

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

Зав. кафедрой физического факультета МГУ, профессор

В.И. Трухин

Директор Центра магнитной томографии и спектроскопии МГУ,

профессор физического факультета

Ю.А. Пирогов

Зав. кафедрой физического факультета

профессор К.В. Показеев

ГЕОФИЗИКА И ЭКОЛОГИЯ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Несмотря на огромные достижения в последние десятилетия в деле проникновения человека в космос, Земля остается и, видимо, еще долго будет оставаться нашим единственным домом, единственной базой для всех мероприятий человечества. Именно Земля еще долго будет основным источником всех ресурсов, необходимых для жизнедеятельности и жизнеобеспечения, без которых невозможно само существование человечества, его культуры, его дальнейшее развитие. Именно по этой причине так резко повысилось внимание во всех странах к развитию всего комплекса наук о Земле и, едва ли не в первую очередь, геофизики. Во всех передовых странах ассигнования на развитие геофизики за последние годы существенно возросли. Очевидно, что сохранение жизнеобеспечивающей экологической обстановки на нашей планете стало проблемой первостепенного значения, и в решении этой проблемы геофизика играет одну из ведущих ролей.

Следует подчеркнуть и еще одну важную особенность нашего времени. Мы живем в эпоху, когда острее, чем когда-либо, встал вопрос об обеспечении деятельности и жизни людей природными ресурсами. Необходимые природные ресурсы делятся на возобновляемые и практически невозобновляемые, накопленные на Земле за 4,5 млрд лет ее эволюции. Сейчас многие виды ресурсов близки к исчерпанию, хотя бы в смысле их доступности. Уходят в прошлое те времена, когда многие виды ресурсов были относительно легко доступны и использовались без заметного ущерба для самой природы, для существования человечества. Большинство полезных ископаемых сосредоточено в недрах Земли, и естественным путем в первую очередь были израсходованы те из них, которые лежат вблизи земной поверхности. Сейчас мы вынуждены переходить к поискам полезных ископаемых на гораздо больших глубинах, а также на дне морей и океанов. Во всех этих случаях геофизические методы становятся ведущими.

Однако роль геофизики не ограничивается только поисками и разведкой полезных ископаемых. Фундаментальная геофизика является почти единственным источником знаний о внутреннем строении нашей планеты и, в последние годы, таких ее космических соседей, как Луна, Марс, Венера, другие планеты и само Солнце. Через изучение самых верхних частей атмосферы и различных физических полей Земли геофизика смыкается с изучением космического пространства.

Огромна роль геофизики в изучении процессов, протекающих в теле Земли, начиная с глубин земного ядра и кончая водной и газовой оболочками Земли. Здесь мы подходим к изучению проблем развития, эволюции Земли во времени, эволюции ее внутреннего строения, самой проблемы происхождения различных оболочек Земли, их взаимодействия. Нет сомнений, что Земля в прошлом имела иное строение, ее современное строение явилось результатом эволюции во времени процессов, протекавших и протекающих в теле планеты. Что эти процессы активно происходят и в наше время, что Земля — развивающееся тело, мы знаем благодаря проявлению этих процессов вблизи поверхности нашей планеты. Деятельность вулканов, землетрясений с очагами на глубине многих сотен километров, движение земной коры как в наше время, так и в глубоком геологическом прошлом — все свидетельствует об активной жизни нашей планеты, о взаимодействии ее оболочек, об изменении их состава и функций и о постоянном из-

менении экологической обстановки. Все эти изменения в прошлом происходили естественным путем, даже деятельность человека до последнего времени не влияла существенно на ход природных процессов: слишком малы были энергетические возможности человека по сравнению с энергетикой основных природных процессов, влияющих на развитие экологической обстановки на Земле в целом и в крупных ее регионах. Но с начала XX в. и особенно в последние десятилетия положение стало меняться.

Чудовищное засорение среды обитания, безоглядное истребление всех природных ресурсов, перестройки крупных регионов земной поверхности в процессе хозяйственной деятельности с единственной целью получить максимальную сиюминутную выгоду, могут привести и уже приводят к последствиям, грозящим катастрофами. Даже неизбежная хозяйственная деятельность, как и широкое использование ядерной энергии, без должного учета геофизического и других факторов, грозит тяжелыми последствиями, примеры которых мы уже имели возможности наблюдать. Нечего и говорить о часто предлагаемых новых гигантских проектах, сулящих огромные выгоды, но влекущих за собой негативные изменения, быть может, замедленного действия, но тем более опасные.

Наконец, необходимо отметить огромную роль, которую играет геофизика в решении самых фундаментальных проблем естествознания — проблемы зарождения и развития нашей планеты и родственных ей планет, проблемы возникновения, развития и преобразования верхних оболочек Земли: каменной оболочки (кора), водной и газовой оболочек. Эти оболочки, их свойства, строение, состав, их взаимодействие целиком определяют всю область биосферы, область, где появилась и существует жизнь на Земле. Сейчас уже можно говорить, что органическая жизнь появилась на нашей планете практически одновременно с образованием земной коры, т. е. 3-3,5 млрд лет назад, и вряд ли можно сомневаться, что на ход эволюции биосферы существенное влияние оказывает характер эволюции всех трех оболочек Земли, изменения их состава, строения и взаимодействия.

Нет сомнения, что все эти явления определялись жизнью, развитием всей массы планеты, процессами на всех ее глубинах. Вспомним, что такое важнейшее поле, как магнитное поле планеты, в значительной степени определяется свойствами земного ядра и процессами в нем.

Таким образом, мы неизбежно приходим к выводу, что недра планеты определяют ход и направление развития ее внешних оболочек. Без изучения глубоких частей земных недр нельзя вскрыть причины основных геотектонических и магматических процессов; процессов, определяющих лик нашей планеты и причины различий между ликами Земли и других планет земной группы. Здесь мы находимся еще в самом начале пути. Достаточно напомнить, что мы еще почти ничего не знаем о природе и причинах возникновения и исчезновения такого широко известного явления, как континентальные оледенения Земли, которые неоднократно возникали в течение геологической истории. Самообразование и размещение в земной коре большинства полезных ископаемых определяется теми же глубинными процессами, без знания которых будет невозможно планировать поиски необходимых ресурсов. То же относится и к проблемам сейсмической опасности и прогноза землетрясений. Дальнейшее развитие Земли и ее оболочек будет определять условия жизни на нашей планете. Однако влияние человека на природу становится столь существенным, что необходимо не только учитывать, но и огра-

ничивать это влияние с целью сохранения нормальной экологической обстановки на Земле.

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОНЯТИЯ ЭКОЛОГИИ ЧТО ТАКОЕ ЭКОЛОГИЯ

Существуют различные определения термина «экология». Согласно классическому определению, экология как самостоятельная наука относится к биологии. Термин «экология» был предложен немецким биологом-материалистом Э. Геккелем. Он считал экологию наукой об отношении организмов к окружающей среде. Перевод с греческого дает: *oikos* — дом, *logos* — учение. Таким образом, экология — это наука о среде обитания. Экология изучает не отношение отдельных организмов к внешней среде, а изучает сообщества растений, животных в их взаимодействии с внешней средой.

Наряду с таким «биологическим» определением экологии, в современном обществе существует представление об экологии как об уровне техногенного загрязнения окружающей среды, как о науке, занимающейся изучением антропогенного воздействия на окружающую среду и разработкой методов уменьшения такого воздействия. Такие представления об экологии не являются научными, но являются наиболее широко распространенными в обществе и среди ученых, занимающихся прикладными исследованиями. Новое понятие экологии возникло на основе теории систем, термодинамики открытых систем и является наиболее физическим. Такое определение восходит к работам А. А. Богданова, В. И. Вернадского. Богданов в начале XX в. высказал мысль о том, что законы организации должны действовать не только в живой, но и в неживой природе. Наличие структур, организованность — это важнейшие черты природы. Вернадский, развивая свое учение о биосфере и ноосфере, использовал понятие организованности для обозначения важнейшего свойства материальных и энергетических частей биосферы.

На основе подобных представлений экологию можно определить как науку об организации и эволюции биосферных систем разных уровней сложности (в том числе всей биосферы), изучающую связи и превращения в таких системах. Проблемы экологии заключаются в установлении причин и условий возникновения и развития биосферных систем различного уровня сложности, изучение устойчивости этих систем.

В связи с развитием термодинамики открытых систем, изучением процессов самоорганизации в неравновесных системах стали понятными физические причины самоорганизации в живой и неживой природе. Элементы или системы живой и неживой природы являются открытыми термодинамическими системами, далекими от состояния равновесия, их пронизывают потоки энергии и вещества, и поэтому в них и происходят процессы структуризации, самоорганизации. Таким образом, самоорганизация систем в природе базируется на фундаментальных физических принципах. И. Р. Пригожин назвал упорядоченные образования, которые возникают в ходе неравновесных процессов, диссипативными структурами. Диссипативные структуры возникают в результате развития собственных внутренних процессов системы. При этом происходит обмен системы энергией и веществом с окружающей средой, что обеспечивает состояние динамического равновесия (баланса потоков), несмотря на внутренние потери в системе. В этом их отличие от

упорядоченных структур, возникновение которых обусловлено внешними воздействиями. Системы океанических течений, циркуляция в атмосфере являются яркими и хорошо известными примерами диссипативных структур, существующих на планете. Земля является открытой системой. Основной поток энергии поступает от Солнца, в процессе фотосинтеза и последующих преобразований эта энергия трансформируется в другие формы. Приходящее тепло уравнивается тепловым излучением Земли. Существование жизни на Земле обусловлено тем, что поглощаемая Землей энергия имеет более высокую частоту, чем энергия ее теплового излучения.

Мы остановимся на приведенном выше определении экологии, которое является, с одной стороны, наиболее общим, а с другой стороны — наиболее «физическим». При этом экология понимается как наука, изучающая процессы самоорганизации и эволюции систем в живой и неживой природе. При таком определении хорошо видна особая роль физики в изучении важнейших проблем экологии. Круг этих вопросов может быть выделен в особую отрасль физики — экологическую физику. Геофизика (физика Земли), изучающая, в частности, физические процессы в литосфере, гидросфере, атмосфере, по сути, исследует физические процессы в биосфере. Физика, накопившая богатейший опыт исследования закономерностей физических процессов, протекающих в оболочках Земли, на стыке которых и формируются жизненно важные экосистемы, подверженные влиянию геозволюционного и катастрофически возрастающего антропогенного факторов, может взять на себя решение ряда проблем, связанных с оздоровлением экологического климата. Широкий спектр физических методов изучения вещества должен найти применение в создании эффективных средств мониторинга экосистем различного уровня. Опыт разработки физико-математических моделей природных процессов также может быть полезным в исследовании влияния антропогенных воздействий на функционирование экосистем. Все перечисленные направления могут быть отнесены к сфере интересов новой развивающейся области науки, находящейся на стыке экологии и физики, — экологической физики. Содержание этой области еще четко не определено и находится в стадии становления, о чем свидетельствуют материалы четырех Всероссийских конференций «Физические проблемы экологии», проведенных в 1997, 1999, 2001 и 2004 гг. в МГУ. Экология имеет сложную структуру. Например, Н. Ф. Реймерс насчитывал около 150 экологических наук. Выделим только основные блоки его системы, в которые входит много отдельных научных направлений:

- экология систематических групп;
- экология иерархии живого;
- факторальная экология;
- экология сред обитания;
- хроноэкология;
- экспериментальная экология;
- экология человека;
- прикладная экология;
- экология поселений;
- экология культур.

По широте охвата экология смыкается с науками, изучающими биосферу Земли. Биосфера — сложная термодинамически открытая система, включающая в себя верхние слои земной коры, гидросферу, атмосферу вместе с населяющими их живыми организмами. Согласно В. И. Вернадскому, в формировании биосферы играла и играет важнейшую роль живая природа. Почва, многие осадочные породы, атмосфера являются продуктом жизнедеятельности живой природы. Человек существенно изменил характер взаимоотношений живой и неживой природы.

В настоящее время объем горных выработок по масштабу соизмерим с объемом горных пород, перемещаемых при землетрясениях. При добыче только черных и цветных металлов ежегодно в мире в отходах откладывается около 3 млрд м³ «хвостов» (профессиональный термин, обозначающий отходы в горнодобывающей промышленности). Ежегодный объем нефтепродуктов, поступающих в Мировой океан, уже превышает объем нефти, поступающей из недр в океан естественным путем. Техногенные потоки химических элементов в биосфере превышают естественные потоки этих же элементов. Например, только за счет сжигания угля в окружающую среду поступает ртути в 8700, мышьяка в 12, урана в 60, кадмия в 40, берия и циркония в 10, олова и ванадия в 4 раза больше, чем в результате естественного биогеохимического круговорота. В ряде развитых стран зарегулировано до 60-70% речного стока. Гигантской величины достиг выброс парниковых газов в атмосферу, приводящий, согласно некоторым оценкам, к глобальному потеплению. В биосферу поступает все больше химических соединений, не имеющих естественных процессов утилизации, поскольку эти соединения не образуются в природе естественным путем. Ясно, что этот перечень, дающий некоторое представление о масштабах антропогенного воздействия на биосферу, может быть продолжен.

Общим в процессах самоорганизации является совместное, или когерентное, движение большого числа элементов системы. Для таких процессов самоорганизации используется термин «синергетика», происходящий от греческого *Сυνεργεῖα*, что значит совместное или кооперативное действие.

Природа процессов самоорганизации заключается в том, что термодинамическая система, находящаяся вдали от равновесного состояния в нелинейной области теряет устойчивость и под действием малых флуктуации переходит в новое состояние, при котором в системе реализуется кооперативное движение макроскопических частиц системы.

Вывод нелинейной термодинамики о возможности образования структур, т. е. о возможности саморазвития системы без внешних организующих факторов является принципиально важным, так как приводит к возможности образования жизни естественным путем, без вмешательства потусторонних сил.

Основным источником энергии, поступающей на Землю, является Солнце. Солнечное излучение формируется в результате интенсивного взаимодействия с веществом в верхних слоях Солнца и находится с ним в равновесии. Электромагнитное излучение Солнца можно характеризовать двумя температурами — энергетической, которая определяется законом Стефана-Больцмана, и спектральной, определяемой из закона Вина. Для равновесного излучения эти температуры равны. Показателем неравновесности излучения может служить разность энергетической и спектральной температур. По мере удаления от поверхности Солнца энергетическая температура падает, а спектральная температура остается без из-

менения. Таким образом, неравновесность излучения по мере удаления от Солнца возрастает. Поэтому с увеличением расстояния от Солнца создаются более благоприятные условия для процессов самоорганизации, которые протекают в неравновесных условиях. С другой стороны, сложность образуемых систем зависит от температуры. С увеличением расстояния от Солнца температура падает, поэтому существует некоторое оптимальное расстояние, на котором возможно образование систем максимальной сложности. Уровень самоорганизации системы определяется степенью отклонения от равновесного состояния и уровнем сложности. В Солнечной системе наиболее оптимальное сочетание названных параметров наблюдается на расстояниях, соответствующих орбите Земли. Таким образом, в Солнечной системе наибольший уровень самоорганизации может быть достигнут на Земле.

Земля находится в состоянии энергетического равновесия с приходящим солнечным излучением. Средняя температура Земли не изменяется уже несколько миллионов лет. Спектральная излучательная способность солнечного излучения близка к температуре абсолютно черного тела при 6000 К и существенно отличается от аналогичной характеристики земного излучения. Это обусловлено тем, что средняя температура Земли гораздо ниже — около 300 К. При равенстве мощности падающего на Землю и испускаемого ею излучения и таком различии спектральных характеристик Земля излучает примерно в 20 раз больше фотонов, чем поглощает. Плотность энтропии излучения пропорциональна плотности фотонов, значит, Земля излучает энтропии в 20 раз больше, чем получает. То есть Земля является мощным генератором энтропии. Этот рост скорости производства энтропии обеспечивается диссипативными структурами, существующими на нашей планете, в биосфере. Одним из основных признаков самоорганизующейся системы является когерентное поведение ее элементов. Примером когерентного поведения являются крупномасштабные течения и вихревые образования в атмосфере и океане. Для живых существ также характерно когерентное поведение, которое в этом случае обеспечивается генетическим кодом или стереотипами поведения.

Важнейшей проблемой для человечества является определение условий устойчивости биосферы. Прежде чем рассматривать этот вопрос применительно к биосфере, напомним, как он решается в термодинамике. В изолированной системе ее энтропия при неравновесных процессах будет возрастать. После прекращения этих процессов наступает устойчивое равновесие, при котором энтропия системы будет максимальной и равна S_0 . Общим условием устойчивого равновесия изолированной системы является максимальность энтропии. В неравновесном состоянии система имеет энтропию равную S . Причем, $\Delta S = S - S_0 < 0$. Так как S_0 — максимальное значение энтропии, то первая вариация энтропии $\delta S = 0$, а вторая $\delta^2 S < 0$. Эти условия определяют необходимое и достаточное условие равновесия изолированной системы.

Принцип Ле-Шателье-Брауна определяет общие условия устойчивого равновесия термодинамических систем. Согласно этому принципу внешнее воздействие, выводящее систему из состояния равновесия, вызывает в этой системе такие процессы, которые ослабляют эти воздействия. Принцип Ле-Шателье-Брауна является термодинамическим аналогом хорошо знакомого закона электромагнитной индукции. Он позволяет предсказать направление, в котором под влиянием внешнего воздействия изменятся термодинамические процессы, протекающие в системе. Принципом Ле-Шателье-Брауна обуславливается устойчивость

равновесного состояния. Если бы всякий первичный процесс усиливался еще больше, благодаря вызванному им вторичному процессу, то это вывело бы систему из равновесия. Для биосферы принцип Ле-Шателье-Брауна выражается в том, что скорость поглощения углерода биотой пропорциональна приросту концентрации углерода по отношению к невозмущенному состоянию. На основе анализа выбросов ископаемого углерода и накопления его в атмосфере показано, что в биосфере принцип Ле-Шателье—Брауна выполнялся до начала XX в. С начала XX в. биота суши перестала поглощать избыток углерода в атмосфере. Однако современное состояние биосферы обратимо при уменьшении антропогенного воздействия биосфера может еще вернуться в устойчивое состояние.

БИОСФЕРА И НООСФЕРА ЗЕМЛИ

Анализ изложенных выше основных данных о Земле, ее внутреннем строении и эволюции и их сопоставление с тем, что известно об окружающем нас Космосе, показывают, что Земля является уникальной, единственной пригодной для жизни планетой не только в Солнечной системе, но и в окрестностях Солнца, которые простираются на десятки и сотни световых лет. Лик Земли, ее континенты и океаны, горы, впадины и равнины сформировались в результате сложных процессов движения литосферных плит и конвекции в верхней и нижней мантии. И даже конвекция в ядре Земли оказывает влияние на мощные извержения раскаленных магм в различных точках земной поверхности. Эти процессы осуществляются в основном за счет тепловой энергии Земли, которая выделялась при гравитационном сжатии и распаде радиоактивных веществ. И в настоящее время Земля является активно эволюционирующей планетой. На определенном этапе развития Земли произошло образование океана и атмосферы. Вода и газы содержались в твердых веществах, которые образовывали тело Земли на ранних этапах ее эволюции. В результате нагрева Земли пары воды и газы поднимались к поверхности и выходили на нее в процессе извержений магм, вулканической деятельности, а также в виде горячих источников и газовых фонтанов. Все это привело к образованию первичных океана и атмосферы.

Эволюция нашей планеты происходила таким образом, что после образования земной коры создались условия для возникновения и развития органической и в конце концов разумной жизни. Жизнь живых существ связана с определенной геологической оболочкой нашей планеты — биосферой. В. И. Вернадский впервые высказал следующее соображение: под влиянием научной мысли и человеческого труда биосфера переходит в новое состояние — «ноосферу» — сферу человеческого разума.

В связи с увеличивающейся в последние десятилетия опасностью негативного антропогенного воздействия на биосферу, которое может привести даже к ее уничтожению, рассмотрим несколько подробнее фундаментальные свойства биосферы и ноосферы в свете трудов академика В. И. Вернадского. В начале XX столетия людей на Земле было в три раза меньше, чем в наше время, а ресурсов природы было намного больше, чем сейчас, и казалось, что они беспредельны, и нужно было думать только о том, как их лучше добывать и использовать. Об их охране или рациональном использовании не было и речи.

Однако, как написано в прекрасной статье о ноосфере В. И. Вернадского выдающимися учеными А. Л. Яншиным и Ф. Т. Яншиной, уже в начале XIX в.

были гениальные ученые, которые, думая о перспективах взаимоотношений человечества и природы, приходили к неутешительным выводам. Например, великий французский натуралист Жан Батист Ламарк в 1803 г. (!) в трактате «Философия зоологии» писал: «Можно, пожалуй, сказать, что назначение человека как бы заключается в том, чтобы уничтожить свой род, предварительно сделав земной шар не пригодным для обитания».

Многие ученые разных стран призывали бережно относиться к природе. В России первым обратил на это внимание основатель современного почвоведения В. В. Докучаев. В своей книге «Наши степи прежде и теперь» он показал, что антропогенное воздействие привело к усилению засух, снижению плодородия почвенного слоя и другим негативным последствиям.

Выдающийся вклад в изучение влияния человеческой деятельности на окружающую природную среду внес наш гениальный ученый Владимир Иванович Вернадский. В 1927 г. В. И. Вернадский приходит к потрясающему выводу о том, что деятельность человека становится самым мощным геологическим и геохимическим фактором, более мощным, чем все природные процессы вместе взятые.

Для совокупности всех организмов (включая микроскопические), обитающих на Земле, В. И. Вернадский ввел термин «живое вещество», состав которого обусловлен всеми химическими, физическими и энергетическими процессами, которые происходят в той оболочке земного шара, в которой существует «живое вещество», т. е. в биосфере. Термин «биосфера» для этой оболочки Земли предложил в 1873 г. австрийский геолог Эдуард Зюсс. В. И. Вернадский нашел этот термин удачным, принял его и в многочисленных публикациях разработал целое учение о биосфере Земли. Он определил размеры биосферы, включив в нее гидросферу, нижнюю часть атмосферы до высоты 30 км, на которой еще встречаются поднятые ветром насекомые, и верхнюю часть литосферы до глубины 2—3 км, до которой проникают поверхностные воды с бактериями. Он определил общую массу живого вещества биосферы, вычислил количество космической энергии, которое поглощается биосферой в результате улавливания солнечных лучей хлорофиллом зеленых растений, определил, какая часть этой энергии переходит в энергию движения, размножения и другие функции самого живого вещества, а какая захороняется вместе с органическим веществом, проникая в глубь земной коры, и скапливается в конечном счете в виде месторождений горючих ископаемых. В. И. Вернадский определил скорость распространения жизни в биосфере и установил, что она обратно пропорциональна величине организмов, разработал математический метод определения давления различных видов живого вещества на окружающую среду, установил циклы прохождения через живое вещество биосферы углерода, азота и других химических элементов.

Деятельность человечества, приводящую к изменению природных условий, В. И. Вернадский вначале рассматривал как процесс, чуждый биосфере. Однако с середины 1930-х гг. по мере накопления научных данных о свойствах биосферы и о характере человеческой деятельности он стал рассматривать последнюю как закономерный этап эволюционного развития биосферы. В. И. Вернадский считал, что обязательно должно наступить время, когда человечество станет более разумно относиться к окружающей его природной среде и эволюция биосферы будет происходить как по природным законам, так и под сильным влиянием просвещенного человеческого разума. Для геологической оболочки Земли, включаю-

щей биосферу и преобразующейся под влиянием разумной деятельности человека, В. И. Вернадский ввел термин «ноосфера». Можно ли считать, что в конце XX в. уже сформировалась ноосфера или она еще находится в процессе формирования? Если обратиться к трудам самого В. И. Вернадского, то в них, согласно Ф. Т. Яншиной, сформулированы следующие условия, выполнение которых необходимо для становления ноосферы.

1. Заселение человеком всей планеты.
2. Преобразование средств связи и обмена между разными странами.
3. Усиление связей, в том числе политических, между всеми государствами Земли.
4. Преобладание геологической роли человеческой деятельности над природными геологическими процессами, протекающими в ноосфере.
5. Расширение границ биосферы и выход в Космос.
6. Открытие новых источников энергии.
7. Равенство людей всех рас и религий.
8. Увеличение роли народных масс в решении вопросов внутренней и внешней политики.
9. Создание в общественном и государственном строе условий, благоприятных для свободы научной мысли и научного искания.
10. Подъем условий жизни населения. Недопущение нищеты, недоедания и голода. Общедоступность здравоохранения.
11. Разумное преобразование первичной природы Земли с целью сделать ее способной удовлетворить все материальные, эстетические и духовные потребности численно возрастающего человечества.
12. Исключение войн из жизни общества.

