех случаях, когда

- энергетический спрос быстро растет, как, например, в Китае и Индии,
- альтернативных вариантов мало, или они дорогостоящи, как, например, в Японии и Южной Корее,
- приоритет отдается уменьшению загрязнения воздушной среды,
- финансирование может быть долгосрочным и когда невелик финансовый риск.

Однако следует отметить, что только при нормальной эксплуатации АЭС, они в экологическом отношении чище тепловых электростанций на угле. При авариях АЭС могут оказывать существенное радиационное воздействие на людей и экосистемы. Даже при значительных авариях на электростанциях, таких, например как авария на Саяно-Шушенской ГЭС, их экологические последствия носят преимущественно локальный характер. Этого нельзя сказать об авариях на АЭС. И Чернобыльская катастрофа, и авария на японских АЭС в 2011 г. приобрели характер мировых катастроф, поэтому право на существование атомная энергетика имеет только в случае обеспечения предельно высокого уровня безопасности её предприятий, недопущения какого либо выноса радиоактивных продуктов из техноло-

гического оборудования за пределы, ограниченные технологическими помещениями (барьеры безопасности) при любых обстоятельствах.

Безусловно, затронуты не все проблемы полных циклов атомной и тепловой энергетики от добычи топлива до вывода объектов из эксплуатации и захоронения отходов: комплексной оценки рисков, полной стоимости жизненного цикла и т.д. Рассмотрение этих вопросов представляется важным направлением дальнейших исследований.

В частности, всякий раз, когда обсуждаются проблемы производства электроэнергии на АЭС, возникает вопрос отработавшего топлива. В то время как Франция, Китай, Индия, Япония и Российская Федерация перерабатывают (или хранят для переработки в будущем) большую часть своего отработавшего топлива, Канада, Финляндия, Швеция и США выбрали вариант прямого захоронения. Тем временем большинство стран еще не сделало выбора в отношении приемлемой стратегии. Они хранят отработавшее топливо и стремятся быть в курсе событий, связанных с обеими альтернативами.

Однако имеется ряд инициатив по снижению долгосрочной радиационной нагрузки, создаваемой радиоактивными отходами высокой активности.

Еще в феврале 2006 г. США выступили с инициативой Глобального партнерства в области ядерной энергии (ГПЯЭ), включающей разработку усовершенствованных технологий рециклирования. Тем временем Франция осуществляет стратегию по трем направлениям:

- разделение и трансмутация с целью уменьшения долгосрочной радиационной нагрузки;
- создание геологических хранилищ с возможностью и без возможности извлечения отходов;
- кондиционирование и долгосрочное хранение. Другие страны проводят исследования в поисках путей уменьшения количеств высокоактивных отходов.

Вместе с тем, вызывает опасение упоминавшаяся во введении ситуация, когда в силу объективных исторических причин в обществе и в государстве до сих пор существует неадекватное негативное отношение к рискам, связанным с радиационным воздействием. В условиях подобного отношения в России формировалась нормативно-правовая база в области радиационной безопасности. Ее отличает чрезмерная жесткость в отношении регламентации радиационного фактора в сравнении с иными видами техногенных воздействий. Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» инициировал дальнейшее ужесточение норм радиационной безопасности, что потребует возможно не совсем оправданно высоких затрат на обеспечение снижения рисков, в первую очередь при профессиональном облучении.

Подобный подход в условиях, когда риски, обусловленные химическим загрязнением объектов окружающей среды, во многих случаях лежат в области неприемлемых значений, представляется нерациональным.

В энергетической политике страны складывается ситуация, когда, с одной стороны, необходимы дополнительные затраты на ужесточение норм радиационной безопасности при отсутствии интенсивного развития атомной энергетики, с другой стороны, не уделяется должного внимания экологической безопасности энергетики на органическом топливе. Государство и общество демонстрируют терпимость ко многим негативным последствиям тепловой энергетики, среди ко-

торых выбросы и сбросы химически вредных веществ, а также выбросы естественных радионуклидов. В сложившейся ситуации предпочтение ошибочно может быть отдано энерготехнологиям существенно более опасным для окружающей природной среды и здоровья населения как в региональном, так и в глобальном масштабах.

Отметим также, что радиоактивное загрязнение и наличие радиационно опасных объектов – лишь одно из последствий промышленной деятельности человечества в XX веке. Нельзя забывать об утрате для хозяйственного использования десятков тысяч квадратных километров земель в результате гидростроительства и добычи полезных ископаемых; о потере плодородия и загрязнении миллионов гектаров почв сельхозугодий тяжелыми металлами и пестицидами; о возникновении «техногенных пустынь» вокруг крупных предприятий цветной металлургии; о глобальных эффектах загрязнения атмосферы парниковыми газами; о наличии потенциально опасных технических объектов, связанных с химической, нефтехимической, фармацевтической, микробиологической и другими отраслями промышленности.

В этих условиях актуальными задачами являются [24]:

- формирование адекватного восприятия обществом и государством техногенных рисков различной природы и уровня;
- гармонизация нормативно-правовой базы в области охраны окружающей природной среды и здоровья населения на базе методологии комплексной анализа риска.

Литература

1. The United Nations Today. – United Nations. New York. 2008.
2. *Макдональд А.* Ядерная энергетика: положение дел в мире. Взгляд на производство электроэнергии на АЭС во всем мире и его будущие перспективы. Бюлл. МАГАТЭ 49-2. Март, 2008. С. 45.
3. *Крышев И.И., Рязанцев Е.П.* Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАТ. 2010.
4. *Акимов А.М., Ковалев Н.И.* Характер радиоактивности и дозы от выбросов ТЭС, работающих на органическом топливе // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА. 2009. С. 70.
5. Uranium. Resources, production and demand. ONEA. IAEA. Paris. 1997.
6. *Тихонов М.Н., Муратов О.Э.* Альтернативный ядерно-топливный цикл: необходимость и актуальность // Экология промышленного производства. 2009. № 4. С. 40.
7. *Юдович Я.Э.* Геохимия ископаемых углей (неорганические компоненты).– Л.: Наука. 1978.
8. UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. N.-Y. 2000. P.40
9. *Мауричева Т.С.* Количественная оценка поступления радионуклидов в окружающую среду при работе угольных ТЭС (на примере ТЭС-1 г. Северодвинска). Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М. 2007.
10. *Kumru M.N., Bakac M.* Measurement of Natural Radioactivity Level in Aegean Lignite (Soma, Turkey) by Gamma Spectrometry// Turkish J. Nucl. Phys. Sci. 1995. № 22(2). P.95
11. *Алексеев В.В.* Физика и экология. М.: Знание. 1978.

12. *Василенко И.Я.* Токсикология продуктов ядерного деления. М.: Медицина. 1999.
13. Radioactive Elements in Coal and Fly Ash. United States Geological Survey. <http://pubs.usgs.gov/fs/1997/fs163-97/FS-163-97.html>
14. *Мауричева Т.С., Киселев Г.П.* Основные положения количественной оценки радиоактивного воздействия угольных ТЭЦ на окружающую среду// Вестник Поморского университета. Архангельск. 2006. № 1(9). С. 110.
15. *Пучков Л.А., Воробьев А.Е.* Человек и биосфера: вхождение в техносферу.– М.: Изд-во МГГУ. 2000.
16. Экологический портал ECOFAQ.ru
17. Study of Hazardous Air Pollutant Emissions from Electric Utility Steam Generating Units. Final Report to Congress. EPA-453/R-98-004.
18. *Тутаева Н.А.* Тяжелые естественные радионуклиды как индикаторы миграции в природной и антропогенной среде// В сб. «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». Материалы международной конференции, посвященной 100-летию открытия радиоактивности. Томск. 1996. С.500.
19. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде/ Пер. с англ. под ред. Ф. Уорнера, Р. Харрисона. М.: Мир.1999.
20. *Коваленко Г.Д., Пивень А.В.* Экологический риск для здоровья населения при воздействии выбросов ТЭС и АЭС Украины// Ядерна та радіаційна безпека. 2010. № 4(48). С.50.
21. *Матвеевко Т. И., Крупская Л. Т., Дербенцева А. М., Ламаиш Б. Е.* Техногенное загрязнение почв и растительности в зоне влияния теплоэлектростанции. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та. 2008.
22. *Тихонов М.Н., Муратов О.Э., Петров Э.Л.* Изотопы и радиационные технологии: постижение реальности и взгляд в будущее// Экологическая экспертиза. Обз. инф. М.: ВИНТИ РАН. 2006. № 6. С. 38.
23. <http://www.rosenergoatom.ru>.– Годовой отчет за 2010 год ОАО «Концерн Росэнергоатом».
24. *Бекман И.Н.* Ядерная индустрия. Курс лекций. Лекция 32: «Экологический риск ядерной индустрии». – М. 2005.
25. Обзор загрязнения природной среды в Российской Федерации за 2002 г. – М.: Росгидромет, 2003. – 295 с.

ИНТЕНСИВНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРЕ

Гусев В.А., Жостков Р.А.

*Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова
кафедра акустики*

Составной частью экологии как науки о физических явлениях в природной среде является акустическая экология. При понимании экологии в широком смысле, как взаимодействия человека и природы, включая различные процессы и взаимодействия между геосферами, влияющими на жизнедеятельность человека, в сферу акустической экологии вовлекаются такие задачи, как эволюция волн от источников различного происхождения в неоднородных средах [1-3], передачи информации, дальнего распространения и дистанционного управления [3], задачи восстановления свойств среды и неразрушающего контроля [4], активное воздействие на состояние атмосферы и дистанционный мониторинг различных сейсмических и техногенных процессов. Взаимодействие акустических, электромагнитных волн и ионизированной плазмы верхних слоев атмосферы дает предпосылки для дистанционного исследования сейсмических событий [5]. Отдельно нужно выделить проблему воздействия ударных волн, генерируемых сверхзвуковыми пассажирскими самолетами [1,2,6].

Принципиальную роль в характере распространения акустических сигналов в атмосфере играет сила тяжести, формирующая стратификацию плотности с высотой. Стратификация приводит к экспоненциальному росту колебательной скорости частиц при вертикальном распространении акустической волны вверх, поэтому распространение таких волн подчиняется законам нелинейной акустики и необходим учет нелинейных членов. Временной профиль акустической волны на больших высотах складывается под влиянием нелинейности и вязкого затухания.

Последовательное исследование акустических сигналов в стратифицированной атмосфере было начато в работах [7-8]. В работе [7] были исследованы плоские волны с вязким затуханием, в [8] была учтена нелинейность уравнений гидродинамики и было выведено уравнение типа Бюргерса, описывающее распространение интенсивной плоской волны в изотермической стратифицированной атмосфере. В используемых в дальнейшем обозначениях уравнение для распространяющихся вертикально вверх волн имеет вид

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\varepsilon}{c_0^2} u \frac{\partial u}{\partial \tau} - \frac{u}{2H} = \frac{\eta e^{x/H}}{2\rho_{00}c_0^3} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2}. \quad (1)$$

Здесь u – вертикальная компонента колебательной скорости, c_0 – скорость звука, ρ_{00} – плотность воздуха у поверхности Земли, высотное распределение равновесной плотности считается экспоненциальным $\rho_0(x) = \rho_{00}e^{-x/H}$, координата x направлена вертикально вверх, H – высота стандартной атмосферы, ε – нелинейный параметр, η – коэффициент вязкости, $\tau = t - x/c_0$. Уравнение (1) при помощи преобразований $u(x, \tau) = U(x, \tau)e^{x/2H}$, $z = 2H(e^{x/2H} - 1)$ и приведения к безразмер-

ным переменным $V = U/u_0$, $\theta = \tau/\tau_0$, $s = z/z_{nl}$, $s_0 = 2H/z_{nl}$, $z_{nl} = c_0^2\tau_0/\varepsilon u_0$, $\Gamma = \eta/2\varepsilon\rho_0c_0\tau_0u_0$ можно записать в более удобной форме:

$$\frac{\partial V}{\partial s} - V \frac{\partial V}{\partial \theta} = \Gamma \left(1 + \frac{s}{s_0} \right) \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2}. \quad (2)$$

Переход к функции V позволяет исключить экспоненциальный рост амплитуды за счет стратификации. Уравнение (2) является частным случаем обобщенного уравнения Бюргерса [9] с переменным коэффициентом вязкости произвольного вида; в данном случае $\Gamma(1 + s/s_0)$. Значимость обобщенного уравнения Бюргерса связана с широкой областью его применимости. Например, к этому уравнению сводятся задачи о распространении ограниченных пучков и волн в неоднородных средах, рассматриваемые в приближении нелинейной геометрической акустики. В [9] рассмотрен ряд подходов к решению уравнений типа (2), однако они основаны на линеаризации преобразованных уравнений и не подходят для описания сильно нелинейных волн.

В работе [8] также проведен только качественный анализ трансформации акустического сигнала в стратифицированной атмосфере, основанный на обычном уравнении Бюргерса. Найдено также только качественно верное выражение для ширины ударного фронта, вопрос о близости построенного решения к точному не ставился. Для правильного описания акустических полей и их воздействия на атмосферу необходимо, в первую очередь, построить более точные решения уравнения (2); затем можно переходить к исследованию более сложных задач, например, учесть сферическую расходимость, рассмотреть нелинейные ограниченные волновые пучки, а также их воздействие на состояние атмосферы.

В нелинейной акустике наиболее часто исследуются два характерных профиля – периодический синусоидальный сигнал и одиночная N-волна. Первый интересен с точки зрения уширения спектрального состава сигнала, второй является предельным профилем на больших расстояниях и при малой вязкости и представляет собой характерный именно для акустики объект с особыми свойствами. Фактически они реализуют два противоположных случая – периодический симметричный (двуполярный) и одиночный несимметричный (однополярный) сигналы с принципиально различными свойствами. Поэтому в дальнейшем будут рассмотрены именно эти два начальных профиля. Начальный профиль в виде N-волны характерен для источников взрывного характера, естественного или искусственного происхождения, синусоидальный сигнал может быть использован для моделирования диагностических сигналов или, например, генерации акустических сигналов при сейсмических событиях.

Построение профилей акустических волн. При дальнейших расчетах будем считать безразмерную вязкость малой, $\Gamma \ll 1$. Для характерных параметров акустических волн от взрывных источников $u_0 \sim 200$ Па, $\tau_0 \sim 1$ с $\Gamma \sim 10^{-7}$. Этот случай соответствует сильным нелинейным искажениям. В противоположном случае нелинейные слагаемые можно рассматривать как малую поправку.

На малых расстояниях, а именно, при $s < 1$ влияние вязкости сказывается не очень сильно, и решение уравнения (2) близко к простой волне. Наиболее интересным является область расстояний, на которых формируется профиль с разви-

тыми ударными фронтами, $2 < s < 1/\sqrt{\Gamma}$. В этом случае вдали от ударных фронтов профиль становится линейным $V_{out} = (\pi \operatorname{sgn} \theta - \theta)/(1+s)$ при $-\pi < \theta < \pi$, и решение может быть найдено методом сращиваемых асимптотических разложений. Для правильного описания ударного фронта следует использовать автомодельное решение уравнения (2) вида $V = \Phi(\xi = \theta/(1+s/s_0))$, где функция Φ описывает скачок с конечной шириной ударного фронта [5]. Точное выражение для Φ задается в параметрическом виде в квадратурах, а вблизи ударного фронта может быть записано приближенное выражение

$$\Phi(\xi) = A \tanh \left[\frac{A}{4\Gamma} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{8\Gamma}{A^2 s_0}} \right) \xi \right], \quad (3)$$

где A – пиковое значение в профиле волны, определяемое из условия сшивания. Выражение (3) отличается от ширины фронта в рамках обычного уравнения Бюргера множителем $\Xi = 2^{-1} \left(1 + \sqrt{1 + 8\Gamma/A^2 s_0} \right)$. При $s_0 \rightarrow \infty$ (в отсутствие стратификации) $\Xi = 1$.