Анализ этих условий, сформулированных В. И. Вернадским более 50 лет назад, показывает, что многие из них либо выполнены, либо находятся в стадии выполнения. Наиболее далеки от реализации, к сожалению, условия 7, 8 и 12. В последние десятилетия большое развитие получила деятельность, направленная на защиту и сохранение природы, на формирование оптимального отношения человека к природе, при котором сохранялись бы все виды животного и растительного мира и удовлетворялись потребности человечества.

К этому направлению деятельности относится и широко развернувшееся в мире экологическое движение, включающее в себя научные исследования экологических проблем с позиций разных областей знаний.

СТРУКТУРА БИОСФЕРЫ

Биосферу как место обитания организмов вместе с самими организмами можно разделить на три подсферы: аэриобиосферу, гидробиосферу, геобиосферу. Аэриобиосфера населена аэриобионтами. Факторами, определяющими возможность существования в ней живых объектов, являются наличие капель воды, аэрозоль, положительные температуры. Аэриобиосфера подразделяется на тропобиосферу, альтобиосферу, паробиосферу.

Гидробиосфера включает в себя всю воду планеты за исключением подземных вод. Обитатели гидробиосферы — гидробионты. Гидробиосфера включает в себя континентальные воды (аквабиосфера), моря (маринобиосфера). Маринобиосфера, в свою очередь, подразделяется на фотосферу, дистосферу (в которую

поступает менее 1 % солнечной энергии), афотосферу (нет света). Маринобиосфера подразделяется на части в зависимости от характера протекания в ней физического процесса — распределения световой энергии по глубине. Геобиосфера подразделяется на следующие подсферы: террабиосферу, гипотеррабиосферу, теллуриобиосферу, ги-побиосферу, метабиосферу. Подробное описание этих подсфер можно найти в учебниках по экологии.

Биосфера имеет сложную структуру, в ней функционируют достаточно обособленные системы, так называемые экосистемы или биогеоценозы, включающие в себя сообщества живых организмов и их среду обитания. В биосфере, именно благодаря деятельности экосистем, происходит поглощение солнечной энергии, ее трансформация, с помощью экосистем преобразуется вещество Земли.

Биогеоценоз (экосистема) — является важнейшим элементом биосферы. Понятие биогеоценоза возникло в 30-е гг. XX в. Английский геоботаник А. Тэнсли определил биогеоценоз как целостное образование в биосфере, в котором организмы и неорганические факторы выступают компонентами в относительно устойчивом состоянии. Важнейшими свойствами биосферы являются потоки энергии и вещества. Интенсивность обмена веществ и энергии внутри и вне биогеоценоза позволяет установить их границы, отделить один биогеоценоз от другого.

Учитывая важность понятия биогеоценоза, приведем еще одно определение, принадлежащее нашему соотечественнику В. И. Сукачеву. «Биогеоценоз — участок земной поверхности, где на известном протяжении биоценоз и отвечающие ему участки атмосферы, литосферы, гидросферы, педосферы (почвы) остаются однородными, тесно связанными между собой и поэтому образуют в совокупности единый взаимообусловленный комплекс. Биоценоз включает в себя фитоценоз, зооценоз, микробиоценоз. Таким образом, биогеоценоз представляет собой единое целое биоценоза и его среды обитания — биотопа, причем биоценоз играет важную роль в формировании, создании среды своего обитания.

Все биогеоценозы имеют одинаковую структуру. В основе каждого биогеоценоза лежат автотрофные организмы или продуценты — это растения, которые в процессе фотосинтеза создают органические соединения. (Необходимо отметить существование биогеоценозов, в основе которых лежит хемосинтез. Такие системы, в частности, распространены на океанских глубинах и характеризуются очень высокой биопродуктивностью.) Далее в экосистеме энергия по пищевой (трофической) цепи передается консументам (гетеротрофные организмы) — это растительноядные животные. На третьем трофическом уровне находятся уже плотоядные животные. Отмершие организмы, растения разлагаются сапротрофами, которые также называются редуцентами, на минеральные вещества, в дальнейшем используемые для питания растений. Эти минеральные вещества называются субстратами цикла, наряду с которыми существуют внешние субстраты, поступающие из внешней среды в экосистему. Сапротрофы подразделяются на сапрофиты (растения) и сапрофаги (живые организмы).

Энергия, вещество в пределах экосистемы передается с одного трофического уровня на другой. С каждого трофического уровня на следующий передается только небольшая часть энергии или вещества. Структура уровней энергии и вещества образует так называемые пирамиды Эльтона. Имеются различные категории экологических пирамид: пирамида чисел — определяет число особей на каждом уровне пищевой цепи; пирамида биомассы — определяет количество

органического вещества на каждом уровне, пирамида энергий — устанавливает количество используемой энергии на каждом уровне. Высота пирамиды определяется длиной пищевой цепи. Чем длиннее пищевая цепь, тем меньшее значение по биомассе, числу особей или потребляемой энергии имеют плотоядные на вершине пирамиды. В учебниках по экологии приведено множество примеров, иллюстрирующих свойства экологических пирамид.

Под экологическим фактором понимается воздействие определенного рода на биоценоз экосистемы или его элементы. Реакция живого организма или биоценоза экосистемы на действие фактора называется адаптацией или приспособлением. К экологическим факторам относятся:

- питательные элементы;
- почва и ее состав;
- температура;
- электромагнитное излучение (свет);
- вода;
- скорость течения в воде и ветра в атмосфере;
- влажность.

Наряду с этими, в каждом конкретном случае могут быть названы и другие факторы, учитывающие специфику экосистемы. Необходимо указать, что значительное число экологических факторов имеет физическую природу.

Многие особенности воздействия физических факторов на элементы экосистемы не исследованы. Физические процессы в биосфере, действие которых на экосистемы описывается в виде экологических факторов, также требуют дальнейших исследований. Экологические факторы физической природы также могут быть отнесены к сфере интересов физической экологии.

Совокупность факторов, обеспечивающих устойчивое существование того или иного вида животных или растений, называется экологической нишей. Другими словами экологическая ниша — это совокупность условий жизни внутри экосистемы, предъявляемых к ней тем или иным видом. Экологические факторы подразделяются на абиотические, связанные с неживой природой, например свет, и биотические, определяемые взаимодействием различных живых организмов друг на друга. По характеру действия экологические факторы подразделяются на факторы избирательного действия, общего действия, периодические и непериодические. Значительная часть абиотических факторов имеет геофизическую природу (температура, влажность, скорость ветра и т. д.).

Наряду с изложенной выше традиционной классификацией экологических факторов, существуют и другие способы их классификации. Исходя из способа влияния экологических факторов на живые организмы, все экологические факторы могут быть разделены на витальные, или энергетические, и сигнальные. Экологические факторы первой группы непосредственно оказывают влияние на жизнедеятельность организмов. Экологические факторы второй группы несут информацию об изменении энергетических параметров. Некоторые факторы обладают как энергетическим, так и сигнальным действием, например свет. К первой группе

экологических факторов может быть отнесена температура, ко второй – продолжительность светового дня.

Существует классификация экологических факторов, в основу которой положена оценка реакции организма на воздействие этих факторов. В этой классификации экологические факторы подразделяются на следующие группы: первичные периодические; вторичные периодические; непериодические. К первичным периодическим факторам относятся температура, освещенность, уровень воды в приливной зоне моря. Первичные периодические факторы определяют площади ареала видов. Изменение вторичных факторов обусловлено действием первичных факторов. Например, влажность, растительность относятся ко второй группе факторов. Вторичные периодические факторы оказывают влияние на численность видов в пределах их ареалов. Действие непериодических факторов оказывает влияние на численность особей на данной территории.

Действие экологического фактора сказывается в той или иной форме на условиях жизнедеятельности организмов. При изменении интенсивности экологического фактора в определенных пределах создаются оптимальные условия существования того или иного вида. Наряду с этим интервалом оптимальных условий существует интервал значений экологического фактора, в котором вид может существовать. При выходе значений экологического фактора за эти пределы, условия существования нарушаются, численность вида уменьшается. Экологическая толерантность охватывает диапазон значений экологического фактора от нижнего предела существования вида до верхнего предела. Закон толерантности Шелфорда устанавливает лимитирующую роль максимального и минимального значений экологического фактора. В качестве примера описанных свойств, можно напомнить о реакции обитателей морских или пресноводных водоемов на изменение солености.

Любой фактор, находящийся в недостатке, называется лимитирующим фактором. В 1840 г. Ю. Либих сформулировал принцип, названный позднее законом минимума Ли-биха, который звучит так. Биологический потенциал (продуктивность организма) лимитируется тем фактором среды, который находится в минимуме, хотя все остальные условия благоприятны. Ю. Либих сформулировал свой закон лишь для химических элементов (питательных веществ). Ясно, что для развития живых организмов важны и другие экологические факторы. Закон лимитирующих факторов рассматривает влияние всех факторов на биоценоз экосистемы, согласно ему, любой экологический фактор, находящийся в минимуме, определяет состояние биоценоза.

В процессе развития экосистемы происходит последовательная смена природных сообществ экосистемы, изменение среды обитания или биотопа. Этот процесс называется экологической сукцессией. Различают первичную и вторичную сукцессию. Первичная сукцессия начинается на участке, который перед заселением не был занят каким-либо сообществом. Вторичная сукцессия развивается на площади, с которой было предварительно удалено ранее существовавшее сообщество. Примером первичной сукцессии может служить развитие экосистемы на острове, возникшем в результате подводного извержения вулкана. Примером вторичной сукцессии может служить развитие экосистемы на месте вырубки леса или заброшенном поле. Вторичная сукцессия протекает обычно быстрее, так как в этом случае территория более благоприятна для развития сообщества, на ней име-

ются уже некоторые организмы. Наглядным примером сукцессии в водной среде является развитие искусственного водоема.

Кульминацией развития экосистемы является формирование зрелой или климаксовой экосистемы, для которой характерна максимальная биомасса. Зрелая экосистема обладает максимальной устойчивостью, способностью стабилизировать некоторые физические факторы окружающей среды, противостоять внешним воздействиям и сохранять состояние равновесия.

Наряду с естественными экосистемами, существуют искусственные, которые характеризуются значительно меньшим видовым разнообразием и обычно используются на ранних стадиях развития.

ГЛОБАЛЬНЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КРИЗИС

В конце второго тысячелетия человечество осознало, что его дальнейшему существованию угрожает глобальный экологический кризис, возникший, прежде всего, в результате антропогенных воздействий на окружающую среду. Ученые расходятся в оценках сроков наступления глобального экологического кризиса: согласно некоторым оценкам, кризис еще не наступил, согласно другим — уже начался, согласно третьим — кризис начался еще в начале XX в. Нет единого мнения по поводу его причин. Но нет расхождений в главном — глобальный экологический кризис есть следствие развития нашего типа цивилизации, ориентированной на безудержный рост потребления, прежде всего материальных благ. Расширение и углубление кризиса представляет опасность для дальнейшего существования человечества.

Важную роль в понимании мировым сообществом опасности экологического кризиса сыграла деятельность Римского клуба, широкие научные исследования перспектив развития человечества. Результаты этих исследований были доведены до мировой общественности. Книги «Пределы роста», «За пределами роста» стали бестселлерами и заставили многих жителей Земли осознать особенности экологической революции. В них было показано, что развитие человечества ограничено наличием различных пределов. Достижение пределов или их превышение приводит к катастрофическим последствиям для всего человечества. Леса также относятся к возобновимым ресурсам. К началу освоения земледелия на Земле было 6 млрд га лесов. Сейчас на планете осталось только 4 млрд га, причем первичных (таких, где не было вырубок и использования лесных ресурсов) — только 1,5 млрд га; 50% лесных массивов было уничтожено в период с 1950 г. по 1990 г. В США к настоящему времени уничтожено около 1/3 лесов, в Китае — 3/4. Темпы уничтожения лесов не падают. Ежегодно вырубается более 500 млн м³ леса в США; в Китае и Индии — около 300 млн м³, в России — до 120 млн м³ в год. Россия, имея 21% всех лесов мира, дает лишь 7% мировой эмиссии CO₂. Для сравнения укажем, что США имеют 4% лесов мира, 6% населения и дают 23% мировой эмиссии.

Человечеству необходимо рассмотреть в единой связи экономику и окружающую среду. В процессе производства из недр Земли извлекается основная масса сырья, большинство видов энергии, в землю же возвращаются отходы и тепло. Для Земли характерно постоянство естественных потоков вещества и энергии от источников к стокам. Существуют естественные пределы использования человечеством вещества и энергии и пределы темпов поступления отходов в планетарные стоки. Любой вид ресурсов, используемый человечеством, ограничен своими

источниками и стоками. Для того чтобы избежать выхода за пределы устойчивого потребления, необходимо руководствоваться следующими правилами.

1. Для возобновимых источников темпы потребления не должны превышать темпов регенерации.

2. Для невозобновимых источников темпы потребления не должны превышать темпов их замены на возобновимые ресурсы.

3. Для загрязняющих веществ предельная интенсивность выбросов не должна превышать скорости, с которой эти вещества перерабатываются, поглощаются.

Важнейшим проявлением кризиса является разрушение природных экосистем. В настоящее время на Земле ненарушенные территории занимают только 27% поверхности. Другим важнейшим показателем глобального экологического кризиса является потеря биоразнообразия биосферы. Ежегодно на Земле исчезает от 5000 до 15 000 видов. Химизация окружающей среды привела к нарушению циклов многих элементов в биосфере. Нарушение природных экосистем приводит к потере устойчивости биосферы, нарушается ее способность гасить на основе обратных связей возникающие возмущения. Причиной наступления глобального экологического кризиса авторы указанного выше пособия считают то, что человек уже превысил экологический предел потребления чистой первичной продукции. Согласно их оценке, произошло это еще в начале XX в. Единственный способ избежать дальнейшего углубления экологического кризиса заключается в возвращении в природные пределы потребления человечеством чистой первичной продукции. Только в этом случае может возродиться регулирующая функция биосферы.

Биосфера обладает мощными механизмами регуляции, которые подтверждают, в частности, тем фактом, что геофизические процессы, способные полностью изменить биосферу за период около 100 000 лет, не изменили ее за гораздо более продолжительный период. Эту неизменность окружающей среды обеспечивают процессы биотической регуляции. Биота обладает массой в сухом весе примерно в 1 млрд раз меньше, чем Земля. Но обновление живого вещества происходит с большой скоростью (фитомасса суши обновляется примерно за 15 лет, биомасса океана примерно за 30 дней), поэтому общая масса живого вещества, образованного за время жизни, даже превосходит массу Земли.

Для того, чтобы человек вернулся в состояние равновесия с природой, необходимо прежде всего осознать место человека в биосфере, его природное предназначение. Человек не является царем природы, ее хозяином. Согласно Горшкову, все консументы (потребители чистой первичной продукции) могут быть разбиты на 3 группы в зависимости от своих размеров. Первая группа размерами от 10^{-6} до 10^{-4} м (бактерии, грибы-сапрофаги) потребляет около 90% чистой первичной продукции. Вторая группа (беспозвоночные) с размерами от 10^{-4} до 10^{-2} м потребляет около 10% чистой первичной продукции. Третья группа с размерами от 10^{-2} до 1 м, в которую входит и человек, потребляет не более 1% чистой первичной продукции. С биосферной точки зрения человек относится к крупным передвигающимся животным, выполняющим задачу тренировки «ремонтников» биосферы. Основную работу по восстановлению биосферы после катастрофических воздействий различного рода как раз выполняют биологические виды, называемые «ремонтниками» биосферы. Для сохранения биосферы человек прежде всего не должен превышать норму потребления чистой первичной продукции, должен обеспечивать постоянную плотность популяции. Не человек управляет

биосферой, а биосферные сообщества определяют численность популяции человека. В осознании своего места в биосфере как раз и заключается разумность человека. Для того, чтобы биосфера возвратилась в состояние, в котором бы в полной мере работала биотическая регуляция (поскольку биота при современной численности населения не способна регулировать возмущения антропогенного происхождения), численность населения планеты должна быть уменьшена в 10 раз!

ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ВИДЫ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Загрязнением среды считается внесение в нее новых, не свойственных ей физических, химических, биологических составляющих или превышение естественного среднего уровня за многолетний период этих составляющих в среде. С экологической точки зрения объектом загрязнения выступает не почва, вода или воздух, экосистема. Поступление загрязнений изменяет функционирование экосистемы. Изменяются потоки энергии и вещества, продуктивность, численность популяций и т. п. Загрязнение природной среды может происходить от естественных источников (наводнение, извержение вулкана, падение метеорита и т. д.) и в результате человеческой деятельности. Таким образом, следует различать природные и антропогенные загрязнения. Загрязнение может иметь физическую, химическую, биологическую природу.

Приведем определение загрязнения, которое было сформулировано группой экспертов при ООН по научной проблеме глобального загрязнения морей. Хотя определение касается морей, оно хорошо, на наш взгляд, раскрывает сущность понятия загрязнения. «Загрязнение означает внесение человеком прямо или косвенно веществ или энергии в морскую среду, в результате чего возникают такие пагубные последствия, как ущерб живым ресурсам, опасность для здоровья человека, помехи морской деятельности, изменение полезных свойств водного объекта».

В биологическом энциклопедическом словаре загрязнение определяется следующим образом. К загрязнениям биосферы относятся как поступление и накопление стойких загрязняющих веществ, которые почти не разрушаются в природных средах (например, ДДТ), так и веществ, имеющих естественные механизмы размножения и усвоения (например, удобрения) в количествах, превышающих способность биосферы к их переработке, нарушающих сложившиеся в ходе длительной эволюции природные системы и связи в биосфере и подрывающих способность природных компонентов к саморегуляции.

Физическое загрязнение связано с изменением физических параметров: тепловых, световых, электромагнитных, радиационных, звуковых и др.

Тепловое загрязнение обычно связано с промышленными выбросами теплой воды и различных газов. Тепловое загрязнение водоемов вызывает их эвтрофикацию, изменяется видовой состав в водоеме. Тепловое загрязнение атмосферы может происходить также в результате поступления в атмосферу парниковых газов. Такое тепловое загрязнение носит вторичный характер. Хорошо известный вид физического загрязнения шумовое загрязнение. Развитие транспорта, промышленности обуславливает шумовое загрязнение, проявляющееся в превышении естественного уровня шума, изменении спектра шума, появлении новых частот звуковых колебаний, не характерных для окружающей среды. Фактически любые

звуки, генерируемые неприродными источниками, могут рассматриваться как шумовые, поскольку подобные источники отсутствовали в период эволюции человека. Шумовое загрязнение снижает производительность труда, вызывает различные заболевания. Исследования показывают, что сильный шум оказывает на организм человека действия, подобные действию наркотиков. Согласно данным медиков, шумовое загрязнение сокращает продолжительность жизни на 8-12 лет. В районах аэропортов в радиусе до 15 км зарегистрировано значительное ухудшение здоровья населения. При взлете самолеты типа ИЛ-76, ИЛ-86 создают шум, превышающий ночную норму в радиусе до 40-50 км. В Российской Федерации 1,5 млн человек страдает от авиационного шума.

Электромагнитное загрязнение возникает в результате работы мощных электроустановок, линий электропередач, радиопередающих устройств, в том числе мобильных средств связи. Воздействие электромагнитного излучения во всем его спектре на человека еще не исследовано. В литературе описаны многочисленные факты отрицательного воздействия искусственных электромагнитных полей на человека и способности человека ощущать эти поля. Например, некоторые люди, находясь на расстоянии десятка метров от линии электропередачи, способны определять момент ее включения или выключения. Электромагнитное излучение оказывает отрицательное воздействие не только на человека. Под линиями электропередачи напряженность электрических и магнитных полей значительно превышает фоновый уровень. Установлен факт отрицательного влияния электромагнитного излучения на структуру почвы, высокий уровень подобного загрязнения наблюдается при прокладке линий электропередач над сельхозугодьями. В России сохраняется тенденция роста электромагнитного и шумового загрязнений. Таблица дает представление о распространенности этих видов загрязнений.

Химическое загрязнение представляет собой поступление в экосистему тех или иных веществ, количественно или качественно чуждых экосистеме. При этом не только изменяются химические свойства среды, но и может нарушиться функционирование экосистемы.

Таблица

Число объектов, которые не удовлетворяли санитарно-гигиеническим нормам по воздействию шума и электромагнитных полей в 1997 г.

Категория объекта	Шум		Электромагнитные загрязнения	
	1	2	1	2
Промышленные предприятия	13663	53	3601	27,3
Коммунальные объекты	6345	31,6	2354	24,4
Транспорт	2197	55,1	1058	12,3

1 — количество обследованных объектов; 2 — из них не отвечает санитарно-гигиеническим нормам, %.

Человек поставляет в окружающую среду соединения, которых раньше в ней не было. Поэтому отсутствует естественный (природный) путь их нейтрализации. Примерами химического загрязнения являются загрязнения тяжелыми металлами, пестицидами, хлорбифинилами и др. Отрицательные влияния химических загрязнений на метаболизм живых организмов называют «экологическими ловушками». В качестве такой ловушки можно упомянуть явление накопления метилртути в организме человека (болезнь Минамата — по названию местности в Японии, где эта болезнь была впервые обнаружена). Отходы производства, содержащие метилртуть сбрасывались в залив, откуда в морепродуктах, выловленных рыбаками, поступали в организм человека. Более 40 лет понадобилось природе для того, чтобы устранить последствия сбросов ядовитых отходов в залив. Только в 1998 г. местным рыбакам была разрешена добыча морепродуктов в этом заливе.

Биологическое загрязнение является не менее опасным, чем химическое загрязнение. Эпидемии гриппа, других болезней являются примерами проявления микробиологического загрязнения, вызванного микроорганизмами. Распространение патогенных организмов со сточными водами часто являлось и продолжает являться причиной эпидемий.

Случайное переселение животных или растений в экосистемы может привести к значительному нарушению их функционирования. Колорадский жук, завезенный из Америки в Европу, нанес колоссальный вред пасленовым растениям. Гребневик мнemiопсис, попавший с балластными водами из Карибского бассейна в Черное море, где он оказался более живучим, по сравнению с местными обитателями в той же трофической цепи, нанес огромный ущерб экосистеме моря. Читатели, вероятно, знакомы и с другими подобными примерами.

Разделение загрязнений на физические, химические, биологические имеет определенную условность и ограниченность. Например, тепловое загрязнение водоема, возникающее при использовании воды для отвода избыточного тепла, относится к физическому загрязнению. Однако тепловое загрязнение приводит к интенсификации и перестройке процессов биотической компоненты экосистемы, нарушаются процессы переноса химических веществ, изменяется видовой состав. Таким образом возникает вторичное химическое и биологическое загрязнение.

Другой пример: поступление нефтепродуктов на поверхность водоема — химическое загрязнение. Но распределение нефтепродуктов по поверхности нарушает процессы газообмена, испарения, теплообмена водоема с атмосферой. Поверхностные пленки изменяют параметры ветровых волн, как следствие происходит гашение или ослабление коротковолновых составляющих волнового спектра. Изменения параметров поверхностных волн, в свою очередь, влияют на структуру приводного слоя атмосферы и приповерхностного слоя водоема — изменяются профили скорости ветра и течения, вертикальные распределения пульсаций. При этом изменяются потоки энергии и импульса между атмосферой и водоемом, т. е. имеет место изменение динамического взаимодействия пограничных слоев атмосферы и водоема. Напомним, что в основе этой сложной цепочки изменений физико-химических процессов лежит химическое загрязнение водной поверхности.

Способность природной среды к самоочищению зависит от характеристик загрязняющего вещества и биоценоза. При загрязнении, например, водных объектов загрязняющие вещества можно подразделить на следующие группы. В первую группу входят консервативные загрязняющие вещества, которые не разлагаются

или разлагаются в природной среде очень медленно. Снижение концентрации консервативных загрязняющих веществ происходит за счет процессов разбавления, массопереноса, сорбции, биоаккумуляции и др. Самоочищение в этом случае имеет кажущийся характер, так как происходит только перераспределение и рассеяние консервативных загрязняющих веществ в окружающей среде. Локальное загрязнение уменьшается за счет расширения области загрязнения. Общее количество загрязняющих веществ не изменяется. Ко второй группе относятся биогенные загрязняющие вещества, которые участвуют в биологическом круговороте. Самоочищение природной среды происходит за счет биохимических процессов. В третью группу могут быть отнесены водно-растворимые вещества, не участвующие в биологическом круговороте. Самоочищение от этих загрязняющих веществ происходит путем химической и микробиологической трансформации.

Реакция экосистемы на внесение разного вида загрязняющих веществ в нее будет различной. При увеличении концентрации загрязняющих веществ, участвующих в биологическом круговороте, наблюдается первоначальное увеличение биопродуктивности экосистемы, при дальнейшем росте концентрации загрязняющих веществ происходит падение продуктивности и, возможно, гибель экосистемы. При поступлении в экосистему загрязняющих веществ, не имеющих природных путей утилизации, с ростом их концентрации происходит падение биопродуктивности экосистемы и ее гибель.

Антропогенные загрязнения имеют, как правило, локальный характер поступления в среду. Распределение по большей территории происходит за счет множественности путей миграции.

Загрязняющие вещества, поступающие в атмосферу, участвуют в глобальной атмосферной циркуляции. Осаждение атмосферных загрязняющих веществ на поверхность водных объектов приводит к их загрязнению. Осаждение атмосферных загрязнений на поверхность растений вызывает загрязнение биоты (внекорневое поступление загрязнений).

Загрязняющие вещества, поступившие в водный объект, участвуют в циркуляции водной массы. За счет испарения воды может происходить загрязнение атмосферы, переход загрязненной воды в почву или биоту вызывает их загрязнение. Подобным образом можно перечислить, как загрязняющие вещества, поступившие первоначально в биоту или на поверхность суши, вызывают загрязнение атмосферы и гидросферы. Беглое рассмотрение процессов миграции загрязняющих веществ показывает, что физические процессы массопереноса играют важнейшую роль в распространении загрязнений. Особенно велика роль физических механизмов на границах раздела фаз, в пограничных слоях.

Множественность путей миграции загрязняющих веществ приводит к необходимости комплексного подхода к изучению этого процесса. Решить задачу переноса загрязнений только в рамках изучения физических, химических или биологических процессов невозможно.

Упомянем, что в зависимости от масштабов распределения загрязнений выделяют глобальные, региональные и локальные загрязнения. Глобальные загрязнения называют также биосферными. Примерами глобальных загрязнений служат загрязнения озоноразрушающими веществами атмосферы, загрязнение Мирового океана нефтепродуктами, радиоактивное загрязнение, загрязнение ДДТ биосферы (ДДТ обнаружен в жировых тканях тюленей в Арктике и пингвинов Антарктиды).

Загрязнение околоземного пространства в результате освоения космоса также является примером глобального загрязнения.

С начала космической эры было запущено около 24 000 объектов, из них 16 000 уже прекратили свое существование, остальные еще находятся на орбитах. Из них не более 5% приходится на действующие космические аппараты, остальные же объекты представляют собой неработающие космические аппараты. В настоящее время в околоземном космическом пространстве находится от 6000 до 10 000 объектов искусственного происхождения размером более 10 см. За ними ведутся наблюдения наземными радиолокационными станциями, они внесены в каталоги. По оценкам, в околоземном пространстве находятся несколько десятков тысяч частиц размером от 1 до 10 см и частиц размером 0,1-1 см до 35 млн. Главные источники этих объектов — взрывы космических аппаратов и ракет-носителей. Общая масса космического мусора составляет 3000-3500 т. В настоящее время опасность столкновения низкоорбитальных космических кораблей с частицами искусственного происхождения выше вероятности столкновения с частицами естественного происхождения. К настоящему времени уже известны случаи столкновения космических аппаратов с космическим мусором. Например, в 1996 г. спутник CERISE столкнулся с фрагментом ракеты ARIANE. В процессе полетов космические корабли выделяют большое число частиц размером менее 1 мм, которые относят к микрочастицам. При достижении некоторой критической плотности потока космических частиц искусственного происхождения возможен лавинообразный процесс их размножения за счет столкновения фрагментов между собой. Освоение космического пространства приводит к загрязнению верхней атмосферы и земной поверхности продуктами сгорания топлива (химическое загрязнение), фрагментами космических аппаратов; радиоактивному загрязнению околоземного космического пространства в результате использования бортовых ядерных источников; электромагнитному загрязнению. Во время запуска космического корабля типа «Шаттл» в верхние слои атмосферы выбрасывается более 130 т хлора.

Работа наземных радиопередатчиков, промышленных объектов вызывает локальное электромагнитное загрязнение. При этом происходит также загрязнение околоземного космического пространства в длинноволновом и коротковолновом диапазонах. Хорошо известен «эффект уикэнда», заключающийся в том, что в выходные дни, когда большинство промышленных предприятий Европы и Северной Америки не работают, наблюдается уменьшение интенсивности электромагнитного излучения в околоземном космическом пространстве. Суммарный вклад искусственных источников электромагнитного излучения составляет, по разным оценкам, от 1 до 10% от вклада естественных источников. Локальная напряженность искусственных полей может превышать напряженность естественных полей на 1—3 порядка.

В случае регионального загрязнения наблюдается превышение естественного среднеклиматического уровня концентрации тех или иных веществ или возникновение новых, не характерных для нее физических, химических, биологических агентов в окружающей среде в пределах значительных областей, но не всей поверхности Земли. В случае локального загрязнения происходит загрязнение только вокруг промышленного объекта, города, животноводческой фермы, в части водоема и т. п.

МОНИТОРИНГ БИОСФЕРЫ

Под мониторингом окружающей среды понимают комплекс мероприятий по определению степени загрязненности экосистем или элементов биосферы, наблюдению за нарушениями экологического равновесия.

Различают следующие виды мониторинга: глобальный, национальный, региональный, локальный.

Иногда под мониторингом понимают информационную систему наблюдения и анализа состояния природной среды, прежде всего наблюдения уровней загрязнения и эффектов, вызываемых ими в биосфере или ее частях. Мониторинг представляет собой многоцелевую информационную систему, накапливающую данные о состоянии биосферы, о степени антропогенного воздействия на окружающую среду.

Другим примером, показывающим, как сложно бывает оценить антропогенный вклад в изменчивость природной среды, является изменение уровня Каспийского моря. Наблюдавшееся в предыдущие десятилетия падение уровня моря объясняли, прежде всего, уменьшением речного стока. Сток в Каспий Волги, Урала, других рек, действительно, с 1950-х гг. уменьшился. Для частичной компенсации потерь воды за счет испарения было предложено перекрыть мелководный залив Кара-Богаз-Гол, который фактически играл роль испарительного бассейна. Залив перекрыли, однако начавшийся подъем уровня Каспия привел к затоплению значительных территорий вокруг Северного Каспия. Разрушение плотины и возобновление сброса каспийской воды в залив Кара-Богаз-Гол не помешало дальнейшему росту уровня. Начиная с 1997 г. подъем уровня прекратился, сейчас началось очередное медленное падение уровня. Все это свидетельствует о том, что реальные природные причины изменения уровня Каспийского моря при принятии решения о строительстве плотины были неизвестны. Следует упомянуть, что во временных рядах уровней Каспийского моря, а также крупнейших озер Европы и Северной Америки наблюдаются колебания с 30-летними циклами, которые позволяют предположить наличие связей между колебаниями солнечной активности и изменением колебаний уровня водоемов. В настоящее время большинство ученых склоняется к мнению, что изменение уровня Каспийского моря обусловлено тектоническими процессами и глобальными изменениями климата. Исторический анализ показал, что для Каспийского моря в прошлом были характерны значительные изменения уровня моря.

профессор
В.И. Трухин

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В ЗАДАЧАХ
ФОРМИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ НА ЦИЛИНДРЕ,
ДВИЖУЩЕМСЯ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

В.Г. Байдулов

*Учреждение Российской академии наук Институт проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского РАН*

Развита техника и построены решения задач формирования слоистых течений стратифицированной жидкости, вызванных движением тел цилиндрической формы [1]. Исследованы границы применимости использованных разложений в виде временных рядов. На базе системы вложенных моделей изучена структурная устойчивость решений. Показано, то в случае течения стратифицированной жидкости учет диссипации только одного вида (вязкости) не приводит к полному сглаживанию поля скорости, более того определены области, где с течением времени сдвиг скорости неограниченно нарастает. Продемонстрировано сходство и подчеркнута различие в поведении решений задач плоской и цилиндрической геометрии.

Моделирование динамики природных систем требует включения в рассмотрение значительно количества влияющих факторов, действующих в широком диапазоне пространственно-временных масштабов. В то же время традиционно при моделировании ограничивались описанием лишь отдельных компонент природных течений – волн, вихрей, пограничных слоев [2 – 5]. Однако при определенных условиях слабые эффекты стратификации и диссипации могут существенно менять структуру течения. Таким образом, актуальной оказывается задача структурной устойчивости решений гидродинамических задач, т.е. устойчивости по отношению к изменению модели течения за счет таких “малых” эффектов стратификации, вязкости и диффузии. Представляется, что наиболее естественно изучать структурную устойчивость на примере задач формирования течений, когда усложнение модели течения происходит по мере их эволюции.

Ранее структурная устойчивость течений изучалась на примере задачи формирования течения при движении наклонной плоскости в стратифицированной жидкости [1]. Была развита техника построения решений в виде временных рядов, однако вопрос об их сходимости остался открытым. Несмотря на то, что для задач обтекания тел конечного размера было показано хорошее совпадение между теоретическими и экспериментальными данными [6], результаты касались только начальной стадии развития течения, и общих выражений для решения построено не было.

Целью данной работы является разработка техники решения задач формирования течений для цилиндрической геометрии, определение границ применимости разложений решения в виде временных рядов. Процесс формирования тонкой структуры стратифицированных течений изучается на примерах задач возникновения течения вызванного продольным движением наклонных плоскости и цилиндра изучается, анализируется динамика вклада

отдельных физических факторов в общую картину течения по мере его эволюции. Исследуется равномерность предельных и двойных предельных переходов по параметрам, отвечающим за переход от более полной физической модели течения к упрощенной.

Общим для всех моделей данной работы является наличие вязкости и несжимаемости, поэтому при изучении структурной устойчивости течений в качестве системы вложенных моделей выбрана система, в которой модель вязкой несжимаемой жидкости последовательно усложняется за счет эффектов стратификации и диффузии.

1. Постановка задачи. В рамках системы вложенных моделей: однородная вязкая жидкость, стратифицированная вязкая жидкость и среда с диффузией рассматривается задача формирования слоистых течений вызванных продольным движением наклонной плоскости и цилиндра, а также вращением цилиндра в однородной жидкости. Жидкость предполагается несжимаемой, поле скорости – соленоидальным. Система уравнений движения, записанных в приближении Буссинеска, замыкается уравнением состояния в линейной форме $\rho = \rho_0 \left[1 - \frac{z}{\Lambda} + S \right]$ (где Λ – масштаб стратификации, S – возмущения солёности)

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{V}}{dt} - \nu \Delta \mathbf{V} + \frac{\nabla p}{\rho_0} - S \mathbf{g} &= 0 \\ \operatorname{div} \mathbf{V} &= 0 \\ \frac{dS}{dt} - \frac{w}{\Lambda} &= \kappa \Delta S \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $\mathbf{V} = (u, v, w)$ – скорость, p – динамическая составляющая давления, \mathbf{g} – ускорение свободного падения, ν и κ – коэффициенты кинематической вязкости и диффузии соли соответственно.

Начальные и граничные условия. Во всех рассматриваемых далее одномерных задачах полагается, что в начальный момент времени жидкость покоится, возмущения солёности отсутствуют

$$t = 0 : U = 0, S = 0$$

На поверхности тела выполняется условие прилипания – условие равенства скоростей течения жидкости и движения границы. Предполагается, что на бесконечности все возмущения затухают.

2. Движение плоскости. Решение задачи об импульсном старте плоскости с постоянной скоростью в несжимаемой, вязкой, однородной, изотермической жидкости, рассматривается во многих монографиях и учебных пособиях, например в [7]. Один из способов его построения – метод интегрального преобразования Лапласа. Учитывая симметрию задачи (симметрию сдвигов вдоль оси, лежащей в плоскости Рис. 1а) в приближении несжимаемой жидкости уравнения движения, начальные и граничные условия примут вид

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2}$$

$$t=0 : U=0, \eta=0 : U=U_0, \eta \rightarrow \infty : U \rightarrow 0.$$

Неограниченность плоскости приводит к отсутствию у задачи характерного размера. Тогда, используя два размерных параметра – скорость движения плоскости U_0 и коэффициент кинематической вязкости ν , можно перейти к безразмерным переменным $U' = U/U_0$, $t' = t/t_0$, $\eta' = \eta/\eta_0$, где пространственный и временной масштабы связаны соотношением $\eta_0^2 = \nu t_0$. В результате оказывается, что в безразмерных переменных задача параметров не содержит, более того один из параметров обезразмеривания может быть задан произвольно

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} \quad (2.1)$$

$$t=0 : U=0, \eta=0 : U=1, \eta \rightarrow \infty : U \rightarrow 0.$$

С использованием преобразования Лапласа, для скорости движения жидкости может быть получено решение в виде

$$U = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^\infty e^{-\alpha^2 t} \sin(\alpha \eta) \frac{d\alpha}{\alpha} = \operatorname{erfc}(\eta / 2\sqrt{t}). \quad (2.2)$$

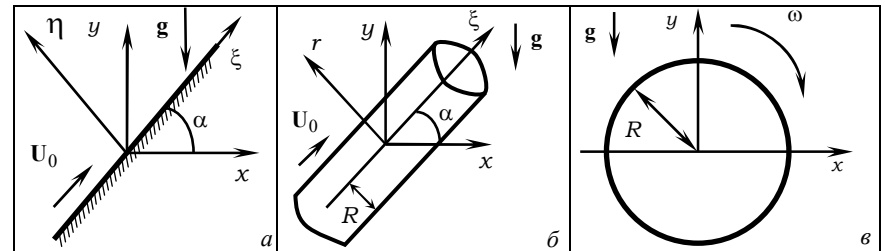


Рис. 1. Геометрия течения.
продольное движение а) плоскости, б) цилиндра; в) вращение цилиндра.

Решение (2.2) приведено во многих классических монографиях по гидродинамике, оно быстро убывает на вязком масштабе длины $\delta_\nu = 2\sqrt{\nu t}$, который со временем неограниченно растёт. При этом за бесконечное время весь объём жидкости вовлекается в движение со скоростью равной скорости движения границы U_0 .

3. Вращение кругового цилиндра в неограниченной жидкости. Задачи формирования течения, вызванных движением тел конечного размера, рассматриваются в настоящей работе на примере кругового цилиндра. Исследуем течение, возникающее при вращении цилиндра в вязкой бесконечной жидкости. Жидкость предполагается однородной, вязкой, несжимаемой. Цилиндр радиуса R покоится при $t=0$, мгновенно начинает вращаться при $t>0$ с постоянной угловой скоростью ω . Задача рассматривается в цилиндрической системе координат с осью z направленной вдоль образующей цилиндра (Рис. 1в).

Учитывая инвариантность задачи по отношению к сдвигам вдоль оси z , а также, что центр цилиндра покоится, а его граница вращается с постоянной угловой скоростью ω , приходим к тому, что компоненты скорости U_r и U_z тождественно равны нулю. Принимая во внимание осевую симметрию границы, когда поворот цилиндра на произвольный угол не меняет вид задачи, получаем, что гидродинамические функции не зависят от координат φ и z . В результате тангенциальная компонента скорости $U_\varphi = U(r, t)$ оказывается единственной отличной от нуля компонентой, а сама задача – одномерной.

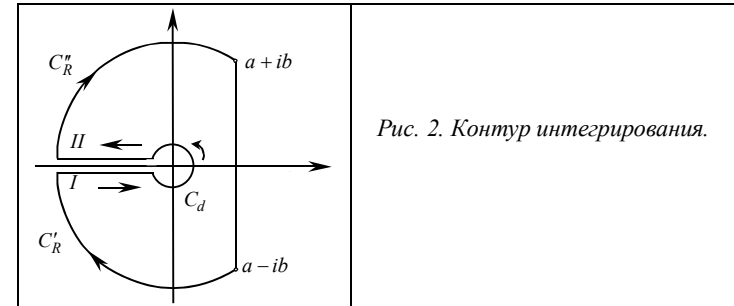


Рис. 2. Контур интегрирования.

В отличие от плоской геометрии задачи с телами конечных размеров имеют собственный масштаб длины – характерный размер тела (для цилиндра $r_0 = R$). Тогда выбирая в качестве масштаба скорости и времени величины $U_0 = \omega \cdot R$ и $t_0 = R^2 / \nu$, переходим к безразмерной формулировке задачи, которая, как и задача (2.1), не содержит параметров

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{1}{r^2} U \tag{3.1}$$

$$t = 0 : U = 0, \quad r = 1 : U = 1, \quad r \rightarrow \infty : U \rightarrow 0$$

В образах Лапласа скорость удовлетворяет обыкновенному дифференциальному уравнению

$$r^2 u'' + ru' - (pr^2 + 1)u = 0 \tag{3.2}$$

с граничными условиями

$$r = 1 : u = 1/p; \quad r \rightarrow \infty : u \rightarrow 0.$$

Здесь u – образ Лапласа скорости, p – параметр преобразования Лапласа. Уравнение (2.6) представляет собой уравнение Бесселя мнимого аргумента первого порядка. Его решение, удовлетворяющее условию затухания на бесконечности, имеет вид

$$u(r) = C_1 K_1(\sqrt{pr})$$

где K_1 – функция Макдональда первого порядка.

Постоянная интегрирования C_1 определяется из граничного условия на цилиндре, после чего решение в образах Лапласа принимает вид

$$u = \frac{1}{p} \frac{K_1(\sqrt{pr})}{K_1(\sqrt{p})} \tag{3.3}$$

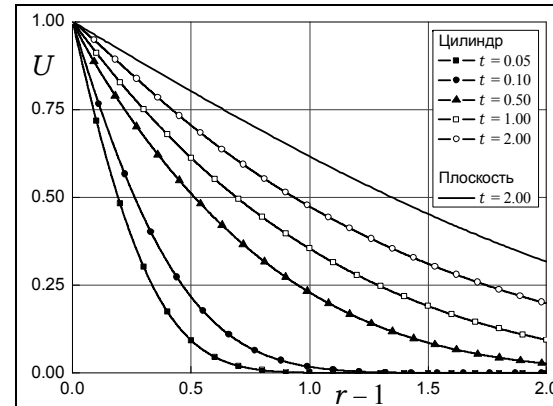


Рис. 3. Вращение цилиндра в однородной жидкости. Пространственная динамика скорости течения в зависимости от времени.

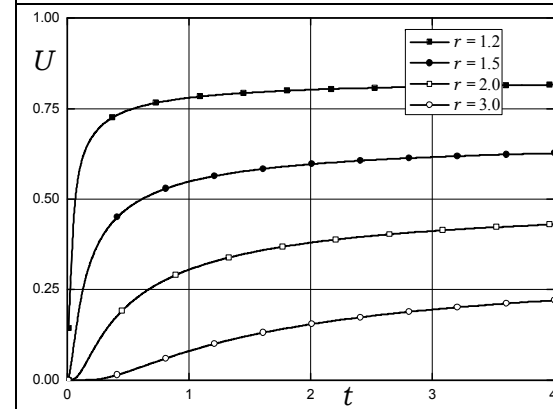


Рис. 4. Вращение цилиндра в однородной жидкости. Временная эволюция скорости течения в зависимости от расстояния до цилиндра.

Обращая образ Лапласа (3.3) с помощью методов ТФКП (контур интегрирования приведен на Рис. 2), получаем выражение для скорости течения в виде квадратуры

$$U = \frac{1}{r} - \frac{2}{\pi} \int_0^\infty e^{-\alpha^2 t} F_1 \frac{d\alpha}{\alpha} \tag{3.4}$$

где $F_i = (J_i(\alpha)Y_i(\alpha r) - Y_i(\alpha)J_i(\alpha r)) / (J_i^2(\alpha) + Y_i^2(\alpha))$, J_i и Y_i – функции Бесселя и Неймана, соответственно; $i = 0, 1$.

Выражение (3.4) имеет большое сходство с выражением для скорости течения жидкости, вызываемого продольным движением плоскости (2.2). Первые слагаемые этих выражений являются решениями соответствующих стационарных задач. В подынтегральных выражениях в обоих случаях присутствует общий член

$\exp(-\alpha^2 t) / \alpha$, отвечающий за вязкое затухание. Различие геометрий (плоской и цилиндрической) содержится во вторых множителях интегралов, входящих в решения ($\sin \alpha \eta$, в случае движения плоскости и F_1 , в случае вращения цилиндра). Рассмотрим их подробнее.

Использование функций амплитуды и фазы цилиндрических функций

$$A_i^2 = J_i^2 + Y_i^2, \quad \vartheta_i = \arctg \frac{J_i}{Y_i}$$

позволяет явно выявить сходство выражений (2.2) и (3.4)

$$I_i(r, \tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \exp(-\alpha^2 t) \frac{A_i(\alpha r)}{A_i(\alpha)} \sin(\vartheta_i(\alpha r) - \vartheta_i(\alpha)) \frac{d\alpha}{\alpha}$$

Асимптотический анализ показывает, что при малых значениях переменной интегрирования α функция F_1 пропорциональна α^2 , что обеспечивает сходимость интеграла в нуле. Один из множителей подынтегрального выражения – периодическая функция, с периодом $T = 2\pi / (r - 1)$, другой играет роль амплитуды, затухающей с расстоянием r . Наличие затухающей экспоненты с показателем $\alpha^2 t$ даёт затухание со временем t .

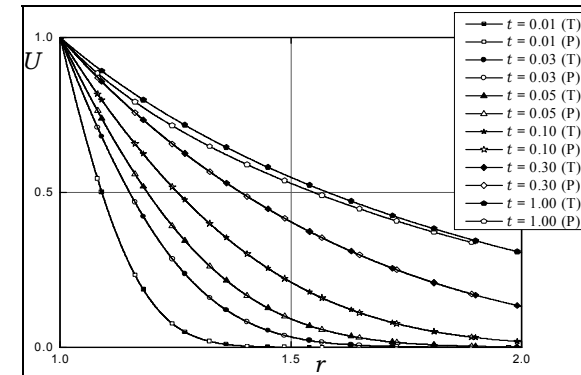


Рис. 5. Вращающийся цилиндр. Пространственная динамика скорости течения однородной жидкости в зависимости от времени. Кривые рассчитаны по квадратуре (3.4) (T) и по разложению в виде временных рядов (3.8) (P) при $n = 5$.

Для численного вычисления интеграла необходимо выбрать значение верхнего предела интегрирования. Для фиксированного момента времени t , вводя параметр m , квадрат которого равен максимальному значению показателю экспоненты $m^2 = \alpha_t^2 t$, определяем величину $\alpha_t = m / \sqrt{t}$, отвечающую за экспоненциальное затухание подынтегрального выражения. Другой параметр $\alpha_r = T$ характеризует периодичность функции F_1 . Тогда, при выполнении неравенства $\alpha_t > 3\alpha_r$ в качестве верхнего предела интегрирования берётся значение α_t , если же справедливо неравенство $\alpha_t < 3\alpha_r$, то верхним пределом

считается величина $3\alpha_r$.

Вид профилей скорости выявляет подобие решений при движении плоскости и вращении цилиндра в однородной жидкости (Рис. 3). Причём, в случае вращения цилиндра, на малых временах, вовлечение жидкости в движение происходит так же, как и в случае плоскости (Рис. 4). Однако на больших временах различия между решениями для плоскости и цилиндра становятся более существенными. Переход к пределу больших времён, показывает, что с ростом времени тело не приводит всю жидкость в движение, как это было в случае с плоскостью, а скорость затухает с расстоянием как $1/r$.