Теперь построим профиль исходного синусоидального сигнала $V(z=0) = \sin \theta$. Рассматриваем область развитых разрывов, в которой исходная синусоидальная волна превращается в пилообразную. Поскольку длительность одного периода периодической волны не меняется, то сшивка линейного профиля и ударного фронта производится при условиях $\Gamma \rightarrow 0$, $\theta/\Gamma = \text{const}$ и пиковое значение равно $A = \pi/(1+s)$. В итоге приходим к выражению для одного периода исходного синусоидального сигнала:

$$V_S = \frac{1}{1+s} \left(-\theta + \pi \tanh \left[\frac{\pi}{4\Gamma(1+s)} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{8\Gamma(1+s)^2}{\pi^2 s_0}} \right) \frac{\theta}{1+s/s_0} \right] \right), \quad -\pi < \theta < \pi. \quad (4)$$

При использовании решения (4) нужно иметь в виду, что оно применимо в области развитых ударных фронтов, а именно $2 \leq s \leq 2/\sqrt{\Gamma}$. На больших расстояниях, как показывает общая теория обычного [10] и обобщенного уравнения Бюргера [11], необходимо переходить на решение линеаризованного уравнения (2).

Сравнение аналитического решения (4) и численного решения уравнения (2) показано на рис. 1 и 2. На рис. 1 приведено сравнение численного решения уравнения (2) (кривые 1) и аналитического решения по стандартной схеме, не учитывающей присутствующего в автомодельном решении множителя Ξ (кривые 2). Кривыми 3 показано аналитическое решение с учетом следующего члена асимптотического ряда по Γ . Как видно, на малых расстояниях решения близки друг к другу, однако дальше начинается существенное расхождение. Для количественной характеристики близости профилей введена величина

$$Y = \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} (V - V_{num})^2 d\theta} / V_{num}^{(\max)},$$

где V – аналитическое решение (4), V_{num} – численное решение уравнения (2).

На рис. 2 построены решения (4), учитывающие правильную структуру ударного фронта в соответствии с автомодельным решением. Как видно, выражение (4) очень хорошо описывает профиль исходного синусоидального сигнала на расстояниях $2 < s < 2/\sqrt{\Gamma}$. Далее, при $s \sim 2/\sqrt{\Gamma}$ решение уравнения (2) переходит на линейную стадию и выражение (4) неприменимо.

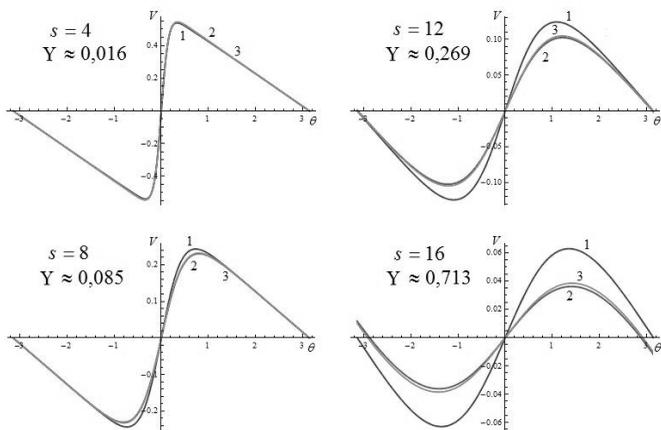


Рис. 1. Сравнение численного (кривые 1) и аналитического решения по стандартной схеме без автомодельной поправки Ξ (кривые 2) для исходного синусоидального профиля на различных расстояниях s при $\Gamma = 0,01$

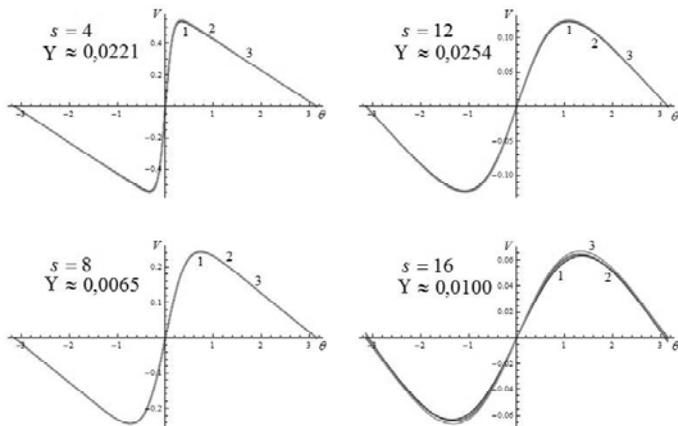


Рис. 2. Сравнение численного (кривые 1) и аналитического решения (4) с правильной структурой ударного фронта (кривые 2) для исходного синусоидального профиля на различных расстояниях s при $\Gamma = 0,01$

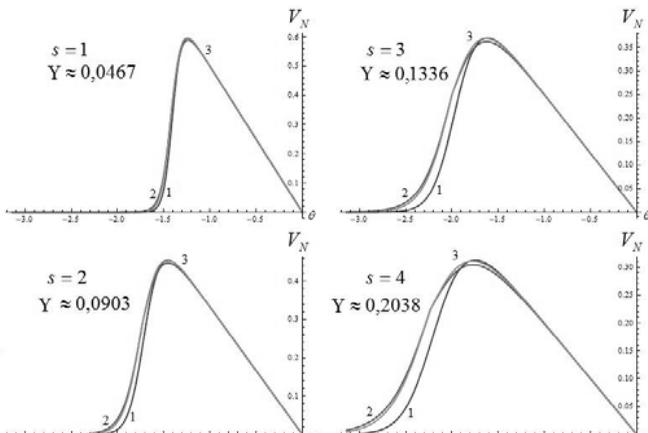


Рис. 3. Сравнение численного (кривые 1) и аналитического решения по стандартной схеме (кривые 2) для исходной N-волны на различных расстояниях s при $\Gamma = 0,01$

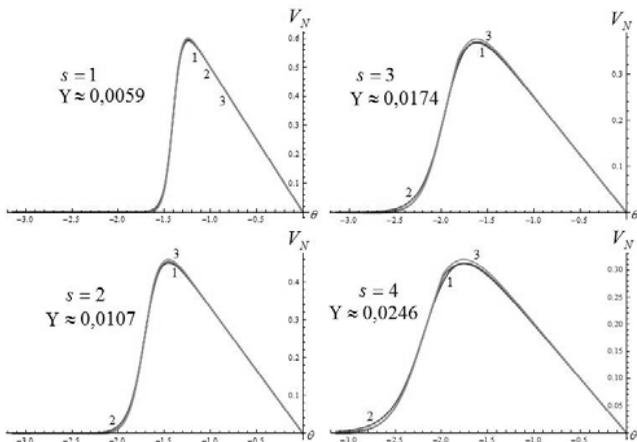


Рис. 4. Сравнение численного (кривые 1) и улучшенного аналитического решения со смещенной точкой сшивания (кривые 2) для исходной N-волны на различных расстояниях s при $\Gamma = 0,01$

Перейдем к рассмотрению исходной одиночной N-волны: $V = -\theta$ при $|\theta| < 1$ и $V = 0$ при $|\theta| > 1$. Каркас решения для N-волны также состоит из линейного профиля вдали от фронтов и модификации выражения (3) для фронта. Для построения ударного фронта можно использовать преобразование $\Phi = V_0 + \Phi_0 \left(\frac{\theta + V_0 s}{1 + s/s_0} \right)$, отвечающее наложению произвольного сигнала на посто-

янное течение V_0 . Ясно, что в случае переменного течения, определенного условиями сшивания, это преобразование будет выполняться только приближенно.

Кроме того, необходимо учесть, что в отличие от симметричного сигнала (4) ударный фронт N-волны смещается по мере распространения, причем в среднем скорость смещения равна $-V_{peak}/2$ [11], соответственно фаза волны должна

быть равна $-\int_0^s V_{peak} ds/2$. Таким образом, например, передний ударный фронт N-волны будет описываться выражением

$$\Phi(\xi) = A \left[1 + \tanh \left[\frac{A}{4\Gamma} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{8\Gamma}{A^2 s_0}} \right) \frac{\theta + \int A ds}{1 + s/s_0} \right] \right]. \quad (5)$$

Здесь учтено, что в случае N-волны «амплитуда» A ударного фронта, как следует из условий сшивания, равна половине пикового значения V_{peak} . «Амплитуда» A должна определяться из условия сшивания, однако, поскольку выражение (5) теперь выполняется приближенно, необходимо скорректировать значение амплитуды смещением точки сшивания. В частности, это связано с тем, что небольшая ошибка в амплитуде приводит к неточности определения скорости фронта и накоплению ошибки с расстоянием. Кроме того, ясно, что из-за существенного роста ширины ударного фронта пиковое значение в точном профиле N-волны будет гораздо меньше, чем пиковое значение в профиле простой волны. Все это позволяет построить аналитическое решение, пригодное для описания профиля N-волны на достаточно больших расстояниях. Сравнение численного и аналитического решений приведено на рис. 3 и 4. На рис. 3 построены численное (кривые 1) и полученное по стандартной схеме аналитическое решение (кривые 2). Кривые 3 изображают аналитическое решение с учетом следующего члена асимптотического разложения по Γ . Видно, что уже на расстоянии $s = 4$ аналитическое решение довольно сильно расходится с численным. На рис. 4 изображено аналитическое решение (кривые 2), построенное со смещением точки сшивания и, следовательно, с исправленной скоростью ударного фронта, в сравнении с численным решением (кривые 1). Это решение гораздо лучше аппроксимирует численное решение. Тем не менее, в профиле остаются неточности и артефакты, в частности, вблизи точки сшивания остается излом производной. По-видимому, они связаны с приближенностью примененного преобразования и методики определения амплитуды. Улучшить решение, возможно, удастся при использовании более точного внешне-го решения между ударными фронтами.

Поле точечного источника на больших высотах. Уравнение (2) справедливо для плоских волн, излучаемых протяженным источником, например, при излучении акустических волн колеблющейся земной поверхностью при сейсмической активности. В случае излучателя малых размеров при описании акустического поля на больших расстояниях необходимо учесть сферическую расходимость волны. Последовательный вывод эволюционного уравнения для этого случая возможен либо из трехмерного нелинейного уравнения четвертого порядка, обобщающего волновое уравнение на стратифицированную среду [12],

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - c^2 \Delta w - \frac{1}{\rho} \frac{\partial c^2 \rho}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} \right) - c^2 \omega_{BW}^2 \Delta_{\perp} w = \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} - c^2 \Delta_{\perp} Q + R, \quad (6)$$

либо рассмотреть линейное волновое уравнение [13], к которому, как часто принимается в нелинейной акустике, аддитивно добавляется нелинейное слагаемое. Это возможно, поскольку обычно нелинейность достаточно слабая и перекрестными членами можно пренебречь.

Уравнение (6) записано для вертикальной компоненты скорости $u_z = w$. Здесь также Q , R – нелинейные выражения достаточно сложного вида, но существенно упрощающиеся в приближении медленно изменяющегося профиля, ω_{BW} – частота Брента-Вейсяля. В случае сферически симметричной волны полная скорость (радиальная компонента u_r) связана с вертикальной компонентой соотношением $w = u_r \cos \Theta$, где Θ – угол между направлением волны и вертикалью.

Для высокочастотных волн $\omega \gg \omega_{BW}$ с малыми углами Θ после применения к (6) метода медленно изменяющегося профиля получим уравнение

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} - \frac{u_r}{2H} - \frac{\varepsilon}{c_0^2} u_r \frac{\partial u_r}{\partial \tau} = \frac{\eta e^{r/H}}{2\rho_{00} c_0^3} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \tau^2}. \quad (7)$$

По сравнению с (1) уравнение (7) содержит дополнительное слагаемое, ответственное за сферическую расходимость, которая в определенной степени компенсирует рост амплитуды за счет стратификации. Преобразованием

$$u(x, \tau) = u_0 V(x, \tau) e^{x/2H}, \quad s = z_{n1}^{-1} \int_{r_0}^r e^{x/2H} / r dr$$

уравнения Бюргерса. Сложность связана с тем, что в данном случае не удастся найти явное выражение для старых переменных через новые. Тем не менее, по аналогии с предыдущими схемами можно построить хорошо аппроксимирующие аналитические решения для исходных синусоидальной волны и N-волны. Таким образом, и в этом случае можно записать выражения для амплитуды и ширины ударного фронта, причем в них можно вернуться к исходным переменным и численный расчет не потребует.

Волны в неизотермической атмосфере. В рассмотренных выше задачах атмосфера Земли предполагалась изотермической. Однако температура реальной атмосферы испытывает значительные изменения с высотой. На малых высотах наблюдается относительное небольшое похолодание (до порядка -70°C), на высотах ионосферы, наоборот, происходит сильный, практически линейный рост до порядка 1000°C . Тем не менее, при определенных условиях изотермическая модель может быть оправданной. В частности, в [14] показано, что изменение температуры на небольших высотах меняет амплитуду и темпы эволюции волны на единицы процентов по сравнению с изотермическим случаем; качественная картина при этом сохраняется. На больших высотах учет температуры качественно меняет картину эволюции акустических волн.

Для вывода уравнения для волн в неизотермической атмосфере необходимо учесть следующие зависимости параметров от температуры:

$$H(x) = H_0 \frac{T(x)}{T_0}, \quad c(x) = c_0 \sqrt{\frac{T(x)}{T_0}}, \quad \eta(x) = \eta_0 \sqrt{\frac{T(x)}{T_0}}, \quad \rho_0(x) = \rho_{00} \exp\left[-\frac{T_0}{H_0} \int \frac{dx}{T(x)}\right],$$

где T – температура атмосферы, а также, что в уравнении (1) появится дополнительное слагаемое, связанное с градиентом локальной скорости звука. В итоге можно получить уравнение:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{T_0}{T} \left(\varepsilon u \frac{\partial u}{\partial \tau} + u \left(\frac{1}{2H_0} - \frac{1}{4T_0} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\eta_0}{2c_0^3 \rho_{00}} \exp\left[\int \frac{T_0 dz}{H_0 T} \right] \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} \right). \quad (8)$$

В этом уравнении надо обратить внимание на два фактора: во-первых, множитель T^{-1} перед всей правой частью, во-вторых, градиент температуры, влияющий на рост амплитуды волны.