Кроме выражения (3.4), можно получить другое представление решения задачи (3.1) через временные ряды. Используя асимптотические разложения функций Макдональда [8] решения задачи (3.3) в образах Лапласа при больших значениях параметра p , получаем

$$\frac{K_1(\sqrt{pr})}{K_1(\sqrt{p})} \Big|_{\substack{t \rightarrow \infty \\ p \rightarrow 0}} = \frac{1}{\sqrt{r}} \frac{1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_n}{(\sqrt{pr})^n}}{1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_n}{(\sqrt{p})^n}} \exp(-\sqrt{p}(r-1)) \quad (3.5)$$



Рис. 6. Эволюция границы применимости разложения (3.8) $r(t)$, для различных значений верхнего предела суммирования для течения, вызванного вращением кругового цилиндра (расхождение между точным решением и приближённым не превышает 10%).

Для обращения асимптотических выражений, получим выражение в виде ряда для отношения, входящего в (3.5)

$$\frac{1 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n x^n a^n}{1 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n x^n} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n x^n \quad (3.6)$$

здесь $x = 1/\sqrt{p}$, $a = r^{-1}$.

Домножая обе части уравнения на знаменатель дроби и собирая члены при

одинаковых степенях x , находим выражения для коэффициентов b_n

$$b_1 = (a-1)c_1, b_n = (a^n - 1)c_n - \sum_{m=1}^{n-1} b_{n-m}c_m.$$

Тогда для отношений функций Макдональда окончательно получаем асимптотическое представление вида

$$\frac{K_1(\sqrt{pr})}{K_1(\sqrt{p})} = \frac{1}{\sqrt{r}} \exp(-\sqrt{p}(r-1)) \cdot \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n (\sqrt{p})^{-n} \right). \quad (3.7)$$

Обращая представление (3.7) [9], имеем

$$U = \frac{1}{\sqrt{r}} \operatorname{erfc}(\zeta) + \frac{1}{\sqrt{r}} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot (4t)^{n/2} i^n \operatorname{erfc}(\zeta) \quad (3.8)$$

$$b_0 = 0, b_1 = (r^{-1} - 1)c_1, b_n = \left[(r^{-n} - 1)c_n - \sum_{m=1}^{n-1} b_{n-m}c_m \right] \quad (3.9)$$

где $\zeta = \frac{r-1}{2\sqrt{t}}$, $i^n \operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} \frac{(\tau-z)^n}{n!} e^{-\tau^2} d\tau$ – кратный интеграл вероятности [8]. Значения коэффициентов c_n следуют из асимптотического разложения функции Макдональда $K_1(x)$

$$c_0 = 1, c_n = \frac{1}{n! 8^n} \prod_{k=1}^n (4 - (2k-1)^2) \quad (3.10)$$

Численный анализ показывает, что полученное представление (3.8) совпадает с точным решением (3.4) на малых временах ($t < 1$). Со временем ($t \geq 1$), возникают неустранимые расхождения между приближенным и точным решением (Рис. 5). Тем не менее, детальный анализ показывает, что разложения (3.8) носят асимптотический характер на всех временах, и для ограниченного верхнего предела суммирования выражения (3.8) значением $n = N_0$ можно найти расстояния, начиная с которых точное и асимптотическое решения будут близки. Чтобы получить количественные оценки границ применимости конечных сумм (3.8) для различных значений параметра N_0 были построены зависимости $r(t)$ – расстояния от времени, где расхождение между точным и приближенным решениями не превышали 10% (Рис. 6).

4. Продольное движение цилиндра. Задача формирования течения при продольном движении цилиндра рассматривается аналогично задаче о вращении цилиндра. Ось ξ направлена вдоль образующей цилиндра радиуса R . В момент времени $t=0$ цилиндр начинает движение с постоянной скоростью $U_0 = U_0 e_\xi$ (Рис. 1б). В силу симметрии задачи течение оказывается одномерным с

единственной отличной от нуля продольной компонентой скорости $U = U(r, t)$. Условие несжимаемости при этом выполняется тождественно. После обезразмеривания, уравнения Навье – Стокса, начальные и граничные условия принимают вид

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \quad (4.1)$$

$$t = 0 : U = 0 ; r = 1 : U = 1 , r \rightarrow \infty : U \rightarrow 0$$

Использование преобразования Лапласа позволяет свести уравнение (4.1) к обыкновенному дифференциальному уравнению

$$r^2 u'' + ru' - pr^2 u = 0 \quad (4.2)$$

$$r = 1 : u = 1/p , r \rightarrow \infty : u \rightarrow 0$$

Уравнение (4.2) является уравнением Бесселя мнимого аргумента нулевого порядка. Его общее решение записывается как

$$u(r) = C_1 I_0(\sqrt{pr}) + C_2 K_0(\sqrt{pr})$$

Из условия затухания скорости на бесконечности следует положить $C_1 = 0$. Граничное условие на теле позволяет определить вторую постоянную интегрирования, в результате для образа скорости окончательно имеем выражение

$$u = \frac{1}{p} \frac{K_0(\sqrt{pr})}{K_0(\sqrt{p})} \quad (4.3)$$

Обращая образы Лапласа так, как это было сделано выше, получаем

$$U = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^\infty e^{-\alpha^2 t} F_0 \frac{d\alpha}{\alpha} \quad (4.4)$$

Аналогично задаче о вращении цилиндра, подробный анализ свойств решения (4.4) может быть проведён численно. Однако, в случае продольного движения цилиндра, необходимо рассмотреть поведение подинтегрального выражения в нуле, т.к. асимптотика функции Макдональда нулевого аргумента при малых значениях аргумента содержит натуральный логарифм. Поэтому диапазон интегрирования необходимо разбить на три части

$$I = \int_0^\varepsilon \text{разложение вблизи нуля} + \int_\varepsilon^A \text{промежуточная асимптотика} + \int_A^\infty \text{асимптотика на бесконечности} \quad (4.5)$$

При численном интегрировании, вкладом последней части пренебрегается. Поэтому возникает необходимость оценить погрешность вычислений, возникающую в результате таких действий. Используя асимптотическое выражение для функции F_0 при больших значениях переменной интегрирования α , для третьего слагаемого интеграла (4.5) получаем

$$I_\infty(r, t) = \frac{2}{\pi\sqrt{r}} \int_A^\infty \exp(-\alpha^2 t) \sin((r-1)\alpha) \frac{d\alpha}{\alpha} \quad (4.6)$$

Оценку этого интеграла можно провести двумя способами:

Оценка I (большие времена). Пусть $(r-1)\alpha = \beta$ и $\beta_0 = (r-1)A$, тогда

$$I_\infty(r, t) = \frac{2}{\pi\sqrt{r}} \int_{\beta_0}^{\infty} \exp\left(-\frac{\beta^2 t}{(r-1)^2}\right) \sin\beta \frac{d\beta}{\beta}$$

Поскольку $|\sin x| \leq 1$, то для оценки интеграла (4.6) сверху положим $\sin\beta = 1$.

После этого, сделав замену $\gamma = \beta\sqrt{t}/(r-1)$ и обозначив $\gamma_0 = A\sqrt{t}$, получим

$$I_\infty \leq \frac{2}{\pi\sqrt{r}} \int_{A\sqrt{t}}^{\infty} \exp(-\gamma^2) \frac{d\gamma}{\gamma} \text{ или } I_\infty \leq \frac{1}{\pi\sqrt{r}} \int_{A^2 t}^{\infty} \frac{\exp(-z)}{z} dz = \frac{1}{\pi\sqrt{r}} E_1(a^2 t),$$

где $z = \gamma^2$, $E_1(z)$ – интегральная показательная функция [8].

Асимптотика: $E_n(z) = \frac{1}{z} \left\{1 - \frac{n}{z}\right\} \exp(-z)$, тогда для последней части интеграла (4.5) окончательно получаем оценку сверху

$$I_\infty \leq \frac{1}{\pi\sqrt{r}} \frac{1}{A^2 t} \left[1 - (A^2 t)^{-1}\right] \exp(-A^2 t) \tag{4.7}$$

Оценка II (малые времена $\exp(-\alpha^2 t) \approx 1$).

$$I_\infty \leq \frac{2}{\pi\sqrt{r}} \int_A^{\infty} \frac{1}{\alpha} \sin((r-1)\alpha) d\alpha = \frac{2}{\pi\sqrt{r}} \int_{(r-1)A}^{\infty} \frac{1}{\beta} \sin\beta d\beta = \frac{2}{\pi\sqrt{r}} \left[\frac{\pi}{2} - \text{Si}((r-1)A)\right],$$

где $\text{Si}(z) = \int_0^z \frac{1}{t} \sin t dt$, $\text{Si}(\infty) = \pi/2$ – интегральный синус [8]. Тогда, на малых временах получаем накрывающую оценку

$$I_\infty \leq \frac{1}{\sqrt{r}} \left[1 - \frac{2}{\pi} \text{Si}((r-1)A)\right]. \tag{4.8}$$

Оценим величину первого слагаемого, входящего в интеграл (4.5). Разлагая подынтегральное выражение в ряд Тейлора, с точностью до первого порядка малости имеем

$$I_\varepsilon = \frac{2}{\pi} \int_0^\varepsilon e^{-\alpha^2 t} F_0 \frac{d\alpha}{\alpha} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \ln r \int_0^\varepsilon \left(1 + \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \left(\ln\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \gamma\right)^2\right)^{-1} \frac{d\alpha}{\alpha}$$

где $\gamma = 0.5772156649$ – постоянная Эйлера.

Последний интеграл может быть найден точно

$$I_\varepsilon = \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \ln r \left[\frac{\pi}{2} \arctg\left(\frac{2(\ln(\varepsilon/2) + \gamma)}{\pi}\right) + \frac{\pi^2}{4} \right] \tag{4.9}$$

Анализ выражения (4.9) показывает, что составляющая I_ε равномерно обращается в нуль вместе с ε , таким образом, выражение (4.4) асимптотически близко к решению исходной задачи.

Численный анализ показывает, что для допустимой погрешности порядка 10%, в качестве нижнего предела интегрирования достаточно взять величину $\varepsilon \sim 0.001$, а верхнего $A = m/\sqrt{t}$, где $m = 10$. При этом вкладом остальных частей выражения (4.5) можно пренебречь.

Проведенные оценки позволяют проанализировать свойства полученного решения и определить расстояния и времена, на которых применимы решения в виде временных рядов.

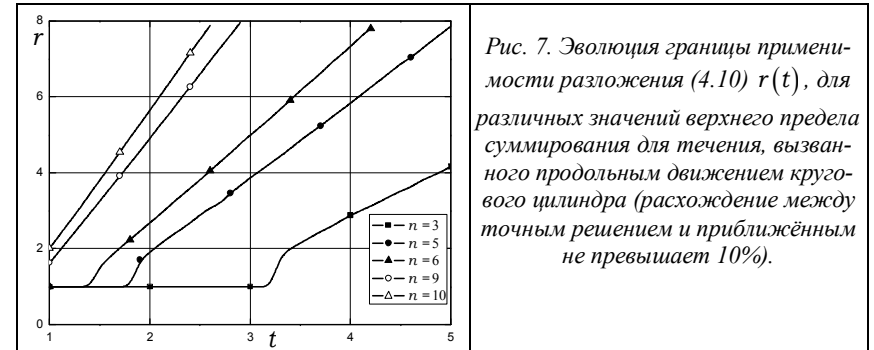


Рис. 7. Эволюция границы применимости разложения (4.10) $r(t)$, для различных значений верхнего предела суммирования для течения, вызванного продольным движением кругового цилиндра (расхождение между точным решением и приближённым не превышает 10%).

Решение в виде временных рядов, как и в задаче о вращении цилиндра, можно, как и в случае вращении цилиндра, получить, воспользовавшись асимптотическими разложениями функций Макдональда при больших значениях аргумента

$$U = \frac{1}{\sqrt{r}} \operatorname{erfc}(\zeta) + \frac{1}{\sqrt{r}} \sum_{n=1} b_n \cdot (4t)^{n/2} i^n \operatorname{erfc}(\zeta) \quad (4.10)$$

$$b_0 = 0, \quad b_1 = (r^{-1} - 1)c_1, \quad b_n = (r^{-n} - 1)c_n - \sum_{m=1}^{n-1} b_{n-m} c_m \quad (4.11)$$

где

$$c_0 = 1, \quad c_n = \frac{1}{n! 8^n} \prod_{k=1}^n (-(2k-1)^2) \quad (4.12)$$

В случае продольного движения цилиндра полученное приближённое решение задачи в виде рядов, так же как и для вращении цилиндра, полностью совпадает с точным решением (формула (4.4)) на малых временах, при $t < 1$. Однако при $t \geq 1$, решения вновь перестают совпадать и погрешность со временем растёт. Границы применимости решения, записанного в виде (4.10), приведены на Рис. 7.

5. Построение решений без использования преобразований Лапласа. Как было показано выше, решение задачи представляется в виде разложения во

временной ряд (ряд по степеням t). Однако, при их выводе были применены преобразования Лапласа, использование которых не вызывает трудностей в одномерных задачах, но в двумерных или трёхмерных задачах (в том числе линейных) приводит к серьёзным трудностям. Поэтому, представляется полезным разработать технику построения таких решений без использования преобразований Лапласа.

Рассмотрим решение задачи (4.1). Введем дополнительную автомодельную переменную, с началом отсчёта на границе тела – $\zeta = (r-1)/2\sqrt{t}$. Число независимых переменных задачи при этом увеличится $(r, t) \rightarrow (r, t, \zeta)$, однако в новом наборе явно разделенными окажутся пространственная переменная r , временная переменная t и переменная пограничного слоя ζ . Решение исходной задачи будем искать в виде ряда

$$U = \sum t^{an} h_n(r) H_n(\zeta) \quad (5.1)$$

где $H_n(\zeta)$ – собственный набор функций, учитывающий экспоненциальное затухание.

Учитывая, что кратные интегралы вероятности удовлетворяют уравнению $y_n'' + 2\zeta y_n' - 2ny_{n+2} = 0$ [8], функции H_n удобно выбрать в виде

$$H(z) = i^n \operatorname{erfc} z \quad (5.2)$$

Такой выбор функций $H_n(\zeta)$ будет отвечать за экспоненциальное затухание скорости на бесконечности, что позволяет автоматически удовлетворить начальному условию и граничному условию на бесконечности. Тогда, из представления (5.1) и выражения для h_0 следует, что h_n должны удовлетворять следующим граничным условиям

$$h_0|_{r=1} = 1, \quad h_n|_{r=1} = 0, \quad n = 1, 2, \dots$$

Подстановка представления (5.1) в уравнение (4.1) дает рекуррентные уравнения для функций $h_n(r)$

$$\frac{h_0}{2r} + h_0' = 0 \rightarrow h_0 = \frac{h_{0,0}}{\sqrt{r}}, \quad h_{0,0} = \text{const}.$$

$$2r \cdot h_{n+1}' + h_{n+1} = 2r \cdot h_n'' + 2h_n' \quad (5.3)$$

Анализ рекуррентных уравнений (5.3) показывает, что его решениями будут полиномы полуцелых степеней $r^{m/2}$, где показатель m будет принимать нечетные значения, причем каждая последующая функция h_n должна содержать на одно слагаемой больше, чем предыдущая. Тогда имеем

$$h_n = \frac{1}{\sqrt{r}} \sum_{k=0}^n h_{n,k} r^{-k} \quad (5.4)$$

где постоянные $h_{n,k}$ определяются из рекуррентных соотношений

$$h_{0,0} = 1, \quad h_{n,k} = -\left(k - 1 + \frac{1}{4k}\right)h_{n-1,k-1}, \quad k = \overline{1, n}; \quad h_{n,0} = -\sum_{k=1}^n h_{n,k} \quad (5.5)$$

Последнее из отношений (5.5) следует из граничных условий на теле. Окончательно решение задачи (4.1) записывается в виде

$$U = \frac{1}{\sqrt{r}} \sum_{n=0}^{\infty} t^{n/2} i^n \operatorname{erfc}(\zeta) \sum_{k=0}^n h_{n,k} r^{-k} \quad (5.6)$$

Разложение (5.6) имеет вид временного ряда, полностью совпадающего с разложением, полученным с использованием преобразований Лапласа.

6. Течения стратифицированной жидкости, вызванные продольным движением наклонного цилиндра. Сравнение с плоскостью. Задача формирования течения вызванного продольным движением наклонного цилиндра рассматривается аналогично всем вышеописанным задачам. Модель течения жидкости расширяется за счет эффектов стратификации. Цилиндр радиуса R с образующей параллельной оси ξ начинает в момент времени $t = 0$ движение вдоль образующей с постоянной скоростью.

Стратифицированная жидкость без диффузии. Цилиндр. Используя свойства симметрии можно показать, что в приближении Буссинеска в системе координат, связанной с цилиндром, движущимся вдоль оси ξ с постоянной скоростью, компоненты скорости $U_r = 0$ и $U_\varphi = 0$, а все гидродинамические функции от переменных ξ и φ не зависят. В результате оказывается, что рассматриваемая задача является одномерной с полем скорости вида: $\mathbf{V} = U(r, t) \cdot \mathbf{e}_\xi$.

Уравнения стратифицированной жидкости (1.1), в данной задаче примут вид

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right] - gS \sin \alpha, \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} - \frac{1}{\Lambda} U \sin \alpha = 0$$

Обезразмерим задачу, выбрав в качестве параметров обезразмеривания величины $t_0 = R^2 / \nu$, $S_0 = U_0 R^2 \sin \alpha / \nu \Lambda$ и обозначив $c = R^2 N \sin \alpha / \nu$, перепишем уравнения движения

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right] - c^2 S \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = U$$

$$t = 0 : U = S = 0, \quad r = 1 \quad (t > 0) : U = 1, \quad r \rightarrow \infty : U, S \rightarrow 0$$

где $N^2 = g / \Lambda$ – квадрат частоты плавучести.

Используя преобразования Лапласа, приходим к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$pu = u'' + \frac{1}{r}u' + c^2s, \quad ps = u$$

которую можно свести к одному уравнению – уравнению Бесселя мнимого аргумента нулевого порядка

$$r^2u'' + ru' - r^2\tilde{p}u = 0, \quad \tilde{p} = p + \frac{c^2}{p}$$

общее решение которого имеет вид

$$u = C_1 I_0(\sqrt{\tilde{p}r}) + C_2 K_0(\sqrt{\tilde{p}r}).$$

Определяя постоянные интегрирования из граничных условий, получаем

$$u = \frac{1}{p} \frac{K_0(\sqrt{\tilde{p}r})}{K_0(\sqrt{\tilde{p}})} \quad (6.3)$$

Обращая образ Лапласа [9], получаем выражение для скорости в виде двукратного интеграла

$$U = \int_0^t \left(J_0 \left[2c\sqrt{u(t-u)} \right] \int_0^\infty (-\alpha) \cdot e^{-\alpha^2 u} F_0(\alpha, r) d\alpha \right) du \quad (6.4)$$

Численное интегрирование выражения (6.4) связано с рядом математических трудностей, поэтому далее свойства решения задачи (6.2) исследовались с помощью временных рядов.

Ищем решение в виде разложений

$$U = \sum_{n=0}^{\frac{n}{2}} t^{\frac{n}{2}} h_n(r) f_n(\zeta), \quad S = \sum_{n=0}^{\frac{n+2}{2}} t^{\frac{n+2}{2}} \sigma_n(r) \gamma_n(\zeta), \quad (6.5)$$

Подставляя разложения в уравнения и собирая коэффициенты при одинаковых степенях t , а также учитывая определение и рекуррентные соотношения кратных интегралов вероятности, получаем $f_n = y_n$, $\gamma_n = y_{n+2}$,

где $y_n = i^n \operatorname{erfc}(\zeta)$. Тогда второе уравнение системы дает

$$\sigma_n = 4h_n$$

а первое уравнение принимает вид

$$y_{n-1} t^{\frac{n-1}{2}} \left(h'_n + \frac{1}{2r} h_n \right) = t^{\frac{n}{2}} y_n \left(h''_n + \frac{1}{r} h'_n \right) - 4c^2 t^{\frac{n+2}{2}} y_{n+2} h_n$$

Приводя последнее уравнение к суммированию по одинаковым степеням t , получаем рекуррентное дифференциальное уравнение относительно h_n

$$r h'_n + \frac{1}{2} h_n = r h''_{n-1} + h'_{n-1} - 4rc^2 h_{n-3}$$

С граничными условиями

$$h_0(1) = 1, \quad h_n(1) = 0$$

Последовательное решение рекуррентных уравнений для начальных значений номеров n позволяет определить общую форму функций β_n ($h_n = \beta_n / \sqrt{r}$),

заменяя $n \rightarrow 3n + m$, $m = 0, 1, 2$ и решить рекуррентные уравнения

$$\beta'_n = \beta''_{n-1} + \frac{1}{4r^2} \beta_{n-1} - 4c^2 \beta_{n-3} \quad (6.6)$$

представляя функции β_n в виде полиномов

$$\beta_n = \sum_{k=-[n/3]}^n \beta_{n,k} r^{-k} \quad (6.7)$$

где $[n]$ обозначает операцию взятия целой части n , а начальные значения коэффициентов функций (6.7) имеют вид

$$\beta_{00}^1 = 1, \beta_{10}^1 = \frac{1}{4}, \beta_{11}^1 = -\frac{1}{4}, \beta_{20}^1 = -\frac{7}{32}, \beta_{21}^1 = -\frac{2}{32}, \beta_{22}^1 = \frac{9}{32}$$

$$\beta_{00}^2 = 0, \beta_{10}^2 = 0, \beta_{20}^2 = 0$$

Решение рекуррентных уравнений (6.6) для $n \geq 3$. Собирая коэффициенты при неотрицательных степенях r , приходим к рекуррентным соотношениям

1.1. $n \rightarrow 3n$

$$k = \overline{1, n-2}: k\beta_{3n,k}^2 = (k+1)k\beta_{3n-1,k+1}^2 + \frac{1}{4}\beta_{3n-1,k+1}^2 - 4c^2\beta_{3(n-1),k-1}^2$$

$$k = \overline{n-1, n}: k\beta_{3n,k}^2 = -4c^2\beta_{3(n-1),k-1}^2$$

2.1. $n \rightarrow 3n + m$, $m = 1, 2$

$$k = \overline{1, n-1}: k\beta_{3n+m,k}^2 = (k+1)k\beta_{3n+m-1,k+1}^2 + \frac{1}{4}\beta_{3n+m-1,k+1}^2 - 4c^2\beta_{3(n-1)+m,k-1}^2$$

$$k = n: n\beta_{3n+m,n}^2 = -4c^2\beta_{3(n-1)+m,n-1}^2$$

Собирая коэффициенты при отрицательных степенях r , приходим к рекуррентным соотношениям

1.2. $n \rightarrow 3n$

$$\text{при } r^{-1}: 0 = \frac{1}{4}\beta_{3n-1,1}^2 - 4c^2\beta_{3(n-1),1}^1$$

$n = 1$:

$$k = 1: -\beta_{3,1}^1 = \frac{1}{4}\beta_{2,0}^2, \quad k = 2, 3: -k\beta_{3,k}^1 = \left[(k-1)k + \frac{1}{4} \right] \beta_{3n-1,k-1}^1$$

$n > 1$:

$$k = 1: -\beta_{3n,1}^1 = \frac{1}{4}\beta_{3n-1,0}^2 - 4c^2\beta_{3(n-1),2}^1$$

$$k = \overline{2, 3(n-1)-1}: -k\beta_{3n,k}^1 = \left[(k-1)k + \frac{1}{4} \right] \beta_{3n-1,k-1}^1 - 4c^2\beta_{3(n-1),k+1}^1$$

$$k = \overline{3(n-1), 3n}: -k\beta_{3n,k}^1 = \left[(k-1)k + \frac{1}{4} \right] \beta_{3n-1,k-1}^1$$

2.2. $n \rightarrow 3n + m$, $m = 1, 2$

$$\begin{aligned} \text{при } r^{-1}: 0 &= \frac{1}{4}\beta_{3n+m-1,1}^2 - 4c^2\beta_{3(n-1)+m,1}^1 \\ k=1: -\beta_{3n+m,1}^1 &= \frac{1}{4}\beta_{3n+m-1,0}^2 - 4c^2\beta_{3(n-1)+m,2}^1 \\ k = \overline{2, 3(n-1)+m-1}: -k\beta_{3n+m,k}^1 &= \left[(k-1)k + \frac{1}{4} \right] \beta_{3n+m-1,k-1}^1 - 4c^2\beta_{3(n-1)+m,k+1}^1 \\ k = \overline{3(n-1)+m, 3n+m}: -k\beta_{3n+m,k}^1 &= \left[(k-1)k + \frac{1}{4} \right] \beta_{3n+m-1,k-1}^1 \end{aligned}$$

Рекуррентные соотношения, следующие из граничных условий, имеют вид

$$\beta_{3n+m,0} = - \sum_{k=-n, n \neq 0}^{3n+m} \beta_{3n+m,k}$$

В результате все коэффициенты $\beta_{n,k}$ оказываются связанными рекуррентными соотношениями с начальными коэффициентами ряда.