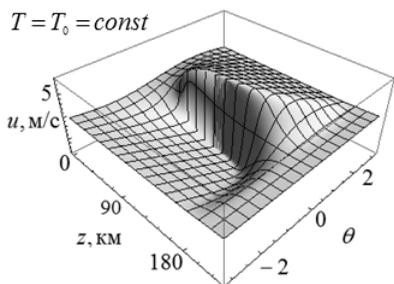


Рис. 5. Изменение профиля исходного синусоидального сигнала с высотой в изотермической атмосфере

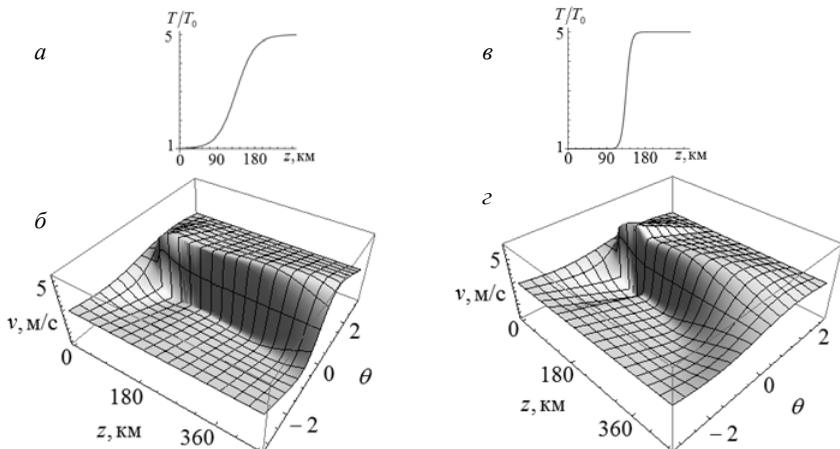


Рис. 6. Изменение профиля исходного синусоидального сигнала с высотой в атмосфере с плавным (а, б) и резким (в, з) скачком температуры

На рис. 5 показано изменение профиля исходного синусоидального сигнала с расстоянием в изотермической атмосфере. При этом амплитуда волны близка к нулю уже на высотах порядка 180 км. На рис. 6 приведены аналогичные графики для двух случаев – плавного (рис. 6, а, б) и резкого (рис. 6, в, г) – увеличения температуры. На рис. 6, а, в изображены зависимости температуры среды от высоты, а на рис. 6, б, г соответствующие профили акустических волн. В обоих случаях амплитуда волны даже на высоте 360 км заметно отличается от нуля. Это связано с множителем T^{-1} перед правой частью (8): при увеличении температуры правая часть уменьшается и замедляются все темпы эволюции волны, включая диссипацию, нелинейные искажения и стратификацию, т.е. волна становится квазистационарной и можно говорить о эффекте «замораживания» профиля при прохождении через скачок температуры. Этот эффект усиливается еще и тем, что рост температуры ослабляет затухание за счет вязкости в большей степени, чем нелинейное затухание и рост за счет стратификации из-за уменьшения коэффициента перед старшей производной. Различие между плавным и резким скачками связано с наличием градиента температуры в (8): резкий скачок с большим градиентом приводит к частичной компенсации усиления за счет стратификации. В итоге в области скачка образуется провал амплитуды, который уже не может полностью восстановиться при дальнейшем распространении из-за более сильного «замораживания» профиля, и волна затухает раньше, чем в случае плавного скачка. Тем не менее, эффект «замораживания» профиля сохраняется и в этом случае. Аналогичный эффект «замораживания» профиля имеет место и для исходной N-волны.

Важно отметить, что для рассмотренных моделей осязательный рост амплитуды начинается, когда периодическая волна вышла на предельную амплитуду, т.е. рост из-за стратификации скомпенсирован нелинейным затуханием, а начальная эволюция профиля проходит в квазизотермической среде. Если рост температуры начинается до выхода волны на предельную амплитуду, относительное затухание, например, по уровню $1/2$ может длиться дольше, поскольку при меньшей амплитуде уменьшается нелинейное затухание при неизменном вязком. Однако по абсолютной величине волна будет затухать быстрее, чем в предыдущих случаях. Это вызвано меньшей амплитудой, с которой волна выходит на стадию «замораживания» профиля.

Распространение ударных волн вертикально вниз к поверхности Земли. В такой постановке задача о волнах в стратифицированной атмосфере существенно отличается от предыдущего случая распространения вверх и, в тоже время, имеет непосредственный выход на прикладные проблемы. Одной из таких проблем является задача о распространении и воздействии ударных волн, образующихся при полетах сверхзвуковой гражданской авиации. Исследование характеристик таких волн важно для снижения их воздействия, развития перспективных сверхзвуковых пассажирских перевозок и улучшения акустической экологической ситуации в целом. Воздействие ударной волны определяется двумя параметрами – ее амплитудой и временем нарастания давления на фронте. Первым очевидным результатом, следующим из предыдущего рассмотрения, является дополнительное уменьшение амплитуды волны по мере распространения за счет стратификации и роста равновесной плотности, и может показаться, что роль стратификации в этой задаче является исключительно положительной в смысле улучшения экологической ситуации. Однако более тщательный анализ позволяет выявить и более суще-

ственные отличия. В рамках обычного уравнения Бюргерса (формально $H \rightarrow \infty$ в (1)) волны, распространяющиеся в прямом и обратном направлениях, связаны преобразованиями $x \rightarrow -x$, $V \rightarrow -V$. Однако слагаемое, ответственное за стратификацию, входит в уравнения с различным знаком, поскольку для этого слагаемого направления распространения уже не эквивалентны. Поэтому для волн, распространяющихся вниз, вместо (1) получим уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\varepsilon}{c_0^2} u \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{u}{2H} = \frac{\eta e^{-x/H}}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2}, \quad (9)$$

где указанное выше преобразование уже применено, так что $0 \leq x < \infty$. Введя новые переменные $V = e^{x/2H} u/u_0$, $s = (2H/z_{nl})(1 - e^{-x/H})$, сведем (9) к стандартной форме обобщенного уравнения Бюргерса

$$\frac{\partial V}{\partial s} - V \frac{\partial V}{\partial \theta} = \Gamma \left(1 - \frac{s}{s_0}\right) \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2}. \quad (10)$$

Уравнение (10) отличается от (2) зависимостью эффективной вязкости – по мере распространения вязкость убывает. Прежде всего, отметим, что в силу определения s коэффициент эффективной вязкости не может стать отрицательным, всегда $s \leq s_0$, причем $s \rightarrow s_0$ при $x \rightarrow \infty$. Выражение для одного периода исходного синусоидального сигнала может быть построено аналогично (4) и имеет вид:

$$V_s = \frac{1}{1+s} \left(-\theta + \pi \tanh \left[\frac{\pi}{4\Gamma(1+s)} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{8\Gamma(1+s)^2}{\pi^2 s_0}} \right) \frac{\theta}{1-s/s_0} \right] \right), \quad -\pi < \theta < \pi. \quad (11)$$

Как и ожидалось, амплитуда V , а вместе с ней и $u = u_0 V e^{-x/2H}$ убывает по мере распространения. Теперь обратим внимание на ширину ударного фронта. Из выражения (11) видно, что ширина ударного фронта определяется выражением

$$\Delta \theta_{sh} \sim 4\Gamma(1+s) \left(1 - s/s_0\right)$$

и, в зависимости от значения s_0 , либо сразу убывает, либо растет до конечного значения и затем опять убывает. Максимальное значение достигается при $s = (s_0 - 1)/2$. Это означает, что, несмотря на уменьшение амплитуды, второй параметр распространяющейся вниз ударной волны – ширина ударного фронта, т.е. время нарастания давления на фронте – также уменьшается, что в определенных условиях может оказать существенное воздействие, поскольку градиент давления оказывается большой величиной.

Нагрев атмосферы акустической волной. По мере распространения акустической волны происходит диссипация ее энергии и, как следствие, нагрев среды. Сравним тепловое воздействие исходного синусоидального сигнала, рассчитанное в [8], и исходной N-волны в изотермической атмосфере. Изменение температуры среды определяется изменением потока энергии волны:

$$c_p \rho_0 \left\langle \frac{\partial T}{\partial t} \right\rangle = - \left\langle \frac{\partial}{\partial x} cE \right\rangle,$$

здесь T – температура среды, $E = \rho_0(x)u^2(\theta, x)$ – энергия акустической волны, $\langle \dots \rangle = \int_{-\theta_0(x)}^{\theta_0(x)} \dots d\theta$, $\theta_0(x)$ – длительность импульса, причем для периодической волны будем рассчитывать энергию за один период, а для одиночного импульса – полную энергию. Для оценки ограничимся профилями волн в предельном случае $\Gamma \rightarrow 0$; в этом случае мы учитываем только затухание на ударных фронтах, преобладающее для разрывных волн. Для энергии синусоидальной волны (индекс S) и N-волны (индекс N) получаем выражения для энергии и темпа нарастания температуры соответственно:

$$E_S \sim \frac{\rho_{00}u_0^2T_0^3}{(1+s_0(e^{x/2H}-1))^2} \rightarrow \frac{\rho_{00}u_0^2T_0^3}{\sqrt{s_0}} e^{-x/H}, \quad E_N \sim \frac{\rho_{00}u_0^2T_0^3 e^{-x/H}}{\sqrt{1+s_0(e^{x/2H}-1)}} \rightarrow \frac{\rho_{00}u_0^2T_0^3}{\sqrt{s_0}} e^{-x/4H},$$

$$\left\langle \frac{\partial T}{\partial t} \right\rangle_S \sim \frac{cu_0^2T_0^3}{c_p} \frac{1}{2H\sqrt{s_0}}, \quad \left\langle \frac{\partial T}{\partial t} \right\rangle_N \sim \frac{cu_0^2T_0^3}{c_p} \frac{1}{2H\sqrt{s_0}} e^{3x/4H}.$$

Как видно, темп нарастания температуры при распространении периодического сигнала на больших высотах оказывается постоянным [8]. В то же время при распространении N-волны темп нагрева экспоненциально нарастает с высотой. Учитывая, что «математическая» периодическая волна содержит $n \rightarrow \infty$ число периодов, то она в конечном итоге приводит к неограниченному нагреву. В реальности, разумеется, возможны только ограниченные пути синусоидальных импульсов, поэтому несимметричный N-импульс может гораздо эффективнее нагревать верхние слои атмосферы. Это связано с тем, что амплитуда N-волны затухает медленнее и больше энергии доходит до высоких слоев, где за счет экспоненциального уменьшения плотности нагрев происходит сильнее. По-видимому, нагрев среды акустической волной ограничивается высотой, где перестает работать приближение сплошной среды. Как отмечено в [7], на этих высотах происходит отражение акустической волны.

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. Условия реальной атмосферы, при учете только самых основных факторов, а именно, стратификации, диссипации и неизотермичности (в данной работе не учитывались, например, локальные рефракционные неоднородности, наличие ветра и взвесей), принципиально меняют характеристики акустических волн и создают благоприятные ситуации для эффективного акустического воздействия как на состояние самой атмосферы, так и на приповерхностные объекты. В случае распространения вверх речь может идти об активном воздействии на состояние верхних слоев атмосферы или регистрации удаленных сигналов для дистанционного мониторинга или диагностики. В случае распространения вниз стратификация уменьшает чисто амплитудное воздействие и одновременно приводит к укрупнению градиента давления на фронте; таким образом, возможность усиленного акустического воздействия все равно остается.

Работа поддержана грантами программы Президента РФ поддержки ведущих научных школ (грант НШ-4590.2010.2) и РФФИ (грант 09-02-00925-а).

Литература

1. *Pierce A.D.* Spikes on sonic boom pressure waveforms // *J. Acoust. Soc. Am.* 1968. V. 44. P. 1052-1061.
2. *Дубровский А.Н., Руденко О.В., Хохлова В.А.* Флуктуационные характеристики волны звукового удара после прохождения случайно-неоднородного слоя // *Акуст. журн.* 1996. Т. 42. №5. С.623-628.
3. *Куличков С.Н.* Дальнее распространение звука в атмосфере (обзор) // *Известия Академии наук. Физика атмосферы и океана.* 1992. Т.28. №4. С.339-361.
4. *Руденко О.В.* Нелинейные методы в акустической диагностике (Обзор) // *Дефектоскопия.* Т. 29. №8. С. 24-32.
5. *Гусев В.А., Собисевич А.Л.* Низкочастотные волновые процессы в геосферах, предшествующие сильным сейсмическим событиям // *Коллективная монография Экстремальные природные явления и катастрофы. Т.1. Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений.* М.: ИФЗ РАН, 2010.
6. *Гусев В.А., Руденко О.В.* Статистические характеристики интенсивной волны за двумерным фазовым экраном // *Акуст. журн.* 2006.Т.52, №1, с.30-42.
7. *Голицын Г.С., Романова Н.Н.* Вертикальное распространение звуковых волн в атмосфере с переменной по высоте вязкостью // *Изв. АН СССР.* 1968. Т.4. №2.
8. *Романова Н.Н.* О вертикальном распространении коротких акустических волн в атмосфере // *Изв. АН СССР.* 1970. Т. 6. №2.
9. *Enflo B.O., Rudenko O.V.* To the theory of generalized Burgers' equation // *Acta acustica,* 2002. V. 88. P. 155-162.
10. *Гурбатов С.Н., Руденко О.В., Саичев А.И.* Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. М.: Физматлит, 2008.
11. *Гусев В.А., Преснов Д.А.* Трансформация интенсивных пространственно-модулированных акустических сигналов в вязких неоднородных средах // *Сборник трудов Научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества. Т 1. М.: ГЕОС, 2011. С. 161-165.*
12. *Gusev V.A., Zhostkow R.A.* Analytical solutions for diffraction problem of nonlinear acoustic wave beam in the stratified atmosphere // *Proceedings of the International Conference «Days on Diffraction' 2011», Saint Petersburg, May 30 – June 3, 2011.*
13. *Григорьев Г.И.* Акусто-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // *Изв. Вузов. Радиофизика,* 1999. Т.42. №1. С.3-25.
14. *Гусев В.А., Жостков Р.А.* Вертикальное распространение интенсивных акустических сигналов в неизотермической стратифицированной атмосфере // *Сборник трудов Научной конференции «Сессия Научного совета РАН по акустике и XXIV сессия Российского акустического общества. Т 1. М.: ГЕОС, 2011. С. 161-165.*

ОБ УСТОЙЧИВОМ РАЗВИТИИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ И СОЦИАЛЬНО-
ЭКОНОМИЧЕСКИМ ПРИОРИТЕТАМ РОССИИ

Дегтярев К.С.

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

«Устойчивое развитие» стало понятием, официально признанным на международном уровне. Оно широко вошло в административный, политический, научный и публицистический обиход, в систему образования. Необходимость устойчивого развития уже воспринимается как аксиома. Это происходит и в мировом масштабе, и на уровне отдельных государств, включая Россию. В данной статье рассматриваются ключевые принципы устойчивого развития в сопоставлении с российской и мировой реальностью, выявляются существующие между ними противоречия и риски для России, связанные с отсутствием критического осмысления концепции устойчивого развития, обозначаются направления поиска новых решений.

Разработка глобальной концепции «устойчивого развития»

Термин «устойчивое развитие» (sustainable development) стал широко использоваться после доклада Комиссии Г. Х. Брундтланд «Наше общее будущее» (Our Common Future) в 1987 году [1]. Как было сказано в докладе, человечество имеет возможность сделать развитие устойчивым с тем, чтобы обеспечить свои текущие потребности без нарушения способности следующих поколений удовлетворять свои нужды (*«Humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs»*). Этот постулат лёг в основу последующего определения устойчивого развития как развития, удовлетворяющего потребности настоящего времени, но не ставящего под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности. Концепция устойчивого развития, в соответствии с положениями доклада, означает ограничения воздействия на окружающую среду, соотносясь с возможностью биосферы поглощать воздействие человека (*«The concept of sustainable development does imply limits - not absolute limits but limitations imposed by the present state of technology and social organization on environmental resources and by the ability of the biosphere to absorb the effects of human activities»*). При этом определение слову «развитие» (development) не было дано — оговаривалось лишь, что оно в данном случае понимается в самом широком смысле. На Конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро 3-14 июня 1992 году был принят основополагающий пакет документов по вопросам устойчивого развития, основным из которых стала декларация устойчивого развития, состоящая из 27 пунктов [2].