Окончательно решение задачи (6.2) записывается в форме

$$U = \sum_{n=0}^{\infty} t^{\frac{n}{2}} h_n(r) i^n \operatorname{erfc}(\zeta), \quad S = \sum_{n=0}^{\infty} t^{\frac{n+2}{2}} \sigma_n(r) i^{n+2} \operatorname{erfc}(\zeta), \quad (6.8)$$

$$\sigma_n = 4h_n, \quad h_n = \frac{1}{\sqrt{r}} \sum_{k=-[n/3]}^n \beta_{n,k} r^{-k} \quad (6.9)$$

В целом можно отметить, что решение задачи формирования течения, вызванного движением наклонного цилиндра, отличается от решения аналогичной задачи для плоскости лишь дополнительным пространственным затуханием. Поэтому далее детально анализируется течение, возникающее в результате движения плоскости, при этом отдельно отмечены особенности, вносимые различием геометрии течения.

7. Стратифицированная жидкость без диффузии. Плоскость. Точное решение задачи о движении плоскости в стратифицированной жидкости приведено в работах [10, 11]. В безразмерных переменных решение задачи формирования течения для скорости имеет вид

$$U = \int_0^t J_0(2c\sqrt{\tau(t-\tau)}) \frac{\eta}{2\sqrt{\pi\tau^3}} \exp(-\eta^2/4\tau) d\tau \quad (7.1)$$

Последнюю формулу удобно переписать, проинтегрировав выражение (7.1) один раз по частям

$$U = \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta}{2\sqrt{t}}\right) + c \int_0^t J_1(2c\sqrt{\tau(t-\tau)}) \frac{t-2\tau}{\sqrt{\tau(t-\tau)}} \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta}{2\sqrt{\tau}}\right) d\tau, \quad (7.2)$$

что позволяет явным образом выделить член, отвечающий за вязкое вовлечение однородной жидкости в движение (первое слагаемое).

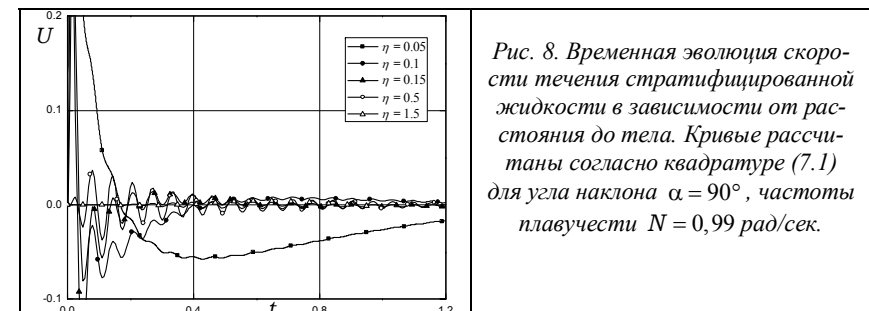
В отличие от выражения (2.2) для скорости в однородной жидкости формула

(7.2) сочетает в себе факторы различной физической природы. Функция ошибок, отвечающая за вязкое вовлечение жидкости (третий множитель в интеграле (7.2)), дополняется функцией Бесселя, отражающей упругие свойства стратифицированной среды.

В силу непрерывности, отличная на границе от нуля скорость будет за счёт вязкого вовлечения приводить к движению жидкости и в некоторой окрестности тела, что, в свою очередь, породит нестационарное возмущение солёности. По мере удаления от границы и уменьшения сил вязкого вовлечения доминирующими оказываются силы плавучести, вызванные возмущениями солёности, что оказывает обратное влияние на эволюцию скорости, приводя к появлению противотечений на некотором удалении от плоскости. Возникший сдвиг скорости действует в сторону уменьшения сил плавучести, однако возмущения солёности по инерции меняют знак на противоположный, меняя знак сил плавучести. Кроме того, следует учитывать пространственно-временной характер развития картины течения.

В результате, в монотонное поле пространственного распределения скорости однородной жидкости эффекты плавучести вносят искажение и меняют его на полосчатую структуру поля стратифицированного течения с чередующимися направлениями струй (Рис. 8). Стационарный режим течения при этом оказывается неосуществим. Если движение границы происходит с постоянной скоростью, то наиболее критической оказывается область в непосредственной окрестности тела, где вовлечённая в движение жидкость с течением времени всё дальше оказывается от горизонта нейтральной плавучести, вызывая всё возрастающую возвратную силу (Рис. 8). Этот факт приводит к росту градиентов концентрации примеси, что, в конце концов, делает вклад эффектов диффузии сравнимым с вкладами других физических факторов, даже, несмотря на чрезвычайно малое значение кинетического коэффициента.

Проведённые расчёты временной эволюции течения позволили выделить два характерных типа поведения скорости в зависимости от расстояния до плоскости. На малых расстояниях первоначально сильное вязкое вовлечение жидкости в движение, сменяется столь же сильной возвратной реакцией сил плавучести, в результате чего происходит смена направления скорости и возникновение противотечений большой амплитуды. Следующие смены периодов доминирования сил плавучести и вязкости приводят к постепенной адаптации среды к внесённым возмущениям (Рис. 8).



В тоже время на больших расстояниях возмущения заметной амплитуды приходят спустя некоторое время после старта, причём их величина примерно на порядок меньше, чем в области малых расстояний. Максимум амплитуды колебаний наступает тем позже, чем дальше находится выбранная точка наблюдений. После достижения максимального значения амплитуда колебаний медленно затухает со временем.

Диссипативные свойства среды своеобразно сочетаются с волновыми свойствами стратифицированной среды. Если первые отвечают за способ передачи возмущения, то вторые придают движению колебательный характер. В данном случае возмущения распространяются бесконечно быстро, колебания частиц среды происходят синфазно во всём пространстве (Рис. 8), а с конечной скоростью распространяется только максимум возмущений.

В целом можно отметить, что вычисление интегралов (7.1) и (7.2) предъявляет повышенные требования к точности расчётов быстроменяющихся и высокочастотных функций, особенно на начальных стадиях развития течения. Поэтому возможности численного нахождения поля скорости течения через квадратуры на малых временах были расширены за счёт использования временных рядов [10], использованием которых позволяет получить решение задачи в виде

$$U = \operatorname{erfc}(\zeta) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (4ct)^{2n} \sum_{m=1}^n P_{m,n} \cdot \zeta^m i^{4n-m} \operatorname{erfc}(\zeta) \quad (7.3)$$

$$P_{0,0} = 1, \quad P_{n,n} = \frac{1}{2^n n!}, \quad P_{n,1} = P_{n,2}, \quad (7.4)$$

$$2(n-m)P_{n,n-m} = (n-m+1)(n-m)P_{n,n-m+1} + P_{n-1,n-m-1},$$

$$m = \overline{1, n-2}, \quad n = 3, 4 \dots$$

здесь $\zeta = \eta / 2\sqrt{t}$.

В выражении для скорости (7.3), как и ранее в (7.2), отдельно выделены вклады чисто вязкого вовлечения жидкости (первый член в фигурных скобках) и реакции на возмущение стратифицированной среды.

8. Стратифицированная жидкость с диффузией. Сравнение с плоскостью.

Расчет скорости течения по двукратному интегралу (6.4) в случае движущегося в стратифицированной жидкости цилиндра связан со значительными вычислительными трудностями. Поэтому, решение задачи формирования течения представленное в форме временных рядов сопоставляется с решением стационарной задачи. Отметим, что стационарные решения для плоскости и цилиндра, подробно рассмотренные в размерных переменных в работах [10, 11], здесь приведены в безразмерном виде.

Стационарное решение. Плоскость. Решение приближается к стационарному при переходе к большим временам, существенно превышающих диффузионные, когда эффектами диффузии пренебречь уже нельзя. Полагая все временные производные равными нулю, запишем систему уравнений

$$0 = \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} - c^2 S, \quad 0 = \varepsilon \frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2} + U \quad (8.1)$$

где $\varepsilon = \kappa / \nu$, κ – коэффициент диффузии соли.

$$\text{Граничные условия: } U|_{\eta=0} = 1, \quad \frac{\partial S}{\partial \eta}|_{\eta=0} = 0.$$

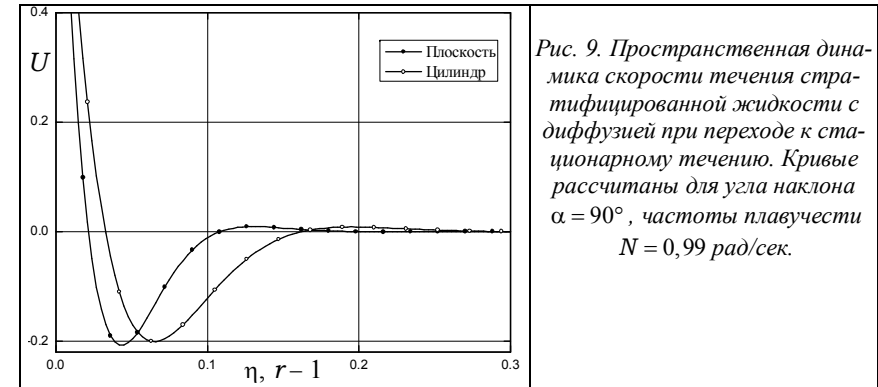


Рис. 9. Пространственная динамика скорости течения стратифицированной жидкости с диффузией при переходе к стационарному течению. Кривые рассчитаны для угла наклона $\alpha = 90^\circ$, частоты плаучести $N = 0,99$ рад/сек.

Опуская детали вычислений, приведем окончательный вид решения стационарной задачи

$$U = \exp(-\chi\eta) [\cos \chi\eta - \sin \chi\eta] = \sqrt{2} \exp(-\chi\eta) \cos(\chi\eta + \pi/4) \quad (8.2)$$

$$S = 2\chi^2 \exp(-\chi\eta) [\cos \chi\eta + \sin \chi\eta] = \sqrt{8}\chi^2 \exp(-\chi\eta) \cos(\chi\eta - \pi/4)$$

где $\chi = (c^2/4\varepsilon)^{1/4}$.

Стационарное решение. Цилиндр. В предельном случае $t \rightarrow \infty$ система определяющих уравнений принимает вид аналогичный системе (8.1) для плоскости

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\right) U - c^2 S = 0, \quad \varepsilon \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\right) S + U = 0 \quad (8.3)$$

$$\text{Граничные условия: } U|_{r=1} = 1, \quad \frac{\partial S}{\partial r}|_{r=1} = 0.$$

Решение этой системы, рассмотренное в [10], приведёт к хорошо известным функциям Бесселя комплексного аргумента – функциям Кельвина нулевого индекса [7]. Выбирая функции затухающие на бесконечности и подставляя общее решение в граничные условия, получаем решение стационарной задачи для цилиндрической геометрии

$$U = \frac{\ker'(\beta)\ker(\beta r) + \text{kei}'(\beta)\text{kei}(\beta r)}{\ker'(\beta)\ker(\beta) + \text{kei}'(\beta)\text{kei}(\beta)}, \quad s' = \beta^2 \frac{\text{kei}'(\beta)\ker(\beta r) - \ker'(\beta)\text{kei}(\beta r)}{\ker'(\beta)\ker(\beta) + \text{kei}'(\beta)\text{kei}(\beta)} \quad (8.4)$$

где $\beta = \chi\sqrt{2}$.

Сравнение с плоскостью. Поведение решения (8.4) от стационарного решения для плоскости (8.2) отличается только несколько более слабым пространственным

затуханием с чуть меньшей амплитудой и небольшим смещением фазы в положительном направлении оси абсцисс. Графическое изображение зависимостей скорости для плоскости и цилиндра представлены на Рис. 9.

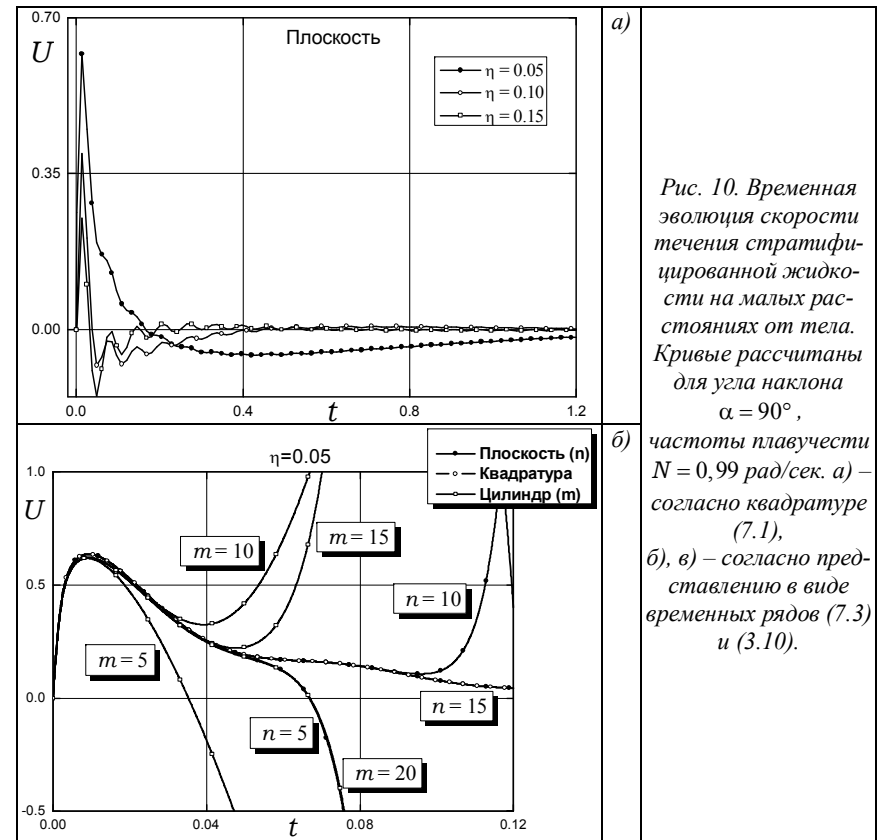


Рис. 10. Временная эволюция скорости течения стратифицированной жидкости на малых расстояниях от тела. Кривые рассчитаны для угла наклона $\alpha = 90^\circ$, частоты плавучести $N = 0,99$ рад/сек. а) – согласно квадратуре (7.1), б), в) – согласно представлению в виде временных рядов (7.3) и (3.10).

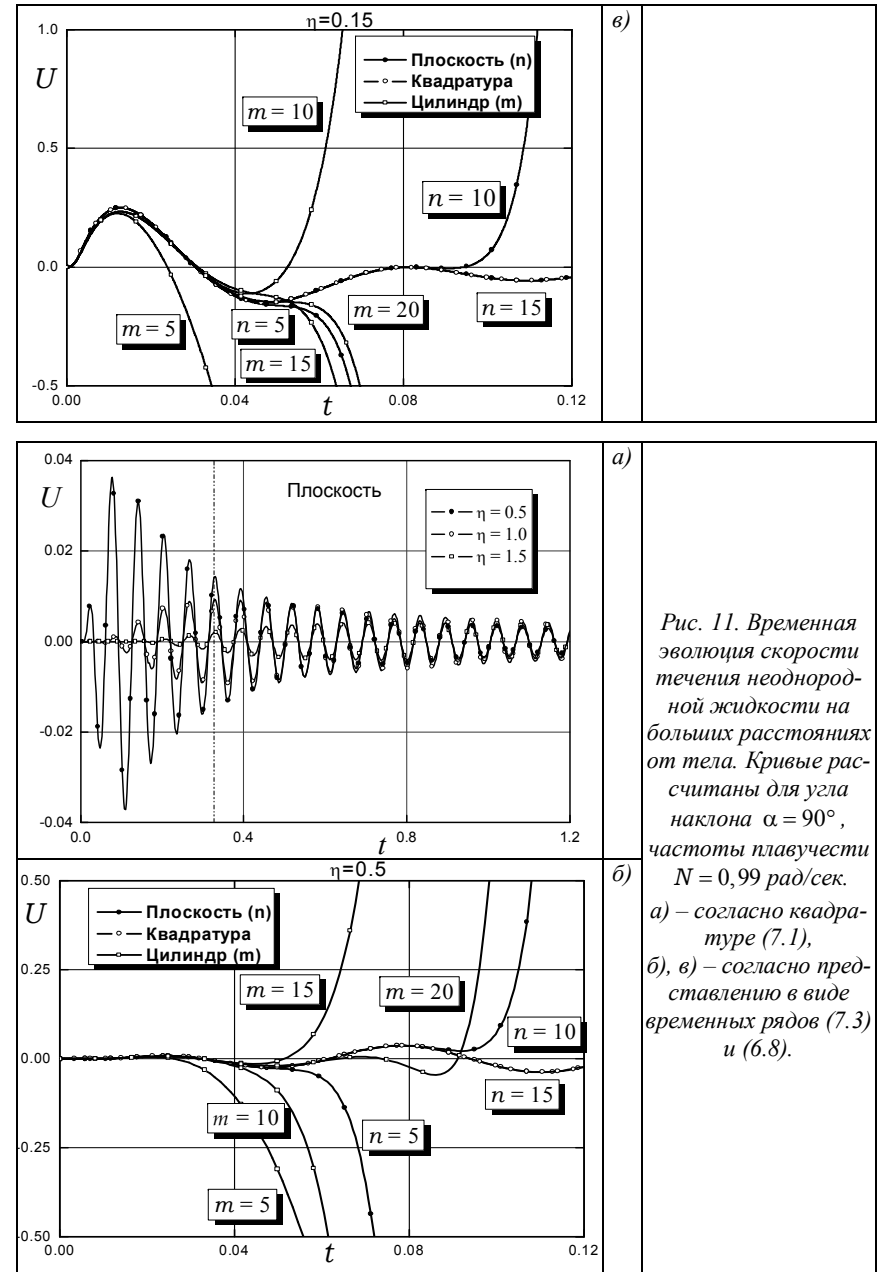
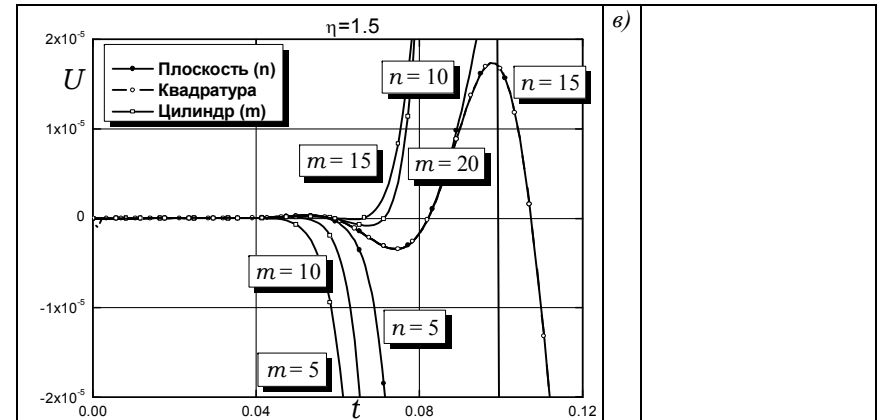


Рис. 11. Временная эволюция скорости течения неоднородной жидкости на больших расстояниях от тела. Кривые рассчитаны для угла наклона $\alpha = 90^\circ$, частоты плавучести $N = 0,99$ рад/сек. а) – согласно квадратуре (7.1), б), в) – согласно представлению в виде временных рядов (7.3) и (6.8).



В предельном случае $t \rightarrow \infty$, пространственную структуру стационарных решений определяет комбинационный масштаб длины $l_c = (4\nu_k / N^2 \sin^2 \alpha)^{1/4}$, равный среднему геометрическому из вязкого и диффузного масштабов длины. Масштабы такого типа характерны для многих видов стационарных течений стратифицированной жидкости [12 – 14].

В силу большого сходства между стационарными решениями для плоскости и цилиндра в стратифицированной жидкости с диффузией (Рис. 9) можно предположить, что решения задач формирования течения также будут близки, и решение задачи о течении, порождаемом движением цилиндра, записанное в виде временных рядов, должно быть сопоставимым с точным решением для плоскости записанном в виде квадратуры в стратифицированной среде без диффузии. Такая гипотеза даёт возможность определить границы применимости рассматриваемого разложения и число членов ряда, необходимых для получения решения близкого к точному на конкретных расстояниях и временах (Рис. 10 (б, в) и 11 (б, в)).

Заключение. В рамках системы вложенных моделей (однородная и стратифицированная вязкая жидкость) изучены течения, вызываемые движением плоскости, вращением и продольным движением кругового цилиндра. Трансформация свойств решений исследована при последовательном переходе от модели однородной жидкости к стратифицированной в отсутствие диффузии. Изучена структурная устойчивость течений по отношению к малому параметру стратификации. Проанализирована равномерность двойных предельных переходов $r \rightarrow \infty$, $t \rightarrow \infty$. Важно отметить, что, несмотря на малую величину параметров, отвечающих за эффекты стратификации и вязкости, их влияние на формирование течений существенно зависит от положения точки наблюдения и времени, прошедшего с момента начала движения. При больших временах ($t \rightarrow \infty$) они оказывают существенное влияние на характер течения.

Разработан метод решения задач формирования течений вблизи кругового цилиндра погруженного в вязкую стратифицированную жидкость. *Определены границы его применимости.*

Применительно к рассматриваемым моделям исследованы точные решения, в виде квадратур, и асимптотические решения, в виде временных рядов, начально-краевой задачи, построенных с использованием преобразования Лапласа. Найдено количество членов ряда, дающее наилучшее совпадение с точным решением и показаны расстояния и времена, на которых применима данная асимптотическая техника. Проведено сравнение решений модельных задач между собой – плоскость/вращающийся цилиндр/продольно движущийся цилиндр.

Продемонстрировано сходство и подчеркнуто различие в поведении решений задач плоской и цилиндрической геометрии. Показано, что учет диссипации только одного вида (вязкости) не приводит к сглаживанию поля скорости, более того существуют области, где с течением времени сдвиг скорости неограниченно нарастает.

Литература

1. *Байдулов В.Г., Васильев М.П.* Формирование тонкой структуры слоистых стратифицированных течений // Известия РАН Механика жидкости и газа, 2007, № 6. С. 60 – 77.
2. *Лайтхил Дж.* Волны в жидкостях. М: Мир, 1981. 598 с.
3. *Теодорович Э.В., Городцов В.А.* О некоторых сингулярных решениях уравнений внутренних волн // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1980. Т. 16. № 7. С. 776–779.
4. *Кистович Ю.В., Чашечкин Ю.Д.* Некоторые точно решаемые задачи излучения трёхмерных периодических внутренних волн // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 2. С. 52 – 61.
5. *Scase M.M., Dalziel S.B.* Internal wave fields and drag generated by a translating body in a stratified fluid // J. Fluid Mech. 2004. V. 498. P. 289 – 313.
6. *Байдулов В.Г., Миткин В.В., Чашечкин Ю.Д.* Формирование течения при начале движения горизонтального цилиндра в непрерывно стратифицированной жидкости // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35. № 6. С. 821 – 828.
7. *Слэзкин Н.А.* Динамика вязкой несжимаемой жидкости. – М.: ГИТТЛ, 1955. 519 с.
8. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. / Под ред. М. Абрамовица, И. Стигана. М.: Наука. 1979. С. 830
9. *Бейтмен Г., Эрдейи А.* Таблицы интегральных преобразований. Том 1. Преобразования Фурье, Лапласа, Меллина. М.: Наука. 1969. 343 с.
10. *Байдулов В.Г.* Теория формирования течений в несжимаемой линейно стратифицированной жидкости // в сборнике “Физические проблемы экологии (Экологическая физика)” №17, 2011. С. 14 – 36.
11. *Байдулов В.Г., Васильев М.П.* Формирование тонкой структуры слоистых стратифицированных течений // Известия РАН Механика жидкости и газа. 2007. № 6. С. 60 – 77.

12. *Linden P.F., Weber J.E.* The formation of layer in a double diffusive system with sloping boundary // J. Fluid Mech. 1977. V. 81. № 4. P. 757 – 773.
13. *Phillips O.M.* On flows induced by diffusion in a stably stratified fluid. // Deep-Sea Res. 1970. V. 17. № 3. P. 435 – 443.
14. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика. М.: Изд-во Иностран. Лит. 1949. 520 с.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АПВЕЛЛИНГА И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ СТРУИ В СИСТЕМЕ ТЕЧЕНИЙ

Барбанова Е.С., Самолюбов Б.И.

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований эволюции системы течений, включающей потоки, вызванные речным стоком, апвеллинг, волновые течения сейшевой природы и плотностные потоки в Волховской губе Ладожского озера. Обнаружено, что в придонном слое преобладал прибрежный апвеллинг. Установлено, что апвеллинг обеспечивал очищение вод губы при умеренном ветре. Выявлена блокировка затопленной струи речных вод апвеллингом. Показано, что в ходе этого процесса происходил подъем струи и её углощение при росте скорости и высоты придонного потока. Предложена версия математической модели обнаруженной системы течений, замкнутая с применением полуэмпирических выражений высоты апвеллинга, траектории и толщины струи.

Введение

Роль течений, обусловленных апвеллингом, в динамике озер и морей не ограничивается подъемом глубинных вод [1, 2, 7, 8]. При наличии движений вод иной природы влияние апвеллинговых потоков приводит к формированию систем стратифицированных течений, прогноз развития которых возможен лишь с учетом их взаимодействия. Изучение таких явлений направлено на решение как фундаментальных, так и прикладных задач, поскольку подобные системы течений могут существенно влиять на распределения примесей в водоемах и на развитие водных экосистем. Под системой стратифицированных течений понимается совокупность течений, развивающихся на различных глубинах от поверхности до дна и взаимодействующих между собой.

В настоящей работе приведены и сопоставлены с теоретическими распределения параметров течений и состава воды по глубине и во времени, измеренные в натуральных условиях. Рассмотрены выявленные закономерности пространственно-временных преобразований профилей этих характеристик. Анализируемые результаты, по которым проверяются методы математического моделирования течений и переноса примесей, получены в комплексных измерениях скорости течения, температуры воды, концентраций взвеси и растворенных солей и состава воды в Волховской губе Ладожского озера 13-18 августа 2011 года [3]. Исследования проводились с применением многопараметрического зонда RCM-9 (Aanderaa) и других измерителей указанных параметров. Выполнялась плановая съемка по всей акватории юго-восточной части залива (по 16 вертикалям) и проводились

многочасовые серии комплексных последовательных зондирований на двух суточных станциях.

1. Структуры полей скорости, температуры, концентраций взвеси и растворенных солей

Распределения температуры воды и концентраций взвеси на разрезе от отхода из губы в открытое озеро до приустьевой зоны р. Волхов имеют вид, типичный для прибрежного апвеллинга. К характерным элементам относятся а) подъем более прозрачных и холодных озерных вод вверх по склону, б) изотермы фронтальной формы в головной части апвеллинга.

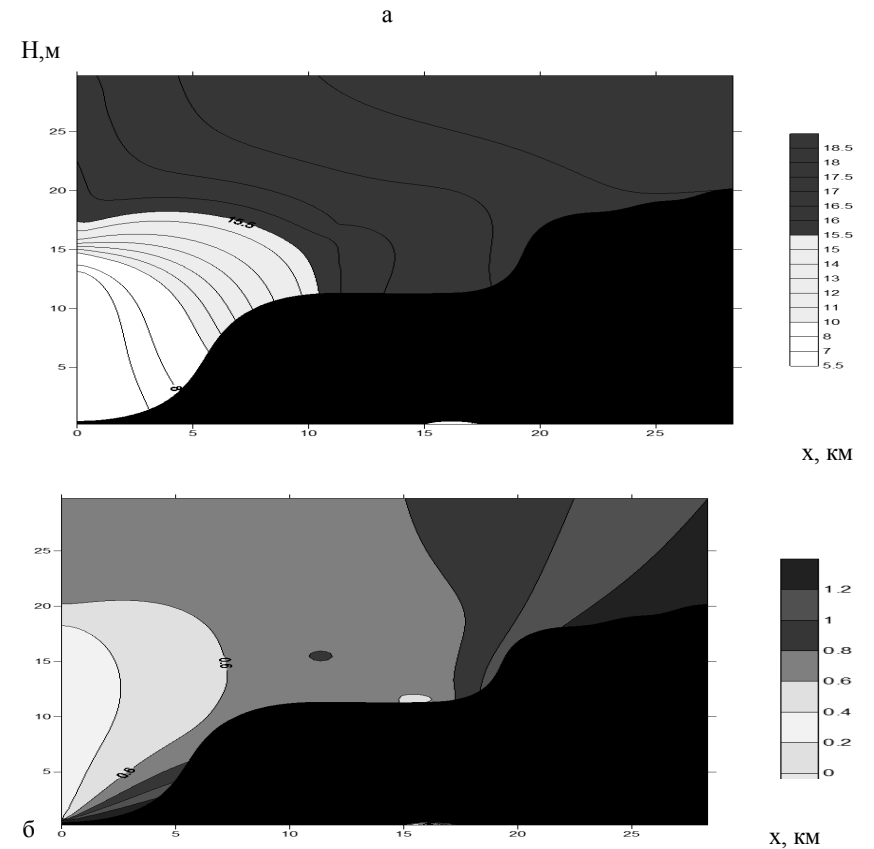


Рис.1. Распределения а - температуры воды $T^{\circ}\text{C}$ и б - концентрации взвеси S (NTU) по глубине и вдоль по разрезе от выхода из губы в открытое озеро до приустьевой зоны р. Волхов (Волховская губа оз. Ладожского, август 2011).

Концентрация взвеси убывает по мере удаления от зоны впадения речного потока в залив и снижается почти на порядок в апвеллинге. Причем изолинии

концентрации хорошо согласуются с контурами фронтальной части апвеллинга, четко выраженной на распределении температуры воды.

Профиль скорости течения U на начальном участке формирования затопленной струи вод р. Волхов (рис. 2) содержит явно выраженный максимум (на глубинах от 3 до 7 метров), в зоне сформировавшейся струи видно ее утолщение, а в области её затухания – резкое ослабление. Эволюция апвеллинга (в слое толщиной до 2 м на профилях скорости) происходит значительно более плавно.

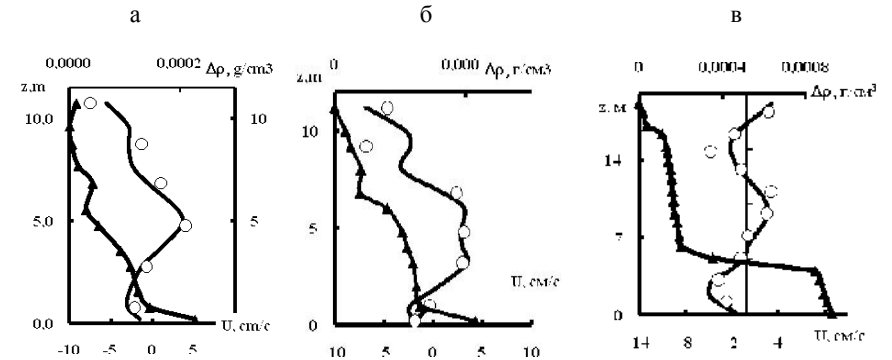


Рис.2 Профили скорости U и изменения плотности с глубиной $\Delta\rho$ а - на начальном участке формирования затопленной струи вод р. Волхов б - в зоне сформировавшейся струи и в - в области её затухания (Волховская губа оз. Ладожского, август 2011).

Это следует и из распределений, приведенных на рис.1, где заметны незначительные изменения положения верхней границы апвеллинга над уровнем дна. По рис.2 также может быть сделан вывод о том, что струя скользит по верхней границе апвеллинга, повторяя его форму. Числа Ричардсона для струи и апвеллинга (для профилей, приведенных на рис. 2,) составляют: а) $Ri_j=0,4$ (струя), $Ri_u=3,3$ (апвеллинг), б) $Ri_j=3$, $Ri_u=1,5$ и в) $Ri_j=25$ $Ri_u=23$. Число Ричардсона для струи увеличивается по мере продвижения из озера в губу. Для апвеллинга число Ричардсона в случае, который иллюстрируется на рис. 2 б, ниже чем на предшествующей и последующей вертикалях, так как этот график соответствует течению на участке с нулевым уклоном дна.

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. Первая серия зондирований выполнялась 15.08.2011 г. в точке с глубиной 18 м. На фоне возмущений вихреволновой природы в поле скорости течения (рис 3б) наблюдается доминирующее 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. 3 б). 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

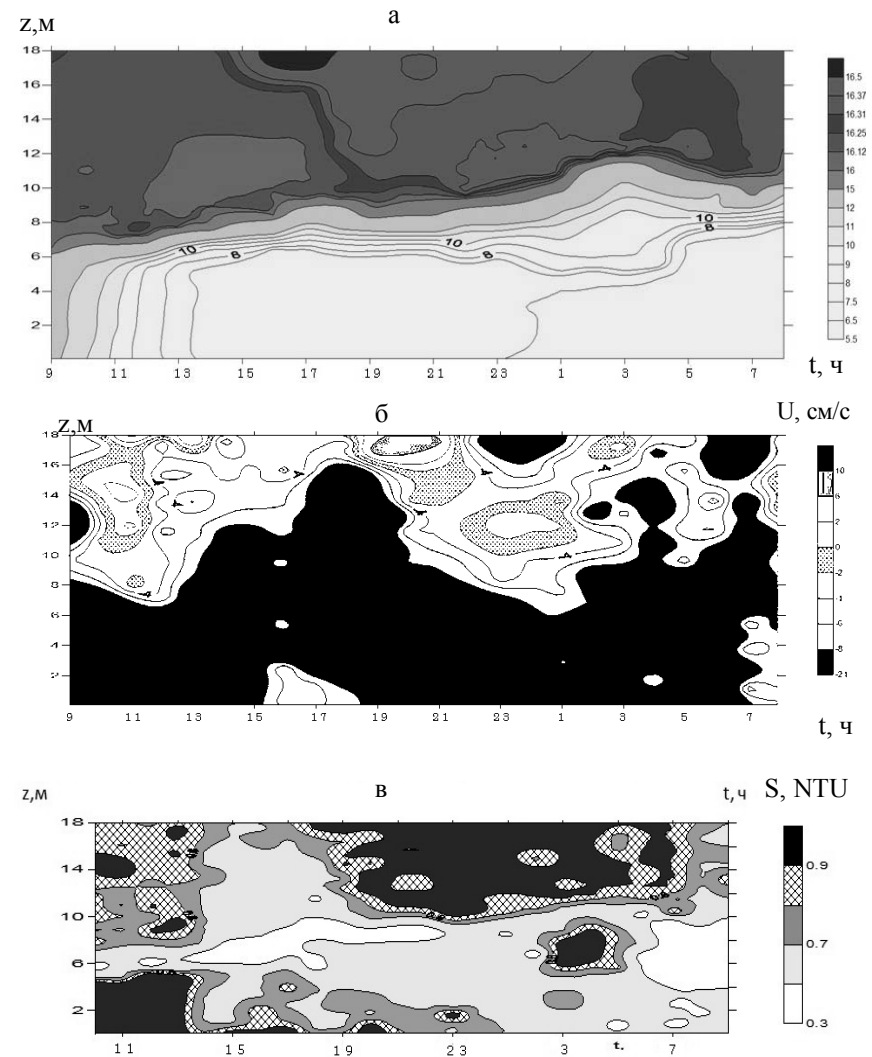


Рис.3 Эволюция распределений по глубине и во времени а - температуры воды $T^{\circ}\text{C}$, б - скорости течения U cm/s , в - концентрации взвеси S (NTU) ((Волховская губа оз. Ладожского, август 2011).

На залив, подтверждается также и распределением концентрации взвеси (рис 3в). 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 [4]. 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.

Математическая модель апвеллинга и речной струи.

За основу взяты уравнения Рейнольдса в проекциях на горизонтальную и вертикальную оси координат (в приближении гидростатики) и неразрывности:

$$\begin{cases} U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\Delta \rho}{\rho} g^i_s - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} \\ 0 = -\Delta \rho g - \frac{\partial P}{\partial z} \\ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \end{cases}$$

Из этой системы уравнений, после приведенных в работах [5, 6] преобразований, получается 1-мерное уравнение динамики течения

$$\partial_x \bar{U}^2 = g \frac{2\Delta \rho}{\rho} \cdot i_s - \alpha_p \frac{2g}{z_u \rho} \partial_x \left(\frac{\Delta \rho \cdot z_u^2}{2} \right) - g i_{surf} - \frac{C_D \bar{U}^2}{z_u},$$

которое решается с применением следующих выражений уклона поверхности воды i_{surf} из [7], коэффициента сопротивления на границе поток-дно C_D и толщины струи Δz_j из [6], высоты апвеллинга z_u и траектории струи z_{mj} , полученных в ходе данной работы.

$$i_{surf} = \tau_x / \rho g H$$

$$C_D = 2,5 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-4} R i_u$$

$$\Delta z_j = \Delta z_{j0} + 0.4 \cdot \int_0^x i_{sj} dx$$

$$z_u = z_{therm}$$

$$z_{mj} = (z_{mj})_0 \exp \left(U_{upw} / 2 (U_{upw})_0 \right)$$

Входные параметры модели - уклон дна, начальная скорость, скорость ветра и распределение плотности. Выходные параметры - распределение скоро-

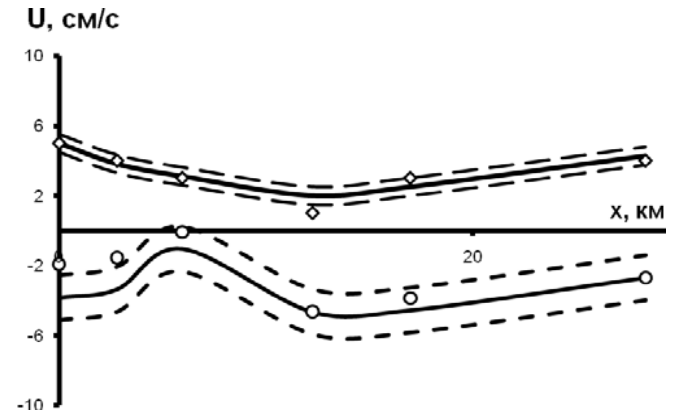


Рис.4. Продольные распределения скоростей затопленной струи речных вод (при $U > 0$) и апвеллинга (при $U < 0$). Кривые - теоретические по предлагаемой модели. Пунктир - границы стандартного отклонения.

сти, высота максимума скорости апвеллинга, толщина струи и ее траектория.

Измеренные значения скоростей струи и апвеллинга удовлетворительно согласуются с теоретическими кривыми (рис. 4).

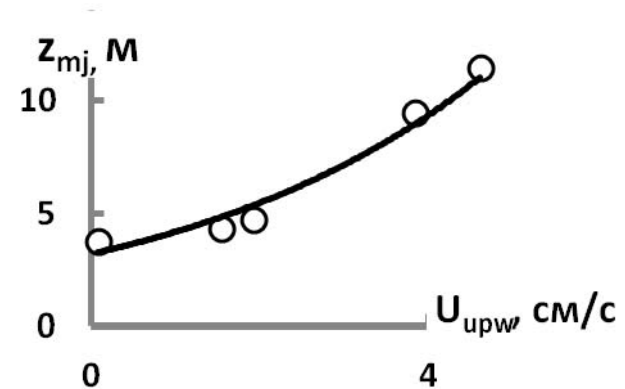


Рис. 5. Зависимость высоты максимума скорости затопленной струи речных вод от скорости апвеллинга. Кривая - теоретическая.

Взаимодействие затопленной стратифицированной струи речных вод с апвеллинговым придонным потоком характеризуется сильным влиянием апвеллинга

на траекторию струи. Как следует из зависимости ординаты максимума скорости струи от скорости апвеллинга (рис. 5), уровень осевой линии экспоненциально повышается при ускорении апвеллинга. Кривая на графике соответствует приведенной выше экспоненциальной зависимости, определяющей связь z_{mj} с U_{upw} .

Заключение

1. Обнаружено, что в придонном слое преобладал апвеллинг в виде холодного потока к верховьям залива.
 2. Выявлена вихреволновая компонента скорости апвеллинга, которая усиливалась за его фронтальной зоной и приводила к появлению прозрачных линз.
 3. Установлено, что зарегистрированный процесс апвеллинга обеспечивал очищение вод губы при умеренном ветре.
 4. Установлено, что апвеллинг приводил к блокировке затопленной струи речных вод, к подъему и к утолщению струи при росте скорости и высоты придонного потока.
 5. Предложена версия математической модели обнаруженной системы течений, замкнутая с применением полуэмпирических выражений высоты апвеллинга, траектории и толщины струи.
- Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (11-05-01146).

Список литературы

1. Астраханцев Г.П., Менишуткин В.В., Петрова Н.А. Руховец Л.А. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. Наука. СПб. 2003. 362 с.
2. Авилкин И.А., Самолубов Б.И., Иванова И.Н., Будников А.А., Барбанова Е.С. Эволюция структур полей течений и концентраций примесей в Волховской губе Ладожского озера. Физические проблемы экологии. М.: МАКС ПРЕСС. 2011. № 18. С. 15–20.
3. Голенко М. Н.. Структурные особенности апвеллинга в Юго-Восточной Балтики // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2009. Вып. 1. С. 35—42.
4. 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.
5. Самолубов Б.И. Придонные стратифицированные течения // М. «Научный мир», 1999. 464с.
6. Самолубов Б. И. Плотностные течения и диффузия примесей. М.: Изд. ЛКИ. (УРСС). 2007. 352 с.
7. R.W. Garvine A Simple model of coastal upwelling dynamics // Journ. Phys. Oceanogr. 1971/ V. 1. P.169 – 179.
8. Lorke A., Peeters F., Wuest A. Shear-induced convective mixing in bottom boundary layers on slopes // Limnol. Oceanogr. 2005. 50(5). P. 1612–1619.

УДК 550.3

ОБЪЯСНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ И ЦИКЛИЧНОСТИ ЭНДОГЕННОЙ АКТИВНОСТИ ЗЕМЛИ, ИНВЕРСИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Ю.В. Баркин

*Государственный астрономический институт**им. П.К. Штернберга при МГУ, Москва*e-mail: barkin@inbox.ru

Абстракт. Механизм возбуждения и вынужденной относительной раскачки и поворотов оболочек Земли (других планет и спутников) под действием гравитационного притяжения окружающих небесных тел является мощным источником эндогенной активности с ярко-выраженными циклическими проявлениями в различных шкалах времени. Эндогенная энергия планеты (спутника) черпается из гравитационного воздействия со стороны внешних небесных тел. В конечном итоге из энергии поступательно-вращательных движений всех взаимодействующих тел. Показано, что энергетика данного механизма позволяет объяснить энергетический бюджет Земли и других активных небесных тел. На основе этого механизма уже получили объяснение с механической и энергетической точек зрения многие геодинамические явления и планетарные геофизические процессы, решены фундаментальные проблемы наук о Земле и планетарных наук.

В данной работе на основе указанной геодинамической модели получены оценки мощностей диссипации для вязко-упругих деформаций мантии Земли при заданных относительных смещениях центров масс ядра и мантии. Указанные смещения находят отражение в смещениях центра масс Земли, которые доступны для наблюдений методами космической геодезии. Для выявленного по данным наблюдений спектра колебаний определена мощность диссипации для каждого из колебаний по отдельности и интегральный эффект. Показано, что суммарная мощность диссипации характеризуется исключительно гигантским значением около $10^{14} \div 10^{15}$ Вт и является достаточной для объяснения современной эндогенной активности Земли. При этом получает объяснение дискутируемое веками представление о циклических вариациях активности всех планетарных природных процессов.

В работе обсуждаются и интерпретируются явления инверсии климатических изменений на Земле, их современные проявления. Указанный механизм управляет интегральным тепловым потоком Земли и управляет его перераспределением между полушариями Земли. Аналогичные явления широко наблюдаются на других телах солнечной системы, а явление инверсии активности природных процессов (чередование активности между полушариями) является вернейшим признаком активного действия механизма возбуждения оболочек небесных тел.

1. Введение. Высокоэнергетический механизм эндогенной активности небесных тел, объясняющий циклическую, как геологического развития небесных тел, так и циклическую природных процессов был предложен автором в 1999 –

2002 гт. [2 - 4]. За прошедшее время он получил развитие и широкие приложения, как в науках о Земле, так и в планетных науках [5 - 10], [12 - 22], [24,25]. Главным положением разрабатываемой на основе этого механизма геодинамической модели является то, что в ней указывается источник энергии всех планетарных процессов как на Земле, так и на других небесных телах Солнечной и иных планетных систем. Механизм имеет небесно-механическую природу. Именно гравитационные силы, действующие со стороны внешних небесных тел (Солнца, Луны, планет) возбуждают систему оболочек Земли (ядро твердое, жидкое, мантия, кора, другие слои и оболочки). Эти внешние воздействия обусловлены в первую очередь эксцентричным относительным положением центров масс оболочек и их несферичностью (эллипсоидальностью). Вследствие дифференциального воздействия гравитационного притяжения внешних небесных тел оболочки испытывают малые относительные смещения и деформации [3, 4, 13, 14]. В силу вязкоупругих свойств мантии происходит диссипация энергии, ее преобразование в тепловую энергию. У разных небесных тел эти факторы выражены в различной степени и, соответственно, в разной степени они подвержены воздействию со стороны внешних небесных тел, а их эндогенная активность и природная активность выражены по-разному. Таким образом, эндогенная энергия планеты (спутника) черпается из гравитационного воздействия со стороны внешних небесных тел, в конечном итоге из их поступательно-вращательных движений.

Кроме вопросов энергетики природных процессов на небесных телах, были выполнены широкие исследования явлений, которые присущи действию указанного механизма и являются верными признаками его активного проявления. Среди них широко-распространенные явления цикличности природных процессов, их синхронность и единство, активность полярных регионов на планетах и спутниках, инверсия тектонических и геологических структур и активности природных процессов, явления скачкообразности, пилообразности активности природных процессов, явление упорядоченности в расположении тектонических структур, явление скручивания, их широкая распространенность - универсальность. В первую очередь указанные явления были изучены на Земле и получили динамическую интерпретацию на основе новой геодинамической модели [6, 15, 22]. Указанные явления также были предсказаны на других телах солнечной системы и получили подтверждение в современных исследованиях, в частности при реализации планов современных космических миссий [4, 15-17, 21].

В работе [4] на основе открытого механизма был выполнен сравнительный анализ энергетической активности для планет и, отдельно, для спутников. Среди спутников самым активным является спутник Юпитера Ио с постоянно извергающимися вулканами. Высокая активность спутника Сатурна Титана была предсказана автором в указанной работе в результате анализа особенностей действия механизма гравитационного возбуждения его оболочек. До 2005 г поверхность Титана была скрыта от наблюдателей под мощной атмосферой (по массе она примерно в 10 раз превосходит атмосферу Земли). Тем не менее, высокая активность природных процессов, явления эксцентричности в положении центра масс, геологические особенности спутника, в частности, горные хребты, разломы и трещины, вулканическая деятельность, реки и моря из жидкого метана, планетарная асимметрия в их расположении и в активности атмосферных процессов и др. были четко предсказаны за 2-3 года до прибытия космической экспедиции *Кассини* -

Гюйгенс к Сатурну и Титану в 2005 г. Приведем некоторые цитаты из указанной работы 2002 г.: *“На Титане происходят бурные атмосферные процессы. Природные процессы на Титане также едины, как и на Земле. Они диктуются и направляются одним и тем же механизмом – механизмом раскочки и блужданий оболочек”*; *“Метановый океан Титана, вполне вероятно, представляет собой систему морей, формирование которых было вызвано направленными радиальными смещениями оболочек Титана. Все оболочки Титана, включая океан и атмосферу, глубоко динамически взаимосвязаны и пронизаны едиными ритмами и циклами в своем существовании и эволюции”* и др. (Баркин, 2002; [4], С.72). Уже первые снимки и первые исследования, выполненные этим аппаратом, начиная с 2005 г., полностью и точно подтвердили сделанные предсказания [4, 7].