Проблемы понимания и конкретизации концепции устойчивого развития на мировом и национальном уровне

В соответствии с международными документами, концепции и стратегии устойчивого развития были приняты в большинстве стран мира. Они встретили критику со стороны исследовавших их экспертов, по словам которых, концепции развитых стран предполагают «продолжение инерционного развития», а развивающихся – «антиэкологическую модернизацию» экономики [3]. В то же время, документы ООН также не отличаются ясностью формулировок, и более или менее чёткие целевые параметры состояния природы и общества, тем более — механизмы его достижения, никак не обозначаются. Эти документы дают ряд установок, далеко не бесспорных с точки зрения принципиальной осуществимости, а также с морально-этических позиций. В частности, заметное внимание и в докладе Комиссии Г.Х. Брундтланд, и в Рио-де-Жанейрской декларации уделено беспокойству по поводу быстрого роста населения Земли. Но, если в первом документе в качестве инструмента его снижения предполагается социально-экономическое развитие слаборазвитых стран, что должно привести к снижению рождаемости, то во втором демографическая часть (принцип 8) звучит более неопределённо и двусмысленно: *«Для достижения устойчивого развития и более высокого качества жизни для всех людей государства должны ограничить и ликвидировать нежизнеспособные модели производства и потребления и поощрять соответствующую демографическую политику»*.

Попытки конкретизировать подходы к устойчивому развитию, предпринятые представителями научного сообщества, привели, скорее, к появлению новых вопросов. В частности, в развитие постулатов доклада Комиссии Г.Х. Брундтланд предлагается оценивать «хозяйственную ёмкость биосферы», т.е. предельно допустимую нагрузку на природную среду. В этом случае «устойчивое развитие» определяется как *«такое развитие, при котором воздействия на окружающую среду остаются в пределах хозяйственной ёмкости биосферы, так что не разрушается природная основа для воспроизводства жизни человека»*. Под хозяйственной (экологической или несущей) ёмкостью биосферы понимается *«предельное антропогенное воздействие, за которым в биосфере начинаются необратимые деградационные изменения»*[3]. Сама по себе оценка хозяйственной ёмкости биосферы — задача со сложным решением и возможностью различных вариантов ответа. Более того, на фоне противоречивости самих терминов «устойчивости» и «развития», что является «развитием» в данном случае так и не пояснено. Определение «устойчивое развитие» остаётся некорректным: *«Устойчивое развитие — это такое развитие...»*. Открыт и вопрос, о том какие способы допустимы и предпочтительны для того, чтобы не превысить хозяйственную ёмкость биосферы. Из общего контекста можно сделать вывод, что речь идёт лишь о физическом существовании человека как вида, необходимое условие которого - соблюдение лимитов численности населения и социально-экономического роста. Тогда слово «развитие» просто призвано скрыть пессимизм относительно будущего человечества. Заметим, что в ряде документов речь идёт не о развитии, а именно о проживании как таковом: «A Strategy for Sustainable Living» («Стратегия устойчивой жизни») [4].

Суммируя и систематизируя материалы по вопросу устойчивого развития, можно выделить четыре основных направления [5]:

1. Сохранение естественных экосистем;

2. Стабилизация численности населения;
3. Рационализация потребления;
4. Экологизация производства.

При этом сохраняется вопрос о способах достижения данных целей и о самом понимании данных направлений. Более того, попытка детализация понятия и концепции «устойчивое развитие» дополнительно привносит в неё неоднозначное содержание.

Концепция устойчивого развития и риски для России

Россия находится в числе стран, декларировавших свою приверженность принципам устойчивого развития, следуя пакету документов ООН. Международные документы и детализация концепции устойчивого развития, в том числе — со стороны представителей российского научного сообщества, легли в основу «Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию», утверждённой в 1996 году. [6]. В ней, в большей или меньшей степени, отражены все перечисленные выше направления. Как следствие, российский вариант концепции устойчивого развития отличается теми же недостатками. Большая часть постулатов российской концепции носит, скорее, декларативный характер, например: *«Переход к устойчивому развитию предполагает постепенное восстановление естественных экосистем до уровня, гарантирующего стабильность окружающей среды. Этого можно достичь усилиями всего человечества, но начинать движение к данной цели каждая страна должна самостоятельно»*; *«В дальнейшем постепенно должна решаться проблема гармонизации взаимодействия с природой всего мирового сообщества. Россия, на долю которой приходится значительная часть ненарушенных экосистем, будет играть в этом процессе одну из ключевых ролей»*; *«развитие сельского хозяйства на основе экологически прогрессивных агротехнологий, адаптированных к местным условиям, реализация мер по повышению плодородия почв и их охране от эрозии и загрязнения, а также создание системы социальной защиты сельского населения»* и т. д., и т. п.

Заметный акцент в российской концепции делается на переход к рыночным отношениям, демократизацию, создание гражданского общества как необходимые условия устойчивого развития, которому мешает груз, оставшийся от прежней - экономически и экологически неэффективной системы. В то же время, в российской концепции содержится ряд достаточно категоричных установок, также в духе международных принципов устойчивого развития, но при этом жёстче сформулированных: *«Улучшение качества жизни людей должно обеспечиваться в тех пределах хозяйственной емкости биосферы, превышение которых приводит к разрушению естественного биотического механизма регуляции окружающей среды и ее глобальным изменениям»*; *«Переход к устойчивому развитию предполагает строгое соблюдение ряда ограничений, следовать которым будет нелегко, особенно на начальных этапах. Это, в частности, осуществление хозяйственных мероприятий преимущественно на уже освоенных территориях и отказ от реализации любых проектов, которые наносят невосполнимый ущерб окружающей среде...»*; *«Ввести хозяйственную деятельность в пределы емкости экосистем на основе массового внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий, целенаправленных изменений структуры экономики, структуры личного и общественно-го потребления»*.

Что касается демографической политики России, то здесь концепция не даёт чётких рекомендаций, но упомянуто о необходимости «решения демографических проблем» в соответствии с решениями Рио-де-Жанейрской конференции ООН и последующих международных форумов, где, прямо или косвенно, постулируется необходимость «стабилизации» численности населения. Одновременно, в концепции делается акцент на то, что Россия — страна с наибольшей площадью естественных экосистем (называется площадь в 8 млн кв.км), что и может стать ключевым вкладом России в реализацию концепции устойчивого развития в мировом масштабе: *«Роль России в решении планетарных экологических проблем определяется обладанием большими по площади территориями, практически не затронутыми хозяйственной деятельностью и являющимися резервом устойчивости всей биосферы в целом».*

Некоторые установки российской концепции, их внутренние противоречия (например, косвенное признание того, что хозяйственная ёмкость биосферы в России превышена, одновременно с утверждением о наибольшей в мире площади неповреждённых экосистем, охватывающих половину территории страны), и готовность далее следовать международным принципам устойчивого развития несёт для России серьёзные риски, особенно — учитывая возможность достаточно вольного понимания этих принципов и мер, допустимых для их осуществления.

Следование концепции устойчивого развития без её критического осмысления и при возможности разных интерпретаций её постулатов создаёт для России три взаимосвязанные группы рисков:

- Торможения экономического роста и развития;
- Продолжения депопуляции;
- Снижения материального благосостояния жителей страны.

Понятие «естественности» экосистемы и «невосполнимости ущерба» окружающей среде так же неопределённо, как и ряд других. Отказ от проектов, наносящих окружающей среде невосполнимый ущерб, можно интерпретировать и как полное прекращение строительства любых крупных объектов: дорог, электростанций, промышленных предприятий, населённых пунктов и т. д. Их создание зачастую сопряжено не только с ущербом окружающей среде как таковым, но и с полным изменением её типа — созданием городских, индустриальных, сельскохозяйственных ландшафтов. Таким способом были преобразованы значительные площади — и в мире, и в России, что не вызвало катастрофы — напротив, это было необходимо для жизнеобеспечения населения.

Географическую оболочку Земли в целом уже нельзя рассматривать как «естественную» экосистему. Если предполагается прекратить дальнейшее распространение антропогенных ландшафтов по поверхности Земли, то возникает вопрос — на каком основании? Тем более — на каком основании этот подход применим к России, где наиболее велика доля ландшафтов, слабо изменённых деятельностью человека? Кроме того, не во всех случаях увеличение антропогенной нагрузки на территорию, где уже ведётся хозяйственная деятельность, предпочтительнее для человека и окружающей среды, экономически и экологически эффективнее распределения той же нагрузки на большей территории. Это также относится к России, где именно большие земельные ресурсы являются экономическим и экологическим преимуществом.

Если говорить о «стабилизации численности населения» (оставляя «за скобками» её морально-этическую составляющую), то сложно найти что-либо менее актуальное для России, переживающей тяжёлый демографический кризис с сокращением численности населения в течение последних 20 лет. Определённая интерпретация понятий «хозяйственная ёмкость биосферы», «ликвидация нежизнеспособных моделей» и «соответствующая демографическая политика для более высокого качества жизни» могут привести к, казалось бы, парадоксальному выводу об «избыточности» населения России.

В качестве референтной группы для России рассматриваются ведущие западные страны. В том числе в качестве «законодателей» и моделей и в вопросе устойчивого развития, в отличие от России, отягощённой грузом прошлой неэффективной системы. При этом лишь две из ведущих западных стран можно считать сопоставимыми с Россией — по территории и специфике природных условий. Это, очевидно, Канада, а также Австралия, где экстремальная климатическая специфика носит иной характер — большая часть территории находится в аридных и экстрааридных условиях.

В обеих этих странах плотность населения — около 3 чел./кв.км, при этом основная его часть сосредоточена в узких, наиболее благоприятных для жизни зонах: в Канаде — вдоль южной границы, в Австралии — на юго-восточном побережье. Показательно сравнение Канады с её южным соседом США — страной со сходной историей заселения, экономической моделью, культурными особенностями. Плотность населения в США — более 30 чел./кв. км — в 10 раз выше, чем в Канаде. Отсюда можно сделать вывод, что «хозяйственная ёмкость» территории Канады в пересчёте на единицу площади примерно в 10 раз ниже, чем в США. Но она примерно равна хозяйственной ёмкости территории России, исходя из практически тех же природных условий (см.табл.1). Между тем, плотность населения России в настоящее время более 8 чел./кв.км, или в 2,5 раз выше, чем в Канаде.

Таблица 1. Площадь и население Австралии, Канады, России и США

Страна	Площадь, млн. кв.км	Численность населения, млн	Плотность населения, чел./кв.км
Австралия	7,7	22,9	3,0
Канада	10,0	34,2	3,4
США	9,5	313,2	34,0
Россия	17,1	142,8	8,4

Отсюда, в свою очередь, несложно «обосновать» то, что численность населения России, отвечающая принципам устойчивого развития и обеспечивающая достаточное качество жизни людей, **примерно в 2,5 раз ниже нынешней, или около 57 млн человек**, с сосредоточением основной его части вдоль южных границ страны и превращением территории страны в своего рода экологический «резервуар» для остального мира.

Заметим, что именно в последние 20 лет идёт падение численности населения России при одновременном его оттоке с северо-востока на юго-запад. Этот процесс, в отсутствие масштабных войн и стихийных бедствий, фиксируется в

российской истории впервые. Что касается «рационализации потребления», если рассматривать его как одно из направлений устойчивого развития для России, то оно вступает в противоречие с фактом существенно менее высокого уровня материального благосостояния и потребления жителей России по сравнению с населением западных стран. В частности, потребление энергии на душу населения в России примерно в 2 раза ниже, чем в Канаде и США, притом, что объективно, исходя из природных условий, оно должно быть выше.[7].

В целом же, на 10-12% населения Земли, живущих в США и странах ЕС, приходится 40-50% всего объёма потребления природных ресурсов, в частности — нефти и другого углеводородного сырья. Таким образом, потребление природных ресурсов на душу населения в западных странах примерно в 4 раза выше среднемирового. На данные страны приходится также 40-50% мирового ВВП, т. е. их экономики не являются экологически более эффективными относительно других стран.

Данное сопоставление ставит также под вопрос утверждение о росте народонаселения как одной из главных причин экологических проблем, поскольку снижение уровня душевого потребления в западных странах в 2 раза дало бы снижение нагрузки на природную среду, эквивалентное сокращению в 2 раза населения Земли. Под вопросом оказывается и состоятельность концепции устойчивого развития в целом, учитывая то, что её разработчиками были, прежде всего, западные страны. Один из пунктов нынешней российской концепции устойчивого развития: «формирование эффективной системы пропаганды идей устойчивого развития и создание соответствующей системы воспитания и обучения», уже реализуется — в том смысле, что идеи устойчивого развития пропагандируются и, в том числе, соответствующие предметы присутствуют в системе образования. При этом неясно, какие именно идеи устойчивого развития и в какой интерпретации применимы в нашей стране.

Выводы

Концепция устойчивого развития в её нынешнем виде не отвечает реальным проблемам и положению дел в России. Попытки увязать устойчивое развитие с российской действительностью, адаптировать к нашей стране и нашим реальным потребностям, создаёт ряд противоречий, делающих российский вариант концепции устойчивого развития неработающим.

Не вызывает сомнений необходимость минимизации ущерба окружающей среде при хозяйственной деятельности, но «устойчивое развитие», редуцированное до этого требования, становится просто «рациональным природопользованием», т. е. решением технической задачи.

«Устойчивое развитие» претендует на роль новой философии во взаимоотношениях человека и окружающей среды. На данный момент просматривается тенденция к «энвайронментализму», некоему приоритету «естественных экосистем» перед людьми. Отношение к природной среде как к инструменту удовлетворения материальных потребностей человека, в свою очередь, несёт прямые риски для человечества — и для его духовного здоровья, и для его физического существования.

Россия, для которой такая постановка вопроса тоже актуальна, но неприемлема концепция устойчивого развития в «Рио-де-Жанейрском» варианте, получает стимул для того, чтобы выработать и предложить миру свою «философию хозяйства», тем более, что для этого есть предпосылки и в русской философской мысли, включая работы С.Н. Булгакова, В.И. Вернадского и других мыслителей.

Литература

1. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. World Commission on Environment and Development, 1987
2. Рио-де-Жанейрская декларация по окружающей среде и развитию/Доклад Конференции ООН по окружающей среде и развитию – A/CONF.151/26/Rev.1(Vol.I): http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/riodecl.shtml
3. Данилов-Данильян В.И. Устойчивое развитие. В.кн.: Экономико-математический энциклопедический словарь. Москва. 2010.
4. Caring for the Earth: A Strategy for Sustainable Living. International Union for Conservation of Nature, 1991
5. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Экологический вызов и устойчивое развитие. М., 2000
6. Концепция перехода Российской Федерации к устойчивому развитию (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 апреля 1996 года).
7. Дегтярев К.С., Соловьев А.А. Энергообеспечение России – проблемы и возможности решения - «Молодой учёный», №8 (31)/2011, т. I, с.107-112.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВОДООБМЕНА НАД ПРИБРЕЖНЫМ
СКЛОНОМ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ
ПРИ ОСЕННЕМ ВЫХОЛАЖИВАНИИ

Есюкова Е.Е., Чубаренко И.П.