Аналогичным образом была установлена высокая активность другого спутника Сатурна – Энцелада. *«Механизм раскочки оболочек Энцелада следует рассматривать как основной энергетический источник для его тектонической активности. Этот механизм является ответственным за формирование трещин и разломов на поверхности Энцелада, ледяных вулканов и потоков глобальной протяженности»* (Баркин, 2002; [4], С.70).

И спустя примерно 5 лет после указанной публикации на южном полюсе Энцелада был открыт действующий гейзер (плюм), с выбросами веществ и газов на высоту до 300 км от поверхности спутника. Это является ярким свидетельством его необычайной активности. И многие ученые до сих пор безуспешно бьются над научным обоснованием высокой активности Титана и Энцелада и не находят ни механизма, ни объяснения.

Исследования, выполненные на основе гравитационного механизма возбуждения оболочек, позволили обосновать такие трудные для понимания явления, как активизация природных процессов и геологической, тектонической деятельности в полярных областях планет и спутников [4, 7, 15, 17]. В марте 2011 г. сразу после успешного орбитального маневра и выхода космического аппарата *Messenger* на орбиту вокруг планеты Меркурий я писал в поздравительном письме одному из активных участников и организаторов этой космической миссии Стану Пилу о некоторых явлениях, которые могут быть открыты и изучены аппаратом *Messenger*: *“Pole regions will be extremely nice and active, with dissymmetrical activity (more active Southern hemisphere), more scarps in Southern hemisphere, with big polar regions of underground ice deposits in accordance with my geodynamical model (2002)”* Barkin Yury, 28 March 2011.

Для другой космической миссии НАСА “Рассвет” (“Dawn”) по исследованию крупного астероида Веста (аппарат вышел на орбиту вокруг Весты в июле 2011 г.) мною были высказаны и обоснованы следующие положения, также опирающиеся на геодинамическую модель возбуждения и вынужденных относительных колебаний ее ядра и мантии: *“Динамическими следствиями действия механизма возбуждения оболочек дифференцированного астероида Веста будут являться: планетарная северо-южная асимметрия (как в тектонических структурах, так и процессах), в частности в тепловых потоках в северном и южном полушариях, в расположениях геологических формирований (их концентрация в южном полушарии, подобно концентрации эскарпов в южном полушарии Меркурия), смещение центра масс Весты к северу и ее общая геологическая активность.”* Указанные положения планетодинамики неоднократно докладывались на

секциях по планетным исследованиям на Генеральной ассамблее Европейского Союза по наукам о Земле в Вене, в частности в апреле 2011 г. [16,17], [20, 21] и др. и в настоящее время получили подтверждение по данным указанных космических миссий. Тем самым получила подтверждение сама геодинамическая модель [4, 6].

2. Объяснение энергетики природных процессов. Наиболее важным вопросом, конечно, во все времена истории в науках о Земле был вопрос об источнике энергии [11], который обеспечивает небывалую активность Земли, а сейчас известно, что и многих других небесных тел. Известные энергетические механизмы такие как радиогенное тепло, приливное трение и некоторые другие не в силах объяснить ни общую энергетику, ни цикличность процессов, не говоря уже об указанных выше изысканных планетарных явлениях инверсии, скачкообразности, активности полярных областей и других. В современных исследованиях четко показано, в том числе ведущими специалистами мира, что приливное трение дает исключительно малый вклад в общий наблюдаемый тепловой поток (~ 0.4 TW) через поверхность Земли, который по современным оценкам составляет 46 ± 3 TW, т.е. порядка одного процента. Диссипация приливной энергии на Энцеладе может объяснить только 1 часть из 27 от наблюдаемого теплового потока. Диссипация приливной энергии на спутнике Ио объясняет лишь незначительную часть наблюдаемого теплового потока и эндогенной активности этого спутника [7]. Указанные проблемы решаются с помощью геодинамического гравитационного механизма вынужденной раскачки ядра и мантии Земли [2 - 4]. Эти смещения приводят к смещениям центра масс Земли по отношению к мантии, которые в настоящее время доступны для изучения методами космической геодезии (спутниковыми методами). В настоящее время выявлен широкий спектр колебаний центра масс Земли (Таблица 1, рис. 2) и обнаружен его вековой тренд в северном направлении (в районе полуострова Таймыр, рис. 5) [23, 25]. Последние геодезические явления являются следствиями действия рассматриваемого механизма и были предсказаны автором еще в 1996 г. [5].

С другой стороны по смещениям центра масс Земли удастся восстановить стиль и особенности относительных смещений ядра и мантии Земли, изучить геодинамические следствия этих смещений, таких как деформации мантии, вариации ее упругой энергии, мощности диссипации и формирования теплового потока на планете, других физических полей, перераспределение флюидных масс и др. Эти исследования были выполнены автором, и они фактически решают энергетический вопрос в жизни планет и спутников.

На рис. 1 дается схематическая иллюстрация смещений ρ_c центра масс Земли относительно начального положения вследствие смещения ρ ядра планеты. Ядро имеет избыточную гравитирующую массу $\Delta m_c = 4\pi r_c^3 (\delta_c - \delta_m) / 3$, которая определяет эффекты деформации всех слоев мантии при смещениях ядра. Здесь δ_c и δ_m значения средней плотности ядра и плотности мантии при ее подошве. В данной упрощенной модели вектор смещения центра масс Земли относительно центра масс мантии определяется соотношением $\rho_c = \Delta m_c \rho / m_\oplus$.

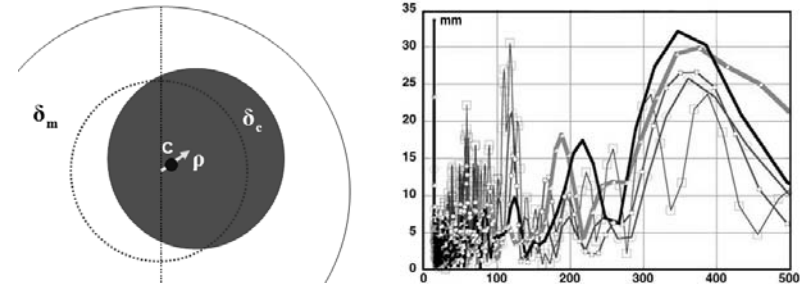


Рис. 1. (слева) Смещения центра масс планеты, вызванные смещением ее ядра.

Рис.2.(справа) Спектр колебаний геоцентра по различным системам спутниковых данных (по работе Gobinddass et al. ,2009 [23]). По оси ординат указаны значения амплитуд колебаний в мм, по оси абсцисс – значения периодов в сутках.

Таблица 1. Расчетные мощности диссипации упругой энергии мантии Земли, соответствующие отдельным полярным колебаниям геоцентра в современную эпоху. Указаны амплитуды колебаний, амплитуды вариаций скоростей колебаний и периоды.

σ	Периоды T_σ (в сутках)	Амплитуды скорости $z_c^{(\sigma)} \omega_\sigma$ (мм/год)	Амплитуды ($z_c^{(\sigma)}$ мм)	D_σ (Вт) 10^{11} Вт
1	2389	9.529	9.92	0.009
2	551	29.11	6.99	0.082
3	358	160.5	25.04	2.497
4	175	70.55	5.38	0.483
5	119	262.3	13.60	6.670
6	107	72.07	3.36	0.503
7	88	161.2	6.18	2.519
8	70	321.3	9.80	10.01
9	59	258.7	6.65	6.488
10	50	257.0	5.60	6.403
11	39	330.1	5.61	5.136
12	38	50.73	0.84	0.250
13	32	103.3	1.44	1.034
14	26	70.61	0.80	0.484
15	21	40.44	0.37	0.159

Были проанализированы энергетические поступления от примерно 15 составляющих спектра колебаний ядра и мантии Земли, которым соответствуют наблюдаемые методами космической геодезии колебания центра масс Земли с амплитудами в несколько сантиметров или долей сантиметров (всего около 15 гармоник) (см. табл. 1), а также от векового тренда [25], [26]. Для анализа мощно-

сти диссипации использовалось решение задачи теории упругости о деформациях мантии под действием гравитационного притяжения смещающегося ядра [3, 13, 14], а также аналитические выражения компонент тензора деформаций и упругой энергии из работы [27].

Каждое из этих движений геоцентра есть отражение относительных смещений ядра и мантии и для каждого из них были рассчитаны упругие энергии и мощности диссипации энергии в мантии. Мощности диссипации для каждого колебания геоцентра по отдельности приведены в последнем столбце таблицы 1 (значения даны в единицах 10^{11} ватт). При расчетах была принята средняя вязкость мантии Земли равная $1.75 \cdot 10^{22}$ Па·с. В 3 и 4 столбцах приведены значения амплитуд вариаций скорости колебания (в мм/год) и самого колебания геоцентра вдоль полярной оси (в мм). Для краткости здесь рассматриваем лишь координату Z , так как полярные колебания геоцентра являются преимущественными, что, кстати сказать, было предсказано еще динамическими исследованиями относительных колебаний ядра и мантии Земли [3, 13]. Суммарная мощность диссипации упругой энергии мантии, вызванная рассматриваемыми колебаниями ядра, уже сама по себе является весьма значительной $D = 0.427 \cdot 10^{13}$ Вт. Однако она является не полной.

В приведенной оценке не учтены короткопериодические колебания ядра (суточные, недельные), на которые указывает спектр колебаний, например на колебание с большой амплитудой 32 мм с полумесячным периодом [23] (рис.2). Эти колебания с недельными и суточными периодами дают весьма большой вклад в диссипацию энергии. Так лишь одно колебание с периодом 13.7 суток дает вклад в мощность диссипации на три порядка больше мощности диссипации от годового колебания D_{an} . Амплитуды этого коротко - периодического колебания и годового весьма значительны и сравнимы друг с другом. Они составляют около 3-3.5 см [23]): $D_{13.7} = 1350 \cdot D_{an} = 3.38 \cdot 10^{14}$ Вт. В будущем еще предстоит получить более полные и точные оценки мощностей диссипации в вязко - упругой мантии вследствие колебаний центра масс Земли (ее ядра и мантии) с короткими (включая часовые) периодами. Ориентировочно, здесь мы оцениваем полную мощность диссипации энергии в $D = 10^{14} \div 10^{15}$ Вт. Эта величина сама по себе весьма грандиозна, но и она, по-видимому, пополняется еще в результате действия механизма разогрева материала мантии и ядра на их границе при формировании плюмов (также вследствие смещений и колебаний оболочек Земли), а также вследствие деформаций, вызванных относительными поворотами оболочек Земли и скручиванием слоев мантии и ядра. Последние из указанных явлений также являются геодинамическими следствиями механизма возбуждения оболочек планеты внешними небесными телами [4]. Кроме того, происходят большие скачкообразные смещения геоцентра (и, соответственно, ядра и мантии), которые сопровождаются сравнительно большими скачками мощности диссипации. Например, подобно тому, как это произошло в 1997-1998 гг. Геоцентр испытал большой скачок, особенно по полярной координате z (около 2 см) (рис.3).

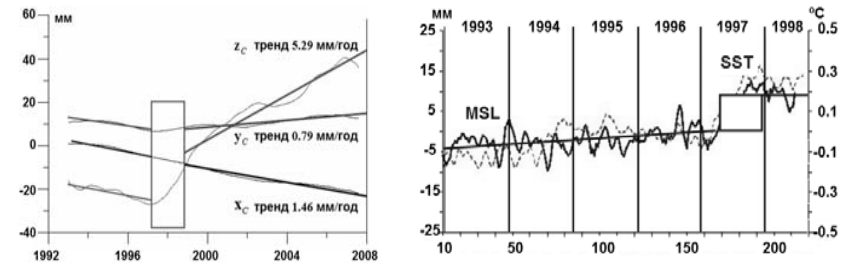


Рис. 3.(слева) Трендовые составляющие координат центра масс Земли в период 1993 -2007 гг. и скачки в значениях его декартовых гринвичских координат в период 1997 - 1998 г. (Zotov et al., 2009 [25]).

Рис. 4. (справа) Скачок глобального уровня океана (MSL) 1997 г. на 8 мм по спутниковым альтиметрическим данным и средней температуры поверхности океана (SST) на 0.16° . По оси абсцисс отложены числа циклов спутников Torex-Poseidon (на верхней оси – годы). По данным *Global Warming Science - www.appinsys.com/Global Warming*.

В результате в этот промежуток времени произошли скачки в активности всех планетарных природных процессов, в мощности диссипации. В частности наблюдались активные скачкообразные изменения во всех климатических планетарных процессах [17, 18]. В качестве примера на рис.4 иллюстрируется скачок среднего глобального уровня океана в 1997 г. Заметим, однако, что эта иллюстрация опирается на ошибочную интерпретацию альтиметрических измерений (см. [8]), связанную с не учетом векового дрейфа центра масс Земли, который обсуждается в данной работе. Но интервал времени для скачка уровня океана определен правильно. Результаты исследований автора показывают, что в 1997 г. произошел не подъем среднего уровня океана, а его опускание примерно на 1 см. Это подтверждают данные наблюдений на береговых станциях.

Указанные механизмы диссипации энергии предстоит изучить в будущем более детально. Полученное значение мощности диссипации позволяет объяснить энергетику всех наблюдаемых на Земле природных процессов. Естественно, что на многих других планетах и спутниках в солнечной системе и в других планетных системах указанный механизм вынужденного взаимодействия и деформаций оболочек также обеспечивает энергетические запросы, в частности на Энцеладе и Титане, Ио и Меркурии [4, 7, 15, 16].

Выполненная здесь оценка мощности диссипации энергии Земли не является полной. Имеются другие важные составляющие, которые существенно повышают указанное значение (например, связанные с взаимными поворотами оболочек [4, 13]). Но уже эта оцененная энергия является достаточной для объяснения энергетики многих природных явлений. В монографии Ю.Н. Авсюка [1] приводятся следующие оценки мощностей основных природных процессов: мощность сейсмических событий $3 \cdot 10^{10} \text{ Вт}$; мощность вулканических событий 10^{10} Вт ; мощность тепловой конвекции 10^{13} Вт ; лунно-солнечных приливов $4 \cdot 10^{11} \text{ Вт}$. Для функционирования магнитного поля Земли требуется еще меньшая энергия. По

современным данным о тепловом потоке Земли имеется довольно точная оценка его мощности $4.4 \div 4.8 \cdot 10^{13} \text{ Вт}$. Предложенный выше механизм генерации и диссипации упругой энергии мантии с избытком объясняет указанный тепловой поток. Мощность сейсмического и вулканического процесса [1, 10] составляют малую часть от мощности диссипации энергии по части колебаний ядра с периодами из списка колебаний центра масс Земли, полученного на основе спутниковых наблюдений [23, 25] (Табл. 1).

Сформулируем окончательный вывод, имеющий первостепенное значение для всех наук о Земле и планетах. Энергия высокой эндогенной активности Земли, других планет и спутников черпается из энергий их поступательно - вращательно-го движения в результате действия обсуждаемого в работе механизма гравитационного возбуждения системы взаимодействующих оболочек данной планеты или спутника (ее ядра, мантии и др.) внешними небесными телами. На основе этого механизма и основанной на нем геодинамической модели были решены старые и современные проблемы в науках о Земле и в планетных науках. Получили объяснение и динамическую интерпретацию фундаментальные явления в геологии и тектонике [6, 15, 24], геофизике [18, 21], геодезии [20], климатологии [12, 15, 19, 28], океанологии [8], сейсмологии и вулканизма [10], гравиметрии [5], в экологии [9, 17, 28] и др.

3. Инверсионные полярные изменения климата Земли в прошлые и в современную эпохи. Предложенная геодинамическая модель естественным образом объясняет высокую энергетичность и диссипацию природных процессов на Земле. Но она позволяет объяснить и интерпретировать другие сложные планетарные явления, например, такие как полярная инверсия активности природных процессов, для которых активность процессов или диссипации энергии этих процессов повышается в одном полушарии (северном) и понижается в противоположном (южном). При этом полушарии могут меняться ролями циклически с определенными частотами и периодами (причем в различных шкалах времени) или вековым образом и даже скачкообразно (резкие изменения). Полушария с контрастными изменениями природных процессов не обязательно являются северным и южным, а их ориентация и положение определяется направлениями соответствующих радиальных смещений геоцентра (или относительных смещений ядра и мантии). Здесь речь идет, конечно, о всех природных процессах, а также о физических полях Земли. Но мы кратко остановимся на анализе инверсионных изменений климата на Земле.

В годовом отчете Мирового Метеорологического Агентства по глобальному климату говорится: N) в северном полушарии в период 1997-2006 гг. средняя температура была на 0.53° градуса Цельсия выше, чем средняя температура за период 1961 – 1990 гг. в том же полушарии; S) в южном полушарии в период 1997-2006 гг. средняя температура была на 0.27° градуса Цельсия выше, чем средняя температура за период 1961 – 1990 гг. в том же полушарии. Указанные вариации климата соответствуют современной эпохе (рис. 6) [28]. Аналогичные по своей сути корреляции в вариациях климата Гренландии и Антарктиды были установлены по данным ледовых кернов для последнего ледникового периода [29]. В результате специальной процедуры по сглаживанию резких скачкообразных вариаций клима-

та в Гренландии авторам удалось выявить планетарное явление инверсионных изменений климата в южном и северном полушариях Земли. Появилось даже название для этого явления – «климатические качели». Подобного рода инверсионные климатические изменения также были обнаружены в сравнительно короткой шкале времени в вариациях климата Гренландии и Антарктиды [19].

В работах автора [4,12] был предложен механизм и описан сценарий формирования оледенений и потеплений Земли и их инверсионных и асимметричных проявлений. Эти планетарные тепловые процессы связаны с гравитационными вынужденными возбуждениями и колебаниями системы ядро-мантия Земли, контролирующими и направляющими подачу тепла в верхние слои мантии и на поверхность Земли. Показано, что действие этого механизма должно проявляться в различных шкалах времени. В частности значительные изменения климата должны происходить с тысячелетними периодами, с периодами в десятки и сотни тысяч лет. При этом возбуждение системы ядро-мантия обуславливается планетными вековыми орбитальными возмущениями и возмущениями вращения Земли, которые как известно характеризуются значительными амплитудами. Но и в короткой шкале времени вариации климата с межгодовыми и декадными периодами также должны наблюдаться, как динамические следствия раскочки системы ядро-мантия Земли с теми же периодами [4].

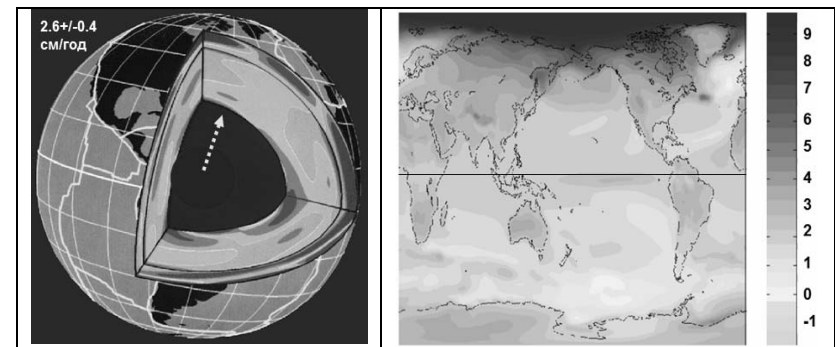


Рис. 5. Вековой дрейф центра масс ядра относительно центра масс мантии со скоростью 2.6 ± 0.4 см/год в направлении полюса с координатами 70° с.ш., 105° в.д. (район полуострова Таймыр) [5]. Рис. 6 (справа). Линейные тренды потепления поверхности (в $^\circ\text{C}$ в столетие) по данным NCAR CCSM3 усредненным по специальному сценарию (http://www.realclimate.org/bitz_fig3.png).

Фундаментальное явление векового полярного дрейфа ядра относительно вязко-упругой и изменяемой мантии [26] в последние годы получило яркие подтверждения в различных науках о Земле [5], [8], [18], [22] и др. Фундаментальным признаком влияния колебаний ядра на вариации природных процессов является их инверсии, когда, например, активность процесса нарастает в северном полушарии и убывает в южном полушарии. Такие контрастные вековые изменения в северном и южном (N/S) полушариях были предсказаны на основе геодинамической модели [4] и выявлены по данным наблюдений: в гравиметрических измерениях силы

тяжести, в определениях векового тренда уровня океана, как глобального, так и в северном и южном полушариях, в перераспределении воздушных масс, в геодезических измерениях изменений средних радиусов северного и южного полушарий, в контрастных изменениях физических полей, например, потоков тепла, течений и циркуляций в океане и атмосфере и др. [5], [8] и др. Геодинамический механизм [4] также однозначно указывает, что в современную эпоху должны наблюдаться вековые тренды в глобальных климатических характеристиках Земли, а также инверсионные и асимметричные тенденции изменения климата, в ее северном и южном полушариях. Автором высказывалось ранее более общее утверждение, также опирающееся на геодинамическую модель возбуждения оболочек: «вековые вариации всех геодинамических и геофизических планетарных процессов являются динамическими следствиями векового дрейфа ядра Земли относительно ее мантии» [26].

4. Механизм разогрева слоев мантии и циклические инверсионные изменения климата. Согласно развиваемой геодинамической модели все слои мантии при малых колебаниях и движениях ядра под действием его гравитационного притяжения испытывают деформации. При этом часть энергии деформаций переходит в тепло в силу диссипативных свойств мантии. Чем интенсивнее колебания ядра, чем больше амплитуда этих колебаний, тем интенсивнее происходят указанные тепловые преобразования. Поскольку относительные смещения ядра имеют циклический характер, из-за циклических воздействий на систему ядро-мантия внешних небесных тел, то и формирование потоков тепла и разогретого вещества также будет иметь циклический характер. В частности орбитальные возмущения с периодами Миланковича в 100 т.л., 41 т.л. и др. будут четко отражены в вариациях указанных тепловых потоков и, соответственно, планетного климата. В этом состоит суть возникновения циклов оледенений на Земле. Если в какой-то период времени ядро ведет себя пассивно, амплитуды его колебаний являются малыми, то тепловой поток к поверхности планеты будет уменьшаться. Эта геодинамическая обстановка соответствует периодам похолодания. И наоборот, если ядро и мантия возбуждены внешними небесными телами, то они взаимодействуют активно и совершают значительные колебания. При этом тепловой поток к поверхности планеты нарастает. Эта геодинамическая обстановка соответствует периодам потеплений. При дрейфе ядра к северу и его колебаниях с нарастающей амплитудой (например, в современную эпоху) подача тепла в верхние слои мантии будет нарастать. Тепло выделяется во всех слоях мантии, деформируемых притяжением дрейфующего и колеблющегося ядра. Кроме этого разогреты флюиды и магма подаются в более высокие уровни мантии, на дно океана и на поверхность Земли по направлению натиска ядра, а также за счет мантийной конвекции (уже в геологической шкале времени) к зонам спрединга [12], [24]. В результате возникает наблюдаемая асимметрия тепловых потоков, в частности в северном и южном полушариях.

5. Тепловой поток и его пространственно - временные закономерности. В современную эпоху тепло подается асимметрично, более интенсивно в северное полушарие Земли (из-за северного дрейфа ядра и сопровождающих его колебаний) и менее интенсивно в южное полушарие. Отсюда следует, что в современную эпо-

ху должно наблюдаться явление более интенсивного прогревания северного полушария, нежели южного. Данные наблюдений подтверждают сказанное. Действительно, тренд нарастания температуры в северном полушарии характеризуется большей скоростью, чем тренд температуры в южном полушарии (рис. 6). В работах [4], [12] отмечалось, что климатические изменения, вызванные механизмом вынужденных колебаний системы ядро-мантия, происходят с широким спектром частот. В частности годовые, месячные и даже суточные колебания ядра неизбежно вызовут тонкие, но заметные, климатические изменения с указанными периодами и им кратными. Подобного рода вариации, например, усматриваются в вариациях среднего атмосферного давления в северном и южном полушариях. Подчеркнем, что даже в этих тонких вариациях климатических условий на Земле должно проявляться явление инверсии и асимметрии по отношению к соответствующим противоположным полушариям Земли, в частности, по отношению к северному и южному полушариям. В качестве иллюстрации к сказанному можно указать на подобные явления в период последнего оледенения [29].