*Атлантическое отделение Учреждения Российской академии наук Институт
океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Лаборатория прибрежных систем, г. Калининград,
elena_esiukova@mail.ru, irina_chubarenko@mail.ru*

ВВЕДЕНИЕ

На основе проведённых численных экспериментов на трёхмерной гидродинамической модели MIKE3-FlowModel (DHI) проведена оценка масштаба горизонтального переноса вод над прибрежным склоном при осеннем выхолаживании через величину горизонтального удельного объёмного расхода вод через комплекс вертикальных сечений по изобатам в интервале от 10 м до 60 м в четырёх точках прибрежной зоны Юго-Восточной Балтики (от 54°50' с.ш. до 57°40' с.ш.). Прибрежная зона находится под влиянием целого комплекса специфических гидрометеорологических и динамических процессов, и при этом она же несёт максимальную антропогенную нагрузку. Численное моделирование является основным инструментом изучения общей структуры течений, при этом, однако, само моделирование этого процесса также представляет определённую трудность, поскольку требует от модели и корректного баланса вертикального и горизонтального обмена импульсом и теплом, и аккуратного задания условий теплообмена на поверхности.

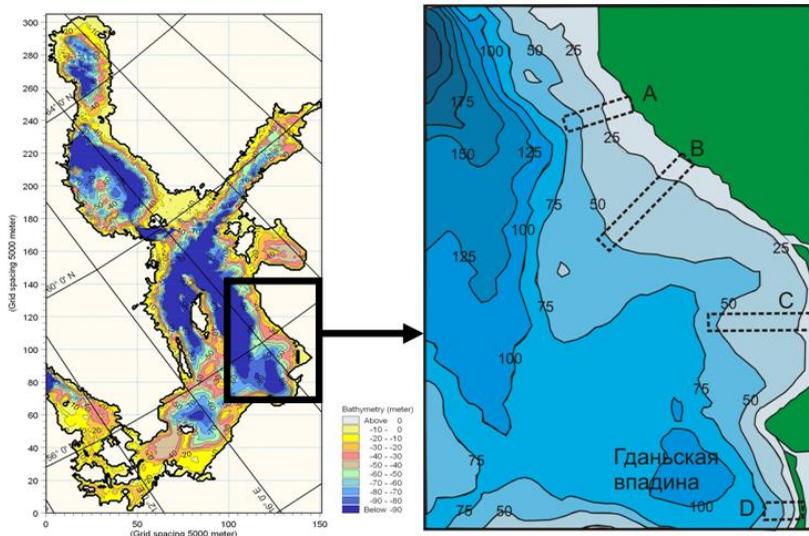
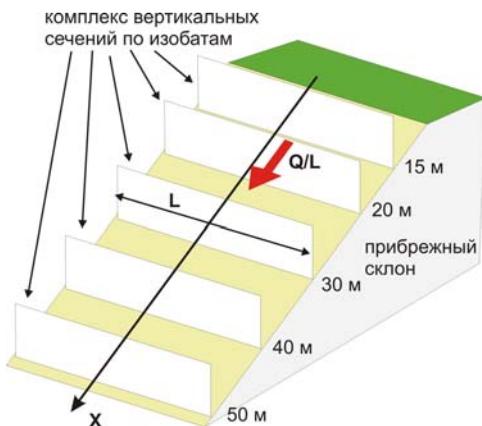


Рис. 1. Батиметрия модельного бассейна на сетке 152×306 ячеек; размер ячейки 5 км \times 5 км и исследуемый район Юго-Восточной Балтики; указано положение четырёх рассматриваемых створов А, В, С и D.



ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Расчёты проводились на трёхмерной численной модели MIKE3-FlowModel (DHI Water&Environment, <http://www.dhi.dk/> [1]). Размер прямоугольной регулярной расчетной сетки с ячейками 5 км \times 5 км по горизонтали составил 152×306 ячеек (рис.1); по вертикали задавалось 92 слоя с равномерным шагом 4 м; шаг интегрирования по времени составлял 90 сек. Структура глубин задана исходя из наи-

Рис. 2. Комплекс вертикальных сечений, расположенных вдоль изобат над прибрежным склоном в Юго-Восточной Балтике, где Q/L ($\text{м}^3/\text{с}/\text{м}$) - удельный расход (на единицу длины) вниз по склону.

более часто используемых для Балтики данных Института Исследований Балтийского моря (Варнемюнде, Германия) [2]. Для поля ветра (переменного в пространстве и времени) использованы данные ежедневных измерений за 2007 г. на 20 станциях наблюдения [3]. Более подробная информация о модели приведена в ранее опубликованных работах [4], [5]. Для части модельного бассейна - прибрежной зоны Юго-Восточной Балтики (от $54^{\circ}50'$ с.ш. до $57^{\circ}40'$ с.ш.) - проведена оценка масштаба горизонтального переноса вод над прибрежным склоном через величину горизонтального удельного объёмного расхода вод (рис.2).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Наиболее подробно проанализирована структура полей течений при осеннем выхолаживании вод с поверхности. Она обусловлена совместным действием вертикальной термо-гравитационной конвекции из-за выхолаживания с поверхности и горизонтальной адвекции, вызванной разницей плотностей в мелкой и глубокой частях бассейна. Вертикальное перемешивание происходит значительно быстрее, чем горизонтальное, поэтому натурные наблюдения фиксируют устойчивое понижение температуры воды к берегу при вертикальной изотермии. Численное решение показывает формирование холодных пограничных слоёв у поверхности и у дна. Общая медленная (масштаб скорости течений - миллиметры в секунду, редко - до единиц сантиметров в секунду) циркуляция - к берегу в приповерхностных и промежуточных слоях и от берега вдоль подводного склона - разрывается плюмами холодных вод (термиками), падающими из поверхностного слоя до самого дна. В целом, численное решение хорошо воспроизводит натурные наблюдения, провидившиеся в аналогичных ситуациях [6].

Для анализа характера изменений величины водообмена вниз по склону получены временные серии (с шагом 90 с в течение года) величин горизонтального объёмного расхода через комплекс вертикальных сечений, проведённых вдоль изобат, в интервале от 10 м до 60 м над четырьмя прибрежными склонами Юго-Восточной Балтики (склоны А, В, С, D на рис. 1). Эти сечения захватывали всю глубину водоёма (от поверхности до дна, без деления на слои). Полная длина сечений составила от 5 до 25 км. За время расчёта, через всё поперечное сечение по нормали к нему проходит интегральный объёмный расход вод Q ($\text{м}^3/\text{с}$). Для проведения сравнительного анализа вычислялись значения удельного расхода (на единицу длины) (Q/L , ($\text{м}^3/\text{с})/\text{м}$).

Получены графики зависимости расходов (вниз по склонам) через вертикальное сечение бассейна от расстояния от берега. Наблюдается устойчивый и практически линейный рост расхода горизонтального транспорта с расстоянием от берега. Для более детального анализа этой зависимости, были выбраны некоторые моменты времени и вычислены скорости прироста расхода вниз по склону. Собственно удельный расход течений увеличивается вниз по склону (от изобаты 10 м до изобаты 60 м) в октябре/ноябре/декабре: в начале склонов (через изобату 10 м) он растёт от 0.015 до 0.08 ($\text{м}^3/\text{с})/\text{м}$, через изобату 20 м - от 0.03 до 0.25($\text{м}^3/\text{с})/\text{м}$, изобату 30 м - от 0.08 до 0.38 ($\text{м}^3/\text{с})/\text{м}$, изобату 40 м - от 0.15 до 0.41 ($\text{м}^3/\text{с})/\text{м}$, к концу склонов (50 м) - от 0.12 до 0.36 ($\text{м}^3/\text{с})/\text{м}$, и через изобату 60 м - от 0.25 до 0.55 ($\text{м}^3/\text{с})/\text{м}$. При этом в ноябре месяце линейный характер увеличения расхода с расстоянием вниз по склону

$$q(x) = q_0 + k_1 \cdot x \quad (1)$$

прослеживается особенно чётко (рис. 3).

Глубина залегания пикноклина в рассматриваемые месяцы увеличивалась от 26-34 м в октябре до 42-46 м в ноябре и 50-56 м в декабре. Соответственно изменялась и длина склона, обеспечивающего процесс формирования каскадинга.

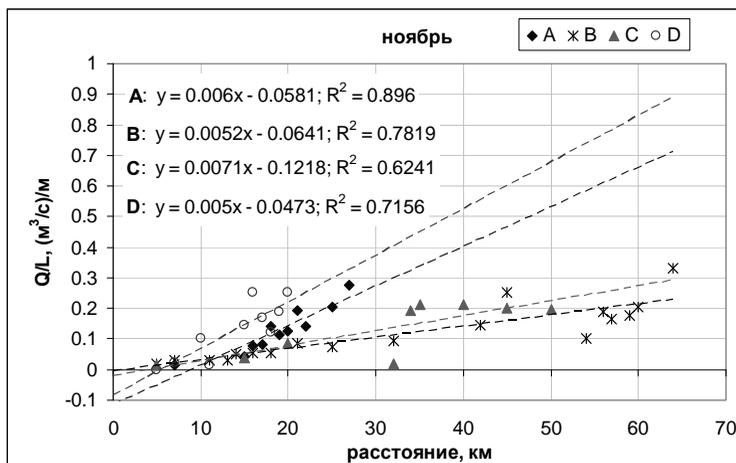


Рис. 3. Среднемесячный удельный расход вниз по склону Q/L , ($\text{м}^3/\text{с}/\text{м}$) через вертикальные сечения, поставленные по изобатам в диапазоне от 10 м до 60 м, от расстояния от макушки склона (склоны А, В, С, D, ноябрь).

Таблица 1. Коэффициенты уравнения (1) зависимости среднемесячного удельного расхода вниз по склону от расстояния от макушки склона (ноябрь).

створ	q_0	k_1
А	- 0.0581	0.006
В	- 0.0641	0.0052
С	- 0.1218	0.0071
Д	- 0.0473	0.005
среднее	- 0.07283	0.00583

Результаты расчётов дают следующую зависимость (рис. 3, табл. 1):

$$q(x) = -(0.07 \pm 0.05) + (0.006 \pm 0.001) \cdot x. \quad (1a)$$

Достоверность линейной аппроксимации для отдельных профилей составляет 0.6-0.9. Расходы на концах прибрежных склонов составляют около 0.1-0.4 ($\text{м}^3/\text{с}/\text{м}$), что имеет порядок, схожий с наблюдаемым (например, [6] в Женевском озере - 0.4-1.0 ($\text{м}^3/\text{с}/\text{м}$)).

Принимая длину береговой линии рассматриваемой области около 300 км, интегральный объёмный расход вод в направлении от берега в открытую часть моря в ноябре составляет порядка 145 км³/месяц. Наиболее продуктивными в регионе являются склоны В и D.

Также в течение периода выхолаживания (ноябрь) был проанализирован характер изменения (осреднённой за месяц) температуры воды в подповерхностном слое по мере приближения к берегу (рис. 4). Все кривые имеют в области над склоном значительный участок, где линейная аппроксимация вида

$$T(x) = T_0 + k_2 \cdot x \tag{2}$$

даёт результат с достоверностью 0.8-0.9 (рис. 4).

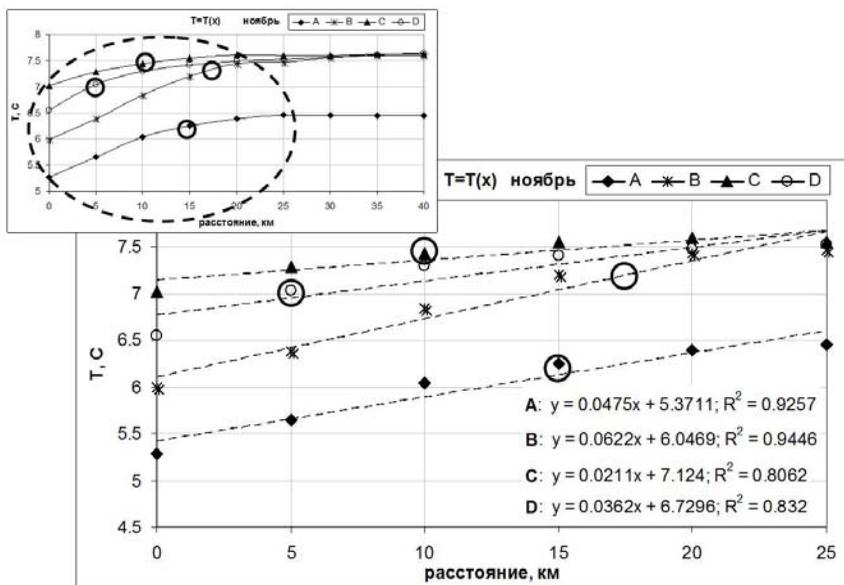


Рис. 4. Горизонтальные профили температуры воды (среднемесячные) в подповерхностном слое над прибрежными склонами в Юго-Восточной Балтике в ноябре. На всех графиках отмечено (круглый значок) положение пикноклина (т.е. то расстояние от берега, на котором пикноклин выходит на склон - на глубине 42-45 м) для каждого створа.

Результаты расчётов дают следующую осреднённую зависимость (рис.4, табл.2):

$$T(x) = (6.73 \pm 0.95) + (0.042 \pm 0.021) \cdot x. \tag{2a}$$

Таблица 2. Коэффициенты уравнений линейной зависимости (2) среднемесячной температуры воды в подповерхностном слое от расстояния от берега (ноябрь).

створ	T_0	k_2
А	5.3711	0.0475
В	6.0469	0.0622
С	7.124	0.0211
Д	6.7296	0.0362
среднее	6.3179	0.0418

Градиент температуры воды по горизонтали составляет в модели 2-6 градусов на 100 км; при этом по среднесезонным данным [8] он составляет 3-4 градуса на 100 км. Ранее аналогичная картина была выявлена над северным склоном Каспия для октября-ноября (0.15-0.3 градуса на 100 км в модели против 2-3 градусов на 100 километров в природе) [7].

Таким образом, как было показано выше, кривые и расхода течений вниз по склону, и температуры воды в зависимости от расстояния от берега, имеют участки, хорошо аппроксимируемые линейными функциями. Поэтому для каждого рассмотренного сечения можно записать

$$q(x) = q_0 + k_1/k_2 \cdot (T(x) - T_0), \quad (3)$$

и результаты расчётов дают

$$q(x) = -(0.07 \pm 0.05) + (0.006 \pm 0.001) / (0.042 \pm 0.021) \cdot (T(x) - (6.73 \pm 0.95)). \quad (3a)$$

Данная зависимость позволяет устанавливать для периода выхолаживания над прибрежными склонами в данном районе Юго-Восточной Балтики соответствие между наблюдаемыми значениями температуры воды в подповерхностном слое и значениями удельного расхода вниз по склону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые расчёты и их анализ позволили прояснить особенности процесса сезонного выхолаживания над прибрежным склоном, связать горизонтальный градиент температуры воды со скоростью нарастания расхода течений вниз по склону. Все кривые имеют существенный участок над склоном, где линейная аппроксимация даёт результат с достоверностью 0.8-0.9. Показано, что объём сползающих по склону холодных вод примерно линейно растёт с глубиной. Расходы на концах прибрежных склонов составляют порядка 0.1-0.4 (м³/с)/м. Зависимость позволяет устанавливать для периода выхолаживания над прибрежными склонами в данном районе Юго-Восточной Балтики соответствие между наблюдаемыми значениями температуры воды в подповерхностном слое и значениями удельного расхода вниз по склону.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проводятся при поддержке грантов РФФИ № 10-05-00540, 10-05-00472, 11-05-00674.

Литература

1. <http://www.dhi.dk>
2. <http://www.io-warnemuende.de>
3. <http://gp5.ru/>
4. Есюкова Е.Е. Пространственная структура и внутригодовая изменчивость горизонтального водообмена в Балтийском море / Автореферат дисс. на соиск. степ. канд. геогр. наук. Калининград, 2009. 25 с.
5. Esiukova E.E. Spatial structure of horizontal water exchange within the Baltic Sea: results of numerical modeling // Selected papers of Int. Conf. "Fluxes and structures in fluids". Moscow, 23-27 June 2009. pp. 374-379.
6. Fer, I., U. Lemmin, S. A. Thorpe. Observations of mixing near the sides of a deep lake in winter. *Limnol. Oceanogr.*, 47(2), 2002, 535–544.
7. Есюкова Е.Е., Чубаренко И.П. Выхолаживание над прибрежным склоном: результаты численного моделирования. // Физические проблемы экологии (экологическая физика): Сборник научных трудов. / Под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.Н. Показеева.- М.: МАКС Пресс, 2007. № 14. С. 143-152.
8. Janssen, F., Schrum C., Backhaus J. O. A Climatological Data Set of Temperature and Salinity for the Baltic Sea and the North Sea // *Dt. hydrogr. Z. Erganzungsheft.* 1999. Supplement 9. 245 p.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИНАМИКА МЕЖГОДОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ АРАВИЙСКОГО МОРЯ 1985-2007 гг.

А.Н. Жуков, А.А. Латушкин, В.В. Пустовойтенко, А.А. Сизов

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

По данным спутниковых измерений температуры поверхности (SST) Аравийского моря проведен анализ доминирующих тенденций их межгодовой изменчивости за 1985-2007 гг. Исследована пространственная неоднородность климатических колебаний этого параметра для разных частей Аравийского моря.

Муссонный характер смены типов атмосферной циркуляции в сезонном цикле на севере Индийского океана связан с системой ветров над Аравийским морем и Бенгальским заливом. В летние месяцы там дуют ветры с юго-запада, а в зимние — с северо-востока [1]. Отдельные экспедиционные исследования особенностей такой динамики воздушных и водных масс в этом районе были проведены еще в XIX веке [2]. Однако, детальное изучение муссона Аравийского моря стало возможным только в 80-е годы прошлого века [3].

Новые возможности в этой области появились с накоплением данных регулярных спутниковых измерений, в том числе и температуры поверхности моря. Вместе с тем, такие вопросы как, например, пространственная структура и механизмы формирования межгодовых колебаний полей параметров атмосферы и гидросферы Аравийского моря до сих пор остаются недостаточно исследованными [4].

Цель данной работы – проведение качественного анализа основных тенденций крупномасштабной изменчивости поля температуры поверхности (*SST*) Аравийского моря в целом и его частей на межгодовых масштабах за весь период спутниковых наблюдений. Для этого были использованы среднемесячные данные спутниковых измерений температуры поверхностного слоя Аравийского моря (t_w , °C) из базы спутниковых данных «*PODAAC JPL AVHRR Pathfinder*» на сетке 0.5° за 1985–2007 гг. (23 года) (<http://podaac.jpl.nasa.gov/>). Для анализа был выбран фрагмент поверхности в пределах 5.0 – 31.0° с.ш., 43.0 – 77.0° в.д., схематично показанный на рис. 1.

Пропуски в измерениях по отдельным узлам спутниковых наблюдений, в основном связанные с наличием облачности, заполнялись с помощью линейной интерполяции. При этом в первую очередь использовались данные не менее чем по двум ближайшим узлам за тот же месяц, либо за предыдущий и последующий месяцы для этого же узла. Если такие данные для какого-либо узла отсутствовали, то рассчитывалось среднее для него на этот месяц значение температуры за все время наблюдений [5].

Значения за период летнего муссона осреднялись за месяцы с апреля по сентябрь, за период зимнего муссона – с октября по март. При этом годы средних зимних значений датировались по году октября, т.е., с годовым сдвигом относительно средних летних значений.

В качестве аналитической основы в данной работе был использован упрощенный вариант метода внутриспектрального анализа (ВСА) с расчетом поля градиента (Δ), описанный в [6, 7].

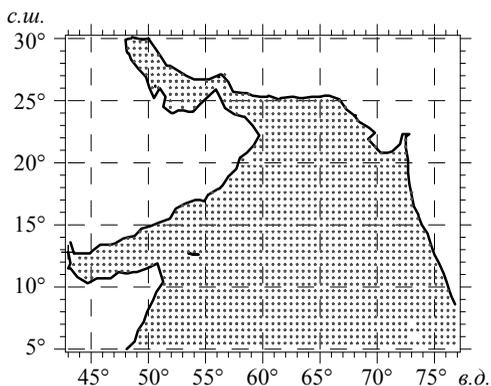


Рис. 1. Расположение узлов сетки спутниковых данных t_w за 1985–2007 гг. с дискретностью 0.5° для района Аравийского моря

Метод ВСА является аналитической реализацией ритмодинамического подхода к изучению природных процессов, предложенного в [8]. При этом величина градиента рассчитывается нестандартно, как разница между среднеарифметическими величинами двух последних и двух первых значений временных рядов

исследуемого параметра в каждом узле сетки данных после удаления из них высокочастотных (ВЧ) составляющих.

Последнее выполняется с помощью фильтра скользящего среднего (ФСС) с величиной периода не менее трети от общей длины рядов. В этом случае значение Δ рассматривается как аналог амплитуды наиболее энергетически значимой гармоники или группы гармоник в низкочастотной (НЧ) области спектра ряда. С точки зрения ритмодинамического подхода анализ градиента исследуемых параметров в данном случае должно быть достаточно, для того, чтобы в первом приближении определить доминирующие тенденции и наличие связей в межгодовой изменчивости соответствующих полей.

Известно, что диапазон межсезонных колебаний температуры поверхности Аравийского моря составляет от 22 до 35 °С [1]. В среднем температура поверхностного слоя воды составляет: зимой – от 22 до 27 °С, летом – от 23 до 28 °С с максимумом около 30 °С в мае. Для восточного побережья Африки и Аравийского полуострова летом характерны низкие значения t_w – от 17 °С до 22 °С в зависимости от интенсивности выхода на поверхность холодных вод с глубин под влиянием Сомалийского течения [1, 2].

Характерной особенностью для многих районов акватории моря является наличие двух максимумов и двух минимумов температуры воды. Первый максимум, наступает в апреле-мае и связан с сезонным усилением прогресса поверхностного слоя. В летние месяцы, с установлением юго-западного муссона, поверхностные слои воды перемешиваются, тепло распределяется по вертикали более равномерно. При этом температура подповерхностного слоя повышается, а на самой поверхности понижается. Это летний минимум температуры. Когда юго-западный муссон прекращается, поверхность океана нагревается, и в октябре-ноябре отмечается второй максимум температуры. Зимой северного полушария наступает второй минимум температуры, связанный с сезонным уменьшением прихода солнечной радиации [1].

Результаты анализа изменчивости рядов средних (за 1985-2007 гг.) межсезонных значений t_w , осредненных по вышеуказанным четвертями и по всей акватории моря в целом хорошо соответствуют этим известным представлениям (см. рис. 2, а-в) [9]. Вместе с тем, для ряда отдельных районов моря, видимо за счет особенностей протекания мезомасштабных процессов в атмосфере и океане, такой классический ход кривой t_w может существенно изменяться (см. рис. 2, г-е). Для годового хода t_w большей части акватории Оманского залива и для Персидского залива характерен только один максимум – в июне-августе и один минимум – в феврале-марте (см. рис. 2, г).

В традиционных районах апвеллинга (восточные побережья Сомали и Омана, юго-западное побережье Индостана) летний минимум температуры в среднем на 1.5-2.0 °С ниже зимнего (см. рис. 2, д). А в районе примерно на 5° юго-западнее южной оконечности Индостана второй (зимний) максимум t_w в октябре-ноябре выражен слабо (< 0.3 °С), причем в отличие от других районов моря ему предшествует еще один такой же слабый максимум в августе (см. рис. 2, е).

Если сравнить значения t_w , показанные на рис. 2, с аналогичными литературными данными по Аравийскому морю для 50-70-х гг. прошлого века [1, 2, 10], то можно заметить, что за прошедший период (~40-50 лет) произошло повышение температуры в среднем на 1.0-3.0 °С практически во всей его акватории. Причем

западную часть моря этот процесс затронул в наибольшей степени. Анализ рядов межгодовой изменчивости среднегодовых, среднезимних и среднелетних значений t_w за 1985-2007 гг. соответствует этим результатам.

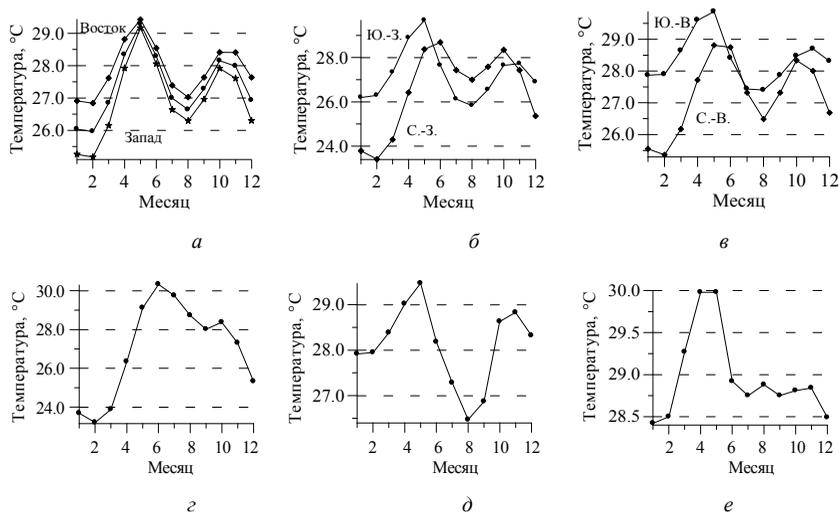


Рис. 2. Годовой ход t_w по данным 1985-2007 гг. для Аравийского моря в целом, его западной и восточной частей (а), четвертей моря – с.-з., ю.-з. (б), с.-в., ю.-в. (в) и отдельных узлов сетки спутниковых данных – 24.5° с.ш., 59.9° в.д. (г), 15.0° с.ш., 73.5° в.д. (д), 5.5° с.ш., 69.4° в.д. (е)

На рис. 3 приведены примеры межгодовой изменчивости рядов среднегодовых, среднелетних и среднезимних значений t_w для Аравийского моря и его частей. При их анализе, прежде всего, обращает на себя внимание преобладающая квазисинхронность всех рядов. Незначительные отличия в их ритмодинамике связаны преимущественно с вкладом ВЧ колебаний с периодами 2-3 года. В спектрах этих рядов в основном доминируют гармоники с периодами около 4.0-5.0 и 8.0 лет. Кроме того, за счет очевидной тенденции роста t_w в период 1985-2007 гг. существенно влияние постоянной составляющей (период гармоник 23.0 года), особенно на северо-западе моря.

Там же, на северо-западе, по сравнению с другими четвертями возрастает и влияние гармоник с периодом ~ 11.5 лет. Вместе с тем, на юго-востоке вклад гармоник с периодами 11.5 и 23.0 года в общую изменчивость исследуемых сигналов заметно уменьшается. Это совпадает с приведенными выше аналогичными результатами для спектров рядов атмосферного давления по данным контактных измерений. Очевидно, что это обстоятельство связано с описанной в [11] разницей в преобладающих на межгодовых масштабах условиях циркуляции атмосферы в этих частях моря.

Таким образом, можно считать, что в среднегодовых значениях наиболее холодной частью поверхности Аравийского моря устойчиво является его с.-з. четверть (~ 26.5 °C), а наиболее теплой – ю.-в. (~ 28.5 °C). В какой-то степени здесь

можно говорить о существовании в поле t_w локальной дипольной структуры, близкой к структуре поля температуры воздуха в приземном слое, особенно в период зимнего муссона [12].

Поскольку в данной работе основной интерес представляют межгодовые тенденции изменчивости исследуемых полей, то, в соответствии с используемой методикой анализа, из рядов, показанных на рис. 3, были выделены их НЧ компоненты последовательной фильтрацией ФСС с периодами 6 и 4 года (см. рис. 4).

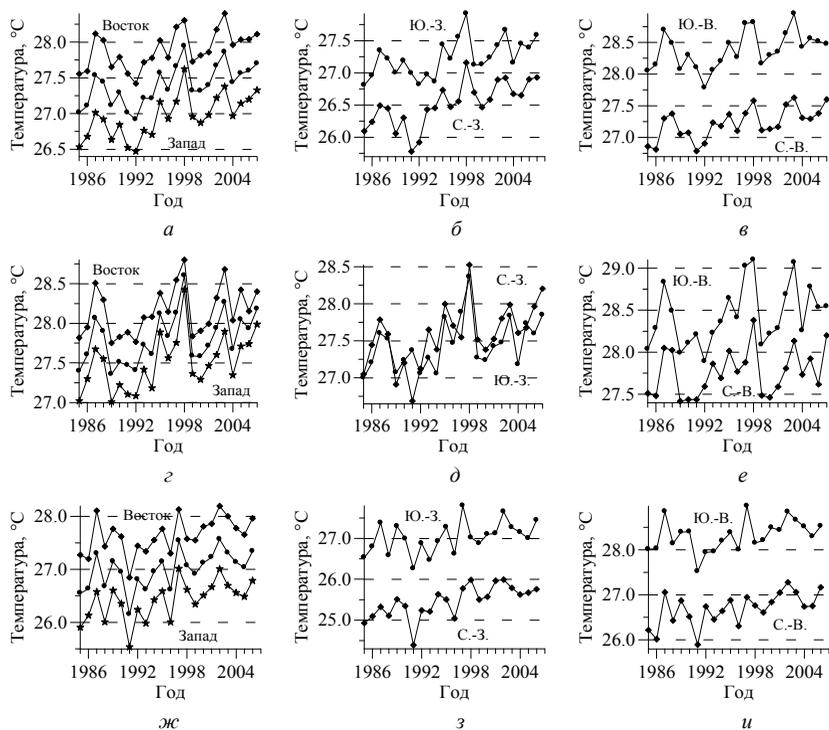


Рис. 3. Ряды средних годовых (а-в), средних летних (г-е) и средних зимних (ж-и) значений t_w по спутниковым данным 1985-2007 гг. для Аравийского моря в целом, его западной и восточной частей (а, г, ж), а также с.-з., ю.-з. (б, д, з) и с.-в., ю.-в. (в, е, и) четвертей моря

Нетрудно видеть, что общей тенденцией t_w Аравийского моря на исследуемом временном отрезке в целом является ее рост на 0.3-0.6°C по всей акватории. Так, за период 1985-2007 гг. среднегодовая величина Δt_w для северо-западного участка моря составила около 0.6 °C, для северо-восточного и юго-западного – 0.5 °C, юго-восточного – 0.4 °C. При этом средние летние температуры увеличились на северо-западе примерно на 0.8 °C, на северо-востоке на 0.5 °C, на юго-западе и юго-востоке на 0.4 °C. Средние зимние температуры выросли для северо-запада на 0.6°C, северо-востока и юго-запада на 0.5 °C, юго-востока на 0.4 °C.

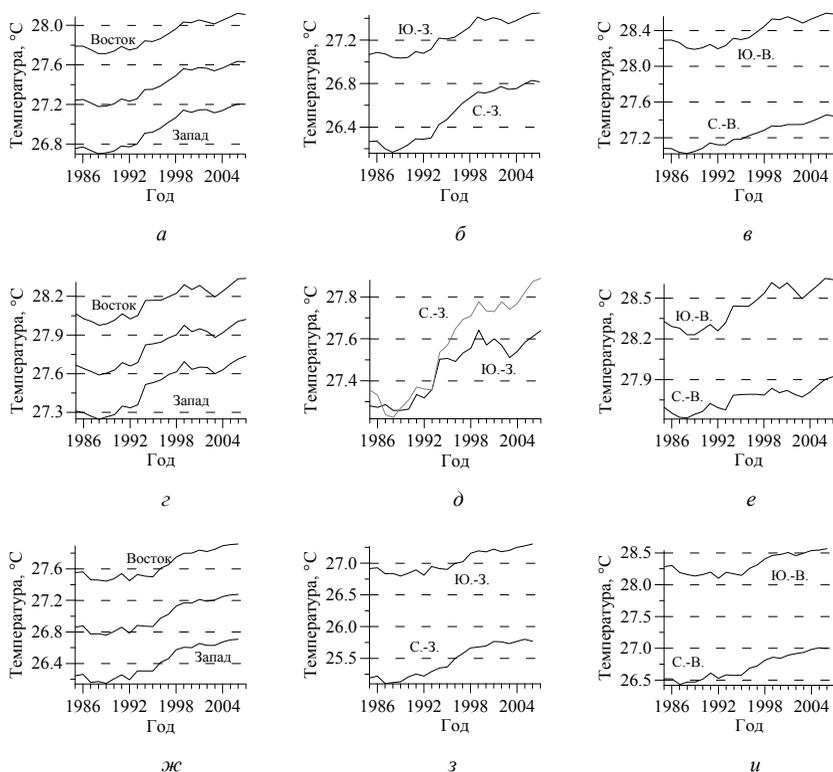


Рис. 4. Ряды НЧ составляющих средних годовых (*а-в*), средних летних (*г-е*) и средних зимних (*ж-и*) значений t_w по спутниковым данным 1985-2007 гг. для Аравийского моря в целом, его западной и восточной частей (*а, г, ж*), а также с.-з., ю.-з. (*б, д, з*) и с.-в., ю.-в. (*в, е, и*) четвертей моря

Поскольку для рядов, показанных на рис. 4, длина ФСС была меньше 8 лет, то в них частично сохранилось колебание с периодом около 12-14 лет. Причем, в большей степени присутствие этого колебания заметно в северо-западной части моря в летний период, что совпадает с описанными выше результатами спектрального анализа среднегодовых рядов t_w . Аналогичные результаты были получены в [11] и для рядов атмосферного давления (P) по данным стационарных наблюдений в этом регионе. В связи с этим, достаточно близки к особенностям рядов P для Эр-Рияда и Мултана [11] и участки летних кривых 1985-1991 и 1999-2003 гг. для запада (см. рис. 4, *г-е*), демонстрирующие сначала рост, а затем снижение t_w соответственно на ~ 0.4 и ~ 0.2 °C.

Из [11] следует, что последующий рост t_w в 2004-2007 гг., видимо, связан с влиянием северо-восточной области положительных значений ΔP , которая стала фор-

мироваться в начале 2000-х годов. Приведенный ниже анализ полей t_w и Δt_w подтверждает эти результаты. Здесь следует заметить, что полученные за разные временные отрезки результаты не противоречат друг другу, так как они являются следствием деятельности разных по масштабу групп временных колебаний с разной пространственной структурой соответствующих им полей. Собственно, для выявления и изучения таких волновых процессов и полей и был предложен ритмодинамический подход [8].

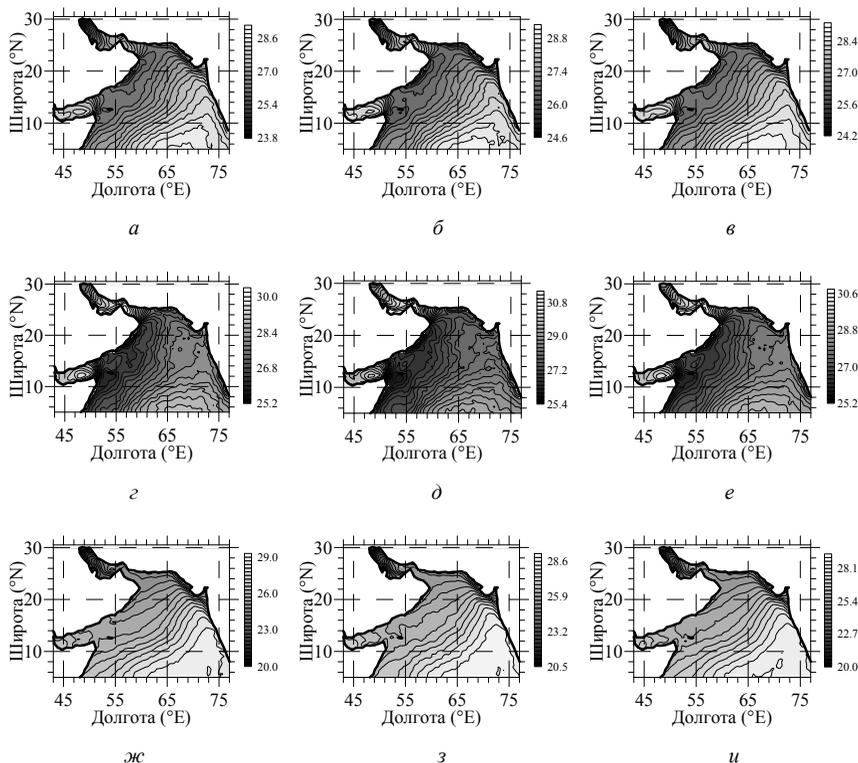


Рис. 5. Поля средних годовых (а, б, в), средних летних (г, д, е) и средних зимних (ж, з, и) значений t_w ($^{\circ}\text{C}$) по каждому узлу сетки данных для трех отрезков ряда наблюдений (1985-1997, 1998-2007 и 1985-2007 гг., слева направо).

Начать анализ пространственной изменчивости поля t_w целесообразно с описания полей среднегодовых и сезонных значений (см. рис. 5). Практически для всех этих полей за исследованный период для акватории Аравийского моря характерно крупномасштабное разделение пространственной структуры на большой участок восточнее и юго-восточнее условной линии между о. Сокотра и устьем р. Инд с температурой 26.7-29.0 $^{\circ}\text{C}$ и меньший участок западнее и северо-западнее этой линии с температурой около 23.8-26.5 $^{\circ}\text{C}$ (рис. 5, а-в). При этом наиболее

высокие значения t_w характерны для участка между 64–68° в.д. и 5–8° с.ш. к юго-западу от южной оконечности Индостана (~29.0 °C).

Наиболее низкие значения t_w наблюдаются в северной части Персидского залива (~24.0 °C) преимущественно за счет зимнего выхолаживания и у восточного побережья Омана между г. Сур и о-вами Куриа-Муриа в зоне апвеллинга (~25.4°C). Аналогичная зона апвеллинга примерно в 2-3 раза меньших размеров есть у побережья Пакистана между устьем р. Инд и г. Гвадар (~25.8°C).

Аналогичные известные зоны апвеллинга у восточного побережья Сомали и юго-западного побережья Индии [1] на полях среднегодовых значений t_w с дискретностью 0.5° за исследованный период практически не выражены. Исключением для такого пространственного разделения являются основная часть Аденского залива (~27.8°C) и наиболее узкая часть Персидского залива (~27.5°C).

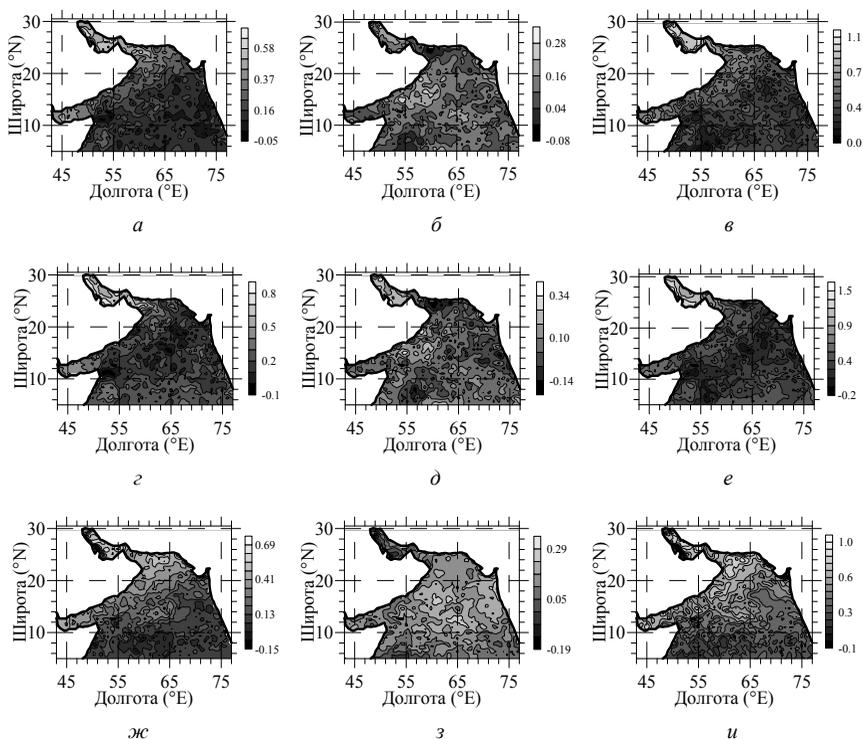


Рис. 6. Поля градиента рядов средних годовых (*а, б, в*), средних летних (*z, д, е*) и средних зимних (*ж, з, и*) значений t_w по каждому узлу сетки данных для трех отрезков периода наблюдений (1985-1997, 1998-2007 и 1985-2007 гг., слева направо).

Такая пространственная структура поля среднегодовых значений t_w Аравийского моря, существенно отличающаяся от зональной структуры аналогичного поля южной части Индийского океана, традиционно объясняется траекторией

движения холодных вод Сомалийского течения в период летнего муссона, которая в среднем близка к вышеуказанной условной линии [1, 12]. Для поля Δt_w такая устойчивая пространственная структура за исследуемый период сохраняется только на крупных масштабах (см. рис. 6).

Общей отличительной чертой этого поля за 1985-2007 гг. является преобладающий рост t_w по всей акватории Аравийского моря (см. рис. 6, *в, е, и*), однако, пространственное распределение значений Δt_w при этом выглядит пестро, в виде множества разномасштабных пятен. Их наличие, видимо, связано с мезомасштабными особенностями гидроциркуляционных процессов этого бассейна. Тем не менее, для полей среднегодовых значений Δt_w очевидная разница в их величинах для участков на юго-востоке и северо-западе от условной линии между о. Сокотра и устьем р. Инд в основном сохраняется (см. рис. 6, *а-в*).

Из рис. 6, *в* видно, что на юго-востоке значения Δt_w за 1985-2007 гг. составили 0.1-0.3 °С, а на северо-западе 0.4-1.0 °С. Область наибольшего прогрева охватывает Аденский залив, восточное побережье Аравийского полуострова, Оманский и Персидский заливы. Температура поверхности последнего увеличилась на 0.8-1.0 °С. При этом, для периода 1985-1997 гг. (13 лет) картина поля сохраняется примерно такой же (см. рис. 6, *а*), естественно, с меньшими значениями Δt_w . А для периода 1998-2007 гг. (10 лет) структура поля градиента заметно меняется (см. рис. 6, *б*). За почти равный предшествующему отрезок времени величина прогрева поверхности большей части акватории уменьшается до величины не более 0.15 °С. Кроме того, появляются два участка снижения t_w до -0.1 °С в Оманском заливе и у побережья Сомали в районе 8° с.ш., 55° в.д.

Такая разница в межгодовых тенденциях в основном сохраняется для картин и средних летних (см. рис. 6, *з-е*), и средних зимних (см. рис. 6, *ж-и*) полей Δt_w . Причем для зимних полей она даже более выражена. В целом для летнего сезона рост t_w составил от 0.1 до 1.4 °С. Характерной чертой летнего поля Δt_w за 1985-2007 гг. является наличие широкой, шириной около 600-800 км полосы в центре моря, параллельной линии между о. Сокотра и устьем р. Инд. В ее пределах значения Δt_w в основном составляют 0.1-0.2 °С и есть несколько небольших участков с $\Delta t_w \sim -0.1 - -0.2$ °С. На северо-западе от этой полосы температура увеличилась на 0.3-0.5 °С, в Персидском заливе – до 1.0-1.4 °С. На юго-востоке от этой полосы $\Delta t_w \approx 0.2-0.4$ °С.

Картина поля 1985-1997 гг. близка к показанной на рис. 6, *е* с меньшими значениями Δt_w . Для 1998-2007 гг. структура поля градиента меняется. Полоса почти нулевых значений градиента распространяется на большую часть акватории Аравийского моря, за исключением района на север, северо-восток от о. Сокотра и Персидского залива. А в Оманском заливе появляется четко выраженная область с $\Delta t_w \approx -0.15 - -0.2$ °С.

Для сезона зимнего муссона структура поля Δt_w ближе к среднегодовой (см. рис. 6, *ж-и*). В целом для этого периода рост температуры находился в пределах 0.1-0.9 °С. При этом участки с $\Delta t_w \leq 0.2$ °С были сосредоточены южнее 10° с.ш. В районах Аденского залива, восточного побережья Аравийского полуострова, Оманского и Персидского заливов значения Δt_w были в пределах 0.5-0.9 °С. Исключение составили два небольших участка по обеим сторонам побережья Катара в Персидском заливе, где температура почти не изменилась.

В период 1985-1997 гг. структура поля градиента зимних температур была ближе к диагональной структуре такого же поля среднегодовых значений (см. рис. 6, а). К северо-западу от линии о. Сокотра-устье р. Инд t_w возросла на 0.3-0.5 °С, в Персидском заливе, за исключением побережья Катара, до 0.6 °С. К юго-востоку - рост не превышал 0.1-0.15 °С. В течении 1998-2007 гг., напротив, на юго-востоке область значений $\Delta t_w > 0.1$ °С существенно расширилась, в то время, как на северо-западе величины градиента снизились до 0.1 °С. В это время в Персидском и Оманском заливах значения Δt_w были близки к нулю. Последнее, видимо, является следствием ослабления антициклонического центра атмосферного давления над Аравийским полуостровом и Персидским заливом в это время и, одновременно, небольшим ростом давления у побережья Индии [11].

Таким образом, результаты анализа межгодовой изменчивости температуры поверхности Аравийского моря соответствуют приведенным в [11] аналогичным результатам для атмосферного давления. Из них следует, что в течении 1985-2007 гг. под влиянием преобладавших над морем антициклонических условий циркуляции атмосферы происходил общий рост t_w . После 1997 г. этот процесс для отдельных районов на севере акватории под влиянием циклонической области над Пакистаном сменился ее снижением. Наиболее существенно это затронуло Оманский залив. В Персидском заливе под влиянием этой циклонической области ранее активный рост t_w в основном за счет зимнего сезона значительно замедлился.

Результаты как проведенного анализа, так и анализа других процессов и полей [5-8, 11, 13] указывают на то, что использованный в данной работе метод ВСА путем избирательной пространственно-временной фильтрации дает возможность исследовать основные климатические тенденции изменчивости состояния большинства природных систем. Данный метод позволяет в зависимости от выделяемых масштабов изменчивости более или менее детально изучать как временные, так и пространственные особенности распределения таких климатических тенденций в пределах исследуемого региона, т.е., осуществлять прогнозирование значений параметров состояния природных систем в конкретном месте.

Использование в анализе низкочастотных спектральных компонент исследуемых рядов, как наиболее энергетически значимых, позволило на качественном уровне определить характерные пространственные масштабы взаимодействия между этими полями как одно из важных свойств климатической изменчивости Аравийского моря. В первую очередь, к числу таких пространственных масштабов в данном случае относятся величины, сравнимые с 2000-3000 км (т.е., близкие к общим размерам Аравийского моря) и с 500-1000 км, как отвечающими за крупномасштабную анизотропию гидрометеорологических и гидрофизических полей региона.

Из полученных результатов следует, что за период 1985-2007 гг. величины межгодовых колебаний t_w Аравийского моря в основном не выходили за пределы среднеклиматических вариаций последних 30-40 лет [1, 12, 14]. Основной тенденцией этих изменений для моря в целом был небольшой рост температуры воды (~0.3-0.6 °С). Также можно сказать и о пространственной динамике поля t_w на межгодовых масштабах за этот период. Согласно [11] основным отличием в структуре поля атмосферного давления в это время было небольшое расширение на юг, юго-восток области низкого давления вдоль побережья Пакистана и Индии. Ло-

кальная, в первую очередь в районах Персидского и Оманского заливов, активизация этого процесса в период 1997-2002 гг. повлекла за собой (в основном, за счет летнего сезона) временное снижение температуры воды в среднем на ~ 0.1 °С. Наиболее заметно это затронуло Оманский залив и Ормузский пролив.

Таким образом, можно сделать вывод, что основные воздействия, существенно меняющие режим муссона Аравийского моря, связаны не только с большими, чем размеры моря, масштабами по пространству (порядка 5000-8000 км), но и с большими, чем исследованный период в 23 года, масштабами по времени, т.е. не менее 50-60 лет.

Литература

1. Нейман В.Г., Бурков В.А., Щербинин А.Д. Динамика вод Индийского океана. – М.: Научный мир, 1997. – 232 с.
2. Муромцев А.М. Основные черты гидрологии Индийского океана. – Л.: Гидрометеоиздат, 1959. – 440 с.
3. Deep Sea Research, 1999, Part II, vol. 46, № 8-9.
4. Pinxian Wang, Steven Clemens, Luc Beaufort, Pascale Braconnot, Gerald Ganssen, Zhimin Jian, Peter Kershaw, Michael Sarnthein Evolution and variability of the Asian monsoon system: state of the art and outstanding issues // Quaternary Science Reviews, 2005, 24. – P. 595-629.
5. Еремеев В.Н., Жуков А.Н., Лебедев Н.Е., Сизов А.А. Пространственная анизотропия межгодовой изменчивости температуры воды Черного моря (по спутниковых данным) // Исследование Земли из космоса, 2007, № 5. – С. 3-10.
6. Eremeev, V.N., Jukov, A.N., Piontkovski, S.A., Sizov, A.A. Coupling Between Interannual Fluctuations of the Sea Surface Temperature and Zooplankton Biomass in the Tropical Atlantic Ocean // International Journal of Environmental Studies, 2009, vol. 66, № 5. - P. 539-546. (<http://dx.doi.org/10.1080/00207230902731920>).
7. Eremeev V.N., Jukov A.N., Piontkovski S.A., Sizov A.A. Interannual variability of the chlorophyll a and sea surface temperature of the Black Sea // International Journal of Remote Sensing, 2011, vol. 32, № 18. doi: 10.1080/01431161.2011.583291 (<http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2011.583291>).
8. Еремеев В.Н., Жуков А.Н., Сизов А.А. Исследование особенностей ритмодинамики межгодовой изменчивости гидрометеорологических и гидрологических процессов в прибрежных зонах // Доклады РАН, 2006. – том. 409, № 2. – С. 254-257.
9. Haake B., Rixen T., Reemtsma T., Ramaswamy V. and Ittekkot V. Processes Determining Seasonality and Interannual Variability of Settling Particle Fluxes to the Deep Arabian Sea // Particle Flux in the Ocean / Edited by V. Ittekkot, P. Schäfer, S. Honjo and P. J. Depetris. SCOPE Published by John Wiley & Sons Ltd, 1996. – P. 251-259.
10. Wyrтки K. Oceanographic Atlas of the International Indian Ocean Expedition. – Washington D.C.: National Science Foundation, 1971. – 531 pp.
11. Жуков А.Н., Латушкин А.А., Пустовойтенко В.В., Сизов А.А. Межгодовые колебания поля атмосферного давления северной части Индийского океана в период 1985-2007 гг. // В кн.: Физические проблемы экологии (экологическая физика). – М.: Физический факультет МГУ, 2010, № 17. – С. 155-164.

12. Friedrich A. Schott, Julian P. McCreary Jr. The monsoon circulation of the Indian Ocean // *Progress in Oceanography*, 2001, 51. – P. 1-123.
13. Еремеев В.Н., Жуков А.Н., Сизов А.А. Поле температуры поверхности Атлантики и его ритмодинамика на межгодовых масштабах // *Доповіді НАН України*, 2010, № 8. – С. 124-130.
14. Swallow J.C. Some aspects of the physical oceanography of the Indian ocean // *Deep-Sea Research*, 1984, V. 31, № 6-8. – P. 639-650.

ИНФОРМАТИВНЫЕ ПРИЗНАКИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

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

¹*Морской гидрофизический институт НАН Украины*

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

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

Рассматриваются возможности и ограничения обнаружения нефтяных загрязнений по радиолокационным изображениям морской поверхности, полученным с космических аппаратов. Для повышения эффективности распознавания нефтяного загрязнения на фоне естественных аномалий структуры морской поверхности предложено использовать дополнительный признак, основанный на изотропном подавлении коротких поверхностных волн нефтяной пленкой.

Введение.

Нефтепродукты являются основным типом антропогенных загрязняющих веществ, поступающих в Мировой океан. Образующаяся на морской поверхности нефтяная пленка подавляет короткие поверхностные волны. Этот физический механизм лежит в основе радиолокационного определения наличия загрязнения на морской поверхности. «Выглаживание» поверхности нефтяным пятном приводит, при зондировании в надир, к повышению нормированного сечения обратного рассеяния, поэтому такие области морской поверхности проявляются на радиолокационных изображениях в виде более светлых областей [1]. При зондировании на углах падения более 20° «выглаженные» участки морской поверхности на радиолокационных изображениях проявляются в виде более темных областей. В настоящее время считается, что для картирования нефтяного загрязнения оптимальным является применение радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования, имеющих достаточно широкую полосу обзора и высокое пространственное разрешение [2].

Проблема обнаружения нефтяного загрязнения заключается в том, что на морской поверхности существуют структуры естественного происхождения, в которых короткие волны частично или полностью подавлены. Физическими механизмами, ответственными за появление подобных структур, могут быть: вариации скорости поверхностного течения, внутренние волны, штилевые зоны, апвеллинги и ряд других [2].

В последние десятилетия предпринимаются интенсивные усилия по созданию систем обнаружения и распознавания нефтяных загрязнений морской поверхности по ее радиолокационным изображениям (см., например, [3-6]). Для выделения нефтяного загрязнения на фоне естественных неоднородностей используются около 30 параметров, характеризующих пятна на радиолокационном изображении. Эти параметры (см., например, обзор [7]) можно разбить на четыре группы:

- 1) параметры, характеризующие геометрию пятна;
- 2) различие характеристик обратного рассеяния морской поверхностью в пятне и окружающей его области;
- 3) удаленность от берега, платформ, трасс судов и т.п.;
- 4) пространственная корреляция между соседними пикселями.

Одно из направлений в создании систем обнаружения – выделение новых информативных признаков для распознавания нефтяного загрязнения. В настоящей работе рассматривается возможность использовать в качестве такого признака различия радиолокационных контрастов «нефть-чистая поверхность», полученных при разных азимутальных углах зондирования [8].

Нормированное сечение обратного рассеяния.

При зондировании морской поверхности под углами от 20° до 70° градусов рассеяние радиоволн в обратном направлении носит резонансный характер. Составляющие поля морских поверхностных волн, на которых происходит рассеяние, принято называть брегговскими.

Условие резонанса, которое в общем виде является векторным, для обратного рассеяния можно записать в форме двух скалярных условий,

$$k_{br} = K 2 \sin \theta, \quad (1)$$

$$\alpha = \varphi \quad \text{или} \quad \alpha = \varphi + \pi, \quad (2)$$

где k_{br} и K – волновые числа поверхностной и электромагнитной волн; θ – угол падения; φ – азимут зондирования; α – направление распространения поверхностной волны. Нормированное сечение обратного рассеяния радиоволн в первом приближении представим в виде

$$\sigma_p(K, \theta, \varphi) = 8 K^4 \left| G_p^0(\theta) \right|^2 \Xi(\vec{k}_{br}), \quad (3)$$

где $G_p^0(\theta)$ – коэффициент, зависящий от угла падения, поляризации и диэлектрической проницаемости воды; $\Xi(\vec{k}_{br})$ – спектр возвышений морской поверхности, соответствующий волновому вектору \vec{k}_{br} брегговской составляющей.

Перейдем от спектра $\Xi(\vec{k}_{br})$ к спектру волновых чисел и направлений $\chi(k, \alpha)$,

$$\Xi(k_x, k_y) \frac{\partial(k_x, k_y)}{\partial(k, \alpha)} = \chi(k, \alpha), \quad (4)$$

где Якобиан $\frac{\partial(k_x, k_y)}{\partial(k, \alpha)} = k$.

Далее представим спектр $\chi(k, \alpha)$ в форме,

$$\chi(k, \alpha) = S(k) \Theta(k, \alpha), \quad (5)$$

где $S(k)$ – одномерный спектр волновых чисел; $\Theta(k, \alpha)$ – функция углового распределения волновой энергии, удовлетворяющая условию нормировки,

$$\int_{-\pi}^{\pi} \Theta(k, \alpha) d\alpha = 1.$$

С учетом (1) выражение (3) приводится к виду

$$\sigma_p(K, \theta, \varphi) = 4 \frac{K^3}{\sin \theta} \left| G_p^0(\theta) \right|^2 S(k_{br}) \Theta(k_{br}, \alpha). \quad (6)$$

Радиолокационный контраст, создаваемый разливом нефти.

Характеристики участков загрязненной нефтепродуктами и чистой поверхности будем соответственно обозначать индексами «*o*» и «*f*». Радиолокационный контраст между нефтяным пятном и чистой поверхностью, являющийся одним из признаков, по которому определяется наличие загрязнения, можно представить в виде

$$R_o(K, \theta, \varphi) = \frac{\sigma_p^{(o)}}{\sigma_p^{(f)}} = \frac{S_o(k_{br}) \Theta_o(k_{br}, \alpha)}{S_f(k_{br}) \Theta_f(k_{br}, \alpha)}. \quad (7)$$

Выражение (7) получено в рамках предположения, что присутствие нефтяной пленки не влияет на диэлектрическую проницаемость воды.

Плёнка, образующаяся на морской поверхности при разливе нефти или других поверхностно-активных веществ, гасит волны независимо от направления их распространения. При зондировании под азимутальными углами φ_1 и φ_2 , обратное рассеяние происходит соответственно на составляющих волнового поля, удовлетворяющих условию (1) распространяющихся в направлениях α_1 и α_2 . В этом случае

$$\Theta_o(k_{br}, \alpha_1) = \Theta_f(k_{br}, \alpha_1), \quad (8)$$

$$\Theta_o(k_{br}, \alpha_2) = \Theta_f(k_{br}, \alpha_2). \quad (9)$$

Из выражений (7)-(9) получаем, что радиолокационный контраст между участками морской поверхности, загрязненными нефтепродуктами и чистой поверхностью, не зависит от направления зондирования

$$R_o(K, \theta, \varphi) = \frac{S_o(k_{br})}{S_f(k_{br})}. \quad (10)$$

Таким образом,

$$R_o(K, \theta, \varphi_1) = R_o(K, \theta, \varphi_2) \quad (11)$$

Радиолокационный контраст, создаваемый поверхностным течением.

При распространении поверхностных волн в область с неоднородным течением происходит изменение их энергии [9]. Изменение энергии зависит от соотношения скорости поверхностного течения и фазовой скорости спектральной компоненты волнового поля, а также от угла между вектором скорости течения и направлением распространения спектральной компоненты. То есть при распространении волн в область, где происходит изменение скорости поверхностного течения, происходит изменение их функции углового распределения. Соответственно

$$\Theta_V(k_{br}, \alpha_1) \neq \Theta_f(k_{br}, \alpha_1), \quad (12)$$

$$\Theta_V(k_{br}, \alpha_2) \neq \Theta_f(k_{br}, \alpha_2). \quad (13)$$

Характеристики области морской поверхности с переменным течением обозначены индексом «V».

Аналогично (7) радиолокационный контраст, создаваемый переменным поверхностным течением, определим как

$$R_V(K, \theta, \varphi) = \sigma_p^{(V)} / \sigma_p^{(f)}. \quad (14)$$

В общем случае,

$$R_V(K, \theta, \varphi_1) \neq R_V(K, \theta, \varphi_2). \quad (15)$$

т.е. в этом случае радиолокационный контраст будет меняться с изменением азимутального угла φ .

Заключение.

Распознавание на радиолокационных изображениях морской (океанской) поверхности областей со сниженным, в сравнении с фоном, уровнем РЛ-сигнала (темных пятен), создаваемых нефтепродуктами, может осуществляться с участием оператора или в автоматическом режиме. В настоящее время существует более десятка алгоритмов, предназначенных для автоматического выделения и клас-

сификации таких областей [7]. По разным оценкам точность автоматизированной классификации составляет от 82% до 94% [6].

В настоящей работе предложен новый информативный признак для разделения аномалий тонкой структуры морской поверхности, создаваемых нефтяным загрязнением и вариациями скорости поверхностного течения. Он основан на том, что при распространении коротких поверхностных волн в область переменного по скорости течения происходит трансформация их углового распределения энергии. При попадании коротких волн в область нефтяного загрязнения они подавляются в равной мере, независимо от направления распространения.

Литература

1. Запелалов А.С., Пустовойтенко В.В., Станичный С.В. Формирование радиолокационного контраста при квазивертикальном зондировании в зоне загрязнения морской поверхности. Влияние нелинейных эффектов в поле поверхностных волн // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 4. – С. 23-31.
2. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю. и др. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физических наук. – 2003. – Том. 1, № 1. – С. 69-87.
3. Trivero P., Fiscella B., Gomez F., Pavese P. SAR detection and characterization of sea surface slicks // Int. J. Remote Sensing. – 1998. – Vol. 19, № 3. – P. 543-548.
4. Espedal H. A., Wahl T. Satellite SAR oil spill detection using wind history information // Int. J. Remote Sensing. – 1999. – Vol. 20, № 1. – P. 49-65.
5. Brekke C., Solberg A.H.S. Oil spill detection by satellite remote sensing // Rem. Sens. Environ. – 2005, № 95. – P. 1-13.
6. Kanaa T.F.N., Tonye E., Mercier G. et al. Detection of oil slick signatures in SAR images by fusion of hysteresis thresholding responses // Proc. IGARSS'03. – 2003. – Vol. 4. – P. 2750-2752.
7. Иванов А.Ю. Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследования Земли из космоса. – 2007, № 3. – С. 73-96.
8. Запелалов А.С., Пустовойтенко В.В., Станичный С.В. Способ обнаружения загрязнения водной поверхности / Патент Украины № 92845, МПК G01C 13/00, заявл. 25.05.2009, опубл. 10.12.2010. Бюл. № 23.
9. Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 320 с.