Важные подтверждения развиваемой геодинамической модели [4] и теоретическим результатам, изложенным выше, были получены учеными из Великобритании, Германии, Франции и США [29]. По ледяным кернам ими были изучены изменения климата в районе Гренландии и Антарктиды и было подтверждено явление инверсионных изменений климата в южном и северном полушариях Земли. Появилось даже название этому явлению – «климатические качели». Как установили авторы статьи, резкое понижение температуры в северном полушарии во время последнего ледникового периода (100-15 тысяч лет назад) сопровождалось одновременным потеплением климата в южном полушарии. Ученые выяснили этот факт, анализируя изотопный состав осадочных пород Атлантики. Явление контрастных тенденций в изменениях климата по отношению к противоположным полушариям Земли (вековых и циклических, в том числе с тысячелетними периодами и периодами Миланковича) было предсказано в работах [12, 28]. Контрастные и противоположно направленные тенденции в изменении климата должны наблюдаться в первую очередь по отношению к северному и южному полушариям Земли в особенности в полярных регионах. Согласно разрабатываемой геодинамической модели климатические изменения Земли диктуются и направляются относительными смещениями ядра и мантии. Представляет интерес и обратная задача – по наблюдаемым вариациям климата восстановить характер и особенности смещений ядра. В качестве примера укажем, что обсуждаемые в последние годы вариации глобальных климатических характеристик с периодом около 60 лет по нашей геомодели следует рассматривать как геофизические следствия относительных вынужденных колебаний ядра и мантии Земли с периодом около 60 лет. В дальнейшем данные наблюдений за смещениями центра масс Земли подтвердят высказанное предположение.

Таким образом, природа “климатических качелей”, когда одно полушарие прогревается, а второе охлаждается, связана с циклическими полярными колебаниями системы ядро-мантия Земли в соответствующей шкале времени, в частности в шкале циклов Миланковича [12]. Относительные смещения оболочек вызваны эксцентричным положением центров масс ядра и мантии и их различными динамическими сжатиями. В силу чего внешнее гравитационное воздействие окружающих небесных тел носит для них дифференциальный характер. Ядро соверша-

ет малые колебания, деформирует все слои мантии и в силу диссипативных свойств приводит к их нагреванию или к понижению температуры в зависимости от интенсивности колебаний системы ядро-мантия. При этом колебания и смещения ядра вызывают контрастные изменения геодинамических обстановок в противоположных полушариях Земли и тем самым влияют на все планетарные процессы. Это происходит в различных шкалах времени и с определенными циклическостями, диктуемыми внешними небесными телами [4]. В современную эпоху эти смещения – колебания и дрейф ядра составляют порядка 15 см и 2.6 см/год (оценки по соответствующим смещениям геоцентра [5], [26]). Наблюдаются резкие скачки в смещениях геоцентра (например, в 1997-1998 гг., рис. 3), что нашло отражение во всех планетарных процессах на Земле [9, 18].

Учитывая гигантские размеры планеты и ее ядра можно допустить возможность резких значительно больших по размаху смещений ядра порядка десятков и сотен метров, которые могут подготавливаться многие столетия и тысячелетия. В силу сложных и трудно-предсказуемых процессов и явлений на границе ядра и мантии (обрушения при подошве мантии, при процессах плавления и затвердевания на границе ядро-мантия и др.). Смещение центра масс Земли активно участвует в медленном изменении средних уровней океана в северном и южном полушариях Земли [8]. Здесь активно работает глубинный геодинамический механизм, позволяющий объяснить наблюдаемые контрастные и инверсионные изменения природных процессов, включая климатические, в противофазе, разнонаправленные и асимметричные [4]. Гравитационное воздействие внешних небесных тел на систему ядро-мантия Земли вызывает тенденции относительных смещений их центров масс в радиальном направлении. При этом на границе ядро-мантия в диаметрально-противоположных зонах разно-направленно (контрастно) меняется давление вещества и создаются термодинамические условия его плавления и затвердевания. Это создает рабочие условия для функционирования механизма глубинного зарождения плюмов и для глобальных относительных смещений ядра и мантии Земли в целом. При этом должен наблюдаться широкий спектр вынужденных колебаний ядра и мантии и их вековой медленный тренд. Эти выводы подтверждаются современными данными космической геодезии о колебаниях и смещениях центра масс Земли. Указанный механизм имеет циклическую небесно-механическую природу и его деятельность находит отражение во многих геодинамических и геофизических процессах.

6. Широтная зависимость потепления на Земле в современную эпоху и в прошлые геологические эпохи. Отметим, что вариации климата являются наиболее контрастными в противоположных полярных регионах планеты и их интенсивность зависит от широты. Причем экваториальный пояс подвержен подобным изменениям в наименьшей степени. Указанные явления хорошо иллюстрируются на рис. 4 причем как для современной эпохи (рисунок слева), так и для прошлых геологических эпох, например, для эпох *tr* и *snm* (рисунок справа).

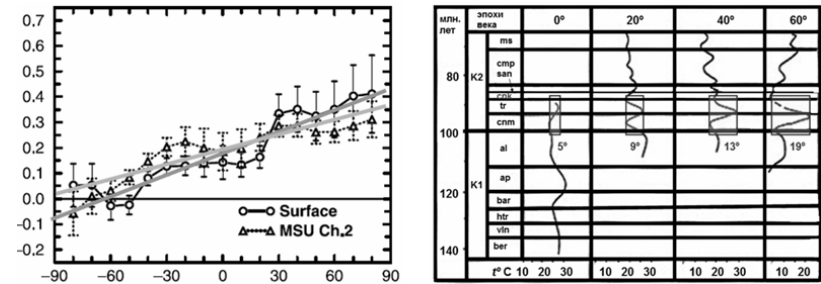


Рис 7 (слева). Усредненные за период 1978 - 2004 наземные и спутниковые (MSU канал 2) наблюдаемые тенденции изменения температуры (указана средне-квадратическая ошибка ее определений) в зависимости от широты [30].

Рис. 8 (справа). Вариации температуры поверхности океана в меловой период по изотопно-кислородным данным для разных широтных поясов: для приэкваториального (0°); для поясов со средними широтами 20°; около 40° и около 60° (по данным [31]).

На рис. 8 широтные зоны указаны в первой строке. А в нижней строке указаны средние значения температуры океана для различных широтных поясов. Хорошо видно, что в приэкваториальной зоне на протяжении миллионов лет температура менялась мало. Но чем выше положение широтного пояса, тем более значительные вариации температуры: около 5° (для экваториального пояса), 9° (для пояса широт 10° - 30°), 13° (для пояса широт 30° - 50°), и около 19° (для пояса широт 50° - 70°). Таким образом, в различных шкалах от коротких до геологических наблюдается явление активизации климатической деятельности в высоких широтах на протяжении геологических эпох (в эпохи tr и cnm) (рис. 8).

Заключение. Обсуждаемое в работе явление климатических “качелей” для северного и южного полушарий [29] объясняется колебаниями и смещениями ядра по отношению к мантии. Они являются синхронными с оледенениями, но не являются строго циклическими, а имеют пилообразный, ступенчатый характер [5, 28, 30]. Смещения ядра определяют геодинамические и тектонические изменения оболочек Земли (в частности, всех слоев мантии и литосферы) и определяют активность, синхронность и единство, инверсию, скачкообразность и т.п. всех планетарных природных процессов, таких как вулканизм, сейсмическая активность, атмосферные процессы и процессы в океане и др. и, естественно, определяют и направляют все планетарные климатические изменения [12], [25]. В современную эпоху (последние десятилетия) происходит вековой дрейф ядра в северном направлении с медленно нарастающей скоростью [26]. Поэтому все природные процессы, развиваясь монотонно и циклически, активизируются с лидирующей ролью их вариаций в северном полушарии и более того в северных районах России. Этот процесс может продолжаться в ближайшие десятилетия и столетия, что таит в себе большую угрозу для цивилизации. Число катастроф и аварий, в том числе на атомных станциях, будет нарастать, климатические условия будут все более жест-

кими и трудными для биосферы в целом. Проблема и трудность положения заключается в том, что указанные геодинамические явления не зависят и не могут зависеть от воли человека. От человека зависит лишь – не создавать дополнительные риски и трудности для жизни на Земле.

Именно Россия в наибольшей степени подвержена действию обсуждаемых механизмов направленных климатических изменений на планете. Центр масс Земли, а по нашей модели и центр масс ядра Земли, смещается к полуострову Таймыр [5], [8], [26]. Следовательно, северные районы Сибири (и всей России) подвергаются наиболее интенсивным климатическим изменениям и общему потеплению по сравнению с любыми другими районами планеты. Эти медленные изменения и другие геодинамические и геофизические следствия динамики вынужденной относительной динамики оболочек Земли могут играть важную роль в экономике страны и должны учитываться в будущих планах ее развития.

Работа выполнена при финансовой поддержке по проектам РФФИ N 11-05-01134-а и N 11-02-00988-а.

Литература

- [1] Авсюк Ю.Н. (1996) Приливные силы и природные процессы. Москва. ИФЗ РАН. 188 с.
- [2] Баркин Ю.В. Глобальные свойства структуры, эволюции и взаимосвязей литосферы и других оболочек Земли // В кн: Взаимодействие в системе литосфера-гидросфера-атмосфера. Изд-во физ. фак-та МГУ. М. 1999. Т.2. С. 46-60.
- [3] Barkin Yu.V. (2001) Dynamics of the Earth's shells and fundamental problems of celestial mechanics, astrometry, gravimetry and geodynamics // Proceedings of International Conference «AstroKazan-2001». Astronomy and geodesy in new millennium (24-29 September 2001), Kazan State University: Publisher «DAS». 2001. P. 59-65.
- [4] Баркин Ю.В. (2002) Объяснение эндогенной активности планет и спутников и ее цикличности // Известия секции наук о Земле Российской академии естественных наук. М., ВИНТИ. 2002. Вып. 9, С. 45-97.
- [5] Баркин Ю.В. (2010) Дрейф центра масс Земли и вековые вариации силы тяжести // Геофизические исследования. Том. 11, N 3. P. 46-60.
- [6] Баркин Ю.В. (2011) Механизм активной жизни Земли и других небесных тел // Известия РАЕН, секция наук о Земле. pp. 452–457.
- [7] Баркин Ю.В. (2011) Высокая активность Титана и Энцелада // Сагитовские Чтения (30 мая – 31 мая 2011 года): Современные проблемы наук о Земле и исследования солнечной системы. ГАИШ МГУ. http://infm1.sai.msu.ru/grav/russian/life/chteniya/sagit2011/Barkin_2011.pdf.
- [8] Баркин Ю.В. (2011) Объяснение вековых изменений среднего глобального уровня океана и средних уровней океана в северном и южном полушариях Земли // Вестник МГУ. Серия 3: физ., астрон. 2011. N 4, P. 75-83.
- [9] Баркин Ю.В. (2011) Срывы и скачки в относительном положении ядра и мантии и катастрофические последствия наиболее опасные для человечества // Геология морей и океанов: Материалы XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т.V. - М.: ГЕОС. 2011. с. 33-37.

- [10] Белов С.В., Шестопалов И.П., Харин Е.П., Соловьев А.А., Баркин Ю.В. (2010) Вулканическая и сейсмическая активность Земли: пространственно-временные закономерности и связь с солнечной и геомагнитной активностью // Новые технологии. Физика. 2010. Т2. N2, С. 3-12.
- [11] Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. Учебник – 2-е изд. испр. и доп.- М.: КДУ, 2005.
- [12] Barkin Yu.V. Dynamics of the Earth shells and variations of paleoclimate // Proceedings of Milutin Milankovitch Anniversary Symposium “Paleoclimate and the Earth climate system” (Belgrade, Serbia, 30 August – 2 September, 2004). Belgrade, Serbian Academy of Sciences and Art. 2004. P. 161-164.
- [13] Barkin Yu.V., Vilke V.G. (2004) Celestial mechanics of the planet shells // Astronomical and Astrophysical Transactions. V. 23. Issue 6, P. 533-554.
- [14] Barkin Yu.V., Shatina A.V. (2005) Deformation of the Earth’s mantle due to core displacements // Astronomical and Astrophysical Transactions. V. 24. No. 3. P. 195-213.
- [15] Barkin Yu.V. (2009) Moons and planets: mechanism of their active life // Proceedings of International Conference “Astronomy and World Heritage: across Time and Continents” (Kazan, 19-24 August 2009). 2009. KSU. P. 142-161.
- [16] Barkin Yu.V. (2009) Titan cyclic activity mechanism and possible regime of its forced and free librations // Abstract Book (CD) of European Planetary Science Congress (Potsdam, Germany, 13 – 18 September 2009). 2009. Vol.4, EPSC 2009-299.
- [17] Barkin Yu.V. (2009) Mechanism of activation of processes at polar regions of the planets and satellites // Abstract Book (CD) of European Planetary Science Congress (Potsdam, Germany, 13 – 18 September 2009). 2009. Vol.4, EPSC 2009-117. 3p.
- [18] Barkin Yu.V. (2009) Step-by-step synchronous variations of geodynamical and geophysical processes and their uniform mechanism: events of 1997-1998 years // EGU General Assembly (Vienna, Austria, 19-24 April 2009). Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, abstract # EGU2009-3382. 2 p.
- [19] Barkin Yu.V. (2010) “Climatic swing” in N/S hemispheres of the Earth, Mars, Titan and another Solar system bodies // EPSC Abstracts. 2010. Vol. 5, EPSC2010-370. 3 p.
<http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2010/EPSC2010-370.pdf>
- [20] Barkin Yu.V. (2010) Main directions of studies in dynamics of planets and satellites // EPSC Abstracts. 2010. Vol. 5, EPSC2010-331. 3 p.
<http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2010/EPSC2010-331.pdf>
- [21] Barkin Yu.V. (2010) Secular redistributions of fluids on the Earth, Mars, Titan and others planets and satellites between opposite hemispheres in present epoch and their uniform mechanism // EPSC Abstracts. 2010. Vol. 5, EPSC2010-421. 3 p.
<http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2010/EPSC2010-421.pdf>
- [22] Barkin Yu.V. (2011) Unified and universal mechanism of active life of the Earth and others celestial bodies: to solution of the fundamental and modern problems of geosciences and planetology // Reports of “AstroKazan – 2011” International astronomical congress (August 22-30, Kazan, Russia). pp. 147-164.
- [23] Gobinddass M.L. et al. (2009) Systematic biases in DORIS - derived geocenter time series related to solar radiation pressure mis-modeling. J Geod (2009) 83:849–858. DOI 10.1007/s00190-009-0303-8.

- [24] Goncharov M.A., Raznitsin Yu.N., Barkin Yu.V. (2012) Specific features of deformation of the continental and oceanic lithosphere as a result of the Earth core northern drift // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. V. 3. № 1. P. 27–54.
- [25] Zotov L.V., Barkin Yu.V., Lubushin A.A. (2009) Geocenter motion and its geodynamical content // “Space Geodynamics and Modeling of the Global Geodynamic Processes”, Novosibirsk, Russian Federation, 22-26 September, 2008; Russian Academy of Sciences, Trofimuk Inst. of Petrol. Geol. and Geophys., SB RAS. – Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”. 2009. P. 98-101.
- [26] Баркин Ю.В. (2008) Вековой полярный дрейф ядра в современную эпоху: геодинамические и геофизические следствия и подтверждения // *Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы XLI Тектонического совещания. Том 1.* –М.: ГЕОС. 2008. С. 55-59.
- [27] Баркин Ю.В. (2007) Свободные трансляционные колебания системы “ядро-мантия” Земли и вариации природных процессов с часовыми периодами // *Нелинейный мир*, Издательство “Радиотехника”. 2007. N 1-2. С. 110-115. <http://elibrary.ru/item.asp?id=9545437>
- [28] Barkin Yu.V. (2007) Inversion of periodic and trend variations of climate in opposite hemispheres of the Earth and their mechanism // *Proceedings of IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy 2007: Earth: Our Changing Planet (Perugia, Italy, July 2-13, 2007) (P) – IAPSO, JPS001*. 2007. P. 1674. 2p. www.iugg2007perugia.it.
- [29] Barker S., Diz P., Vautravers M.J., Pike J., Knorr G., Hall I.R. & Broecker W.S. (2009) Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation. *Nature*, 457, 1097-1102 (26 February 2009) | doi:10.1038/nature07770.
- [30] Vinnikov K. Y., Grody N.C., Robock A., Stouffer R.J., Jones P.D. and Goldberg M.D. (2006) Temperature trends at the surface and in the troposphere, *J. Geophys. Res.*, 111, D03106, doi:10.1029/2005JD006392.
- [31] Frakes LA., Francis J.E., Syrtus J.I. (1992) *Climate modes of the Phanerozoic*. Cambridge: Cambridge Univ. press, 274 p.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Белоусов, А.С. Осипов

*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова.***ВВЕДЕНИЕ**

При облучении биологической ткани наблюдаются определенные последствия радиационного воздействия. Наблюдаемый эффект — результат ионизации атомов и молекул при поглощении энергии ионизирующего излучения. Результат воздействия излучения на объект определяется не только поглощенной энергией, но и характером распределения этой энергии в облучаемом объекте, распределением облучения во времени, видом излучения и другими факторами. Применительно к биологическому действию различие в типе частиц не является главным фактором, определяющим различие в радиационных эффектах. Даже частицы одного типа, но разных энергий могут вызвать неодинаковый эффект при одной и той же поглощенной дозе вследствие разной плотности ионизации.

В 1953 году Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) ввела понятие относительной биологической эффективности (ОБЭ), значение которой определялось как отношение доз «стандартного» (сначала рентгеновского 200 кэВ, в настоящее время γ -излучения ^{60}Co) и исследуемого излучения, создающих одинаковый биологический эффект. В настоящее время решением МКРЗ принято, что ОБЭ фотонов любых энергий равняется единице. В тоже время различные экспериментальные опыты и расчеты, на основании разработанных в последнее время моделей показывают, что ОБЭ фотонов в зависимости от их энергии может меняться в достаточно широких пределах.

При определении радиационного взвешивающего фактора для ионизирующих излучений различных типов используются оценки относительной биологической эффективности этих излучений. Международная Комиссия по Радиационной защите (МКРЗ) в 1990 году [1] рекомендовала значение взвешивающего фактора

(radiation weighting factor) W_R равное единице для всех излучений с низким значением ЛПЭ, в эту группу входят фотоны и электроны всех энергий. И хотя в 2007 году МКРЗ отметила, что в многочисленных экспериментах *in vitro* на клетках наблюдается значительное различие в качестве радиации, например, между излучением ^{60}Co и низкоэнергетическими фотонами, тем не менее, рекомендуется значение взвешивающего фактора W_R равное 1.

При понижении энергии фотонов уменьшается энергия вторичных электронов и растет значение линейной передачи энергии. Полагая, что радиационный эффект, в первую очередь, определяется количеством актов ионизации в единице объема, следует ожидать повышения биологической эффективности с уменьшением энергии фотонов. Во многих работах сравниваются максимальные значения ОБЭ в приближении низких доз RBE_M , которое определяются как отношение начальных (при малых дозах) наклонов кривых «доза-эффект» (по отношению к опорному излучению). Чаще всего начальный наклон получается при аппроксима-

ции кривых «доза-эффект» линейными или линейно- квадратичными функциями. При малых дозах следует ожидать, что при равных количествах актов ионизации, произошедших в исследуемом объеме, будут наблюдаться одинаковые биологические эффекты. Таким образом, ОБЭ может быть оценено, как отношение доз исследуемых излучений, при которых происходит равное количество актов ионизации.

Цель работы – компьютерное моделирование процесса прохождения фотонов низких энергий через биологические ткани, исследование энергетической зависимости числа актов ионизации. Оценка ОБЭ для различных спектров рентгеновского излучения основанная на сравнение количества актов ионизации, вызванных излучением различных энергий, на единицу поглощенной дозы.

ОБЭ ФОТОНОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНА

Фотоны низких энергий представляют собой удобный инструмент для изучения воздействия ионизирующего излучения на хромосомы, поскольку теряют свою энергию, образуя вторичные электроны фиксированной энергии. Кроме того, электроны низких энергий (менее 10 кэВ), присутствуют в спектрах вторичных частиц с высоким и с низким значением ЛПЭ. Фотоны низких энергий (до 10 кэВ) взаимодействуют с биологическими объектами главным образом посредством фотоионизации и дальнейшего испускания электронов Оже и Кестера-Кронига в процессах релаксации. Эти низкоэнергетические электроны поглощают большую часть энергии фотона [2].

В области ультрамягкого фотонного излучения радиобиологические эксперименты выполнены как для синхротронного излучения, так и для рентгеновского с различными материалами мишеней и фильтров. Теоретические вычисления, основанные на моделировании по методу Монте-Карло, показали, что ОБЭ фотонов с энергией в диапазоне 1-10 кэВ в 1,5 больше, чем излучения ^{60}Co [3]. Вычисления, основанные на исследовании распределения первичных электронов, показали, что ОБЭ применяемых в маммографических аппаратах фотонов по отношению к рентгеновскому излучению с энергией 200 кэВ не превышает 2. В работе Zeitz [4] исследовалась ОБЭ двух различных спектров рентгеновского излучения с максимальной энергией 40 кэВ (мишень из Mo или W и фильтр из Sn толщиной 0,15 мм) относительно излучения кобальта. Для клеток HeLa-S3 получено значение ОБЭ $1,3 \pm 0,1$ на 10 % уровне выживаемости и обнаружено линейное возрастание ОБЭ при уменьшении мощности дозы. Bistrovic при изучении выживаемости клеток V79 получил ОБЭ рентгеновского излучения с энергией 20 и 70 кэВ $1,40 \pm 0,07$ и $1,19 \pm 0,06$ по отношению к излучению кобальта соответственно [5], не обнаружив при этом существенной зависимости от дозы. Spradinger и Palcic, исследуя клоногеническую выживаемость клеток V79 и CHO, определили ОБЭ рентгеновского излучения с энергией 55 кэВ относительно излучения кобальта как 1,0-1,4 [6]. Значительно более высокие значения ОБЭ получены в пределе малых доз. Frankenberg, исследуя выживаемость трех типов клеток, получил, сравнивая рентгеновское излучение с энергией 29 кэВ 200 кэВ, ОБЭ первого в диапазоне 1,2-2,0. Микроядерные тесты, проведенные на лимфоцитах человека, показали, что ОБЭ рентгеновского излучения с энергией 14 и 50 кэВ составляет в пределе малых доз, по отношению к излучению кобальта, значения $2,6 \pm 0,2$ и $1,6 \pm 0,2$ соответственно

[7]. В таблице 1 приведены данные по относительной биологической эффективности низкоэнергетического рентгеновского излучения, определенные при уровне выживаемости 10 % по аппроксимации линейно-квадратичной моделью по отношению к излучению ^{60}Co .

Таблица 1
ОБЭ низкоэнергетического рентгеновского излучения [2-10]

Эффективная энергия, кэВ	Доза, Гр	ОБЭ
8,1	5,54	1,50
11,7	5,13	1,62
18,5	5,34	1,56
90	6,47	1,29
^{60}Co (1250)	8,33	1,00

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполнялись путем постановки компьютерного эксперимента с помощью пакета библиотек GEANT4, который позволяет на основе моделирования по методу Монте-Карло получить энергетические потери различных типов частиц в веществе, а также определить число актов ионизации в заданном объеме. Данный пакет позволяет отдельно рассматривать первичное и вторичное излучение. В работе моделировалось прохождение через биологическую ткань пучков фотонов в диапазоне энергий от 1 кэВ до 0,4 МэВ. Поскольку исследуется только энергетическая зависимость отношения поглощенной энергии к полному числу актов ионизации в чувствительном объеме (средняя энергия на один акт ионизации), в качестве чувствительного объема выбрана пластина, поперечные размеры которой много больше размеров исходного пучка. Толщина пластины варьируется в пределах от 5 мкм, что соответствует монослою клеток в реальных радиобиологических экспериментах, до 2 мм (эксперименты в суспензиях). Весь чувствительный объем располагается в положительной части системы координат, а одна из его вершин находится в начале координат. Поперечное сечение моноэнергетического пучка представляет собой окружность, количество частиц в пучке - 10^7 . Начальное распределение частиц в пучке равномерное для всех энергий. Направление движения частиц в сторону детектора выбрано таким образом, что центральная линия пучка расположена перпендикулярно одной из граней детектора и пересекает его геометрический центр.

Для моделирования спектров рентгеновского излучения использовалась простая геометрия. На призму, моделирующую анод реальных рентгеновских трубок, направлялся моноэнергетический карандашный пучок электронов. Сгенерированное рентгеновское излучение пропускается через один или два фильтра, что также соответствует спектрам, используемым в реальных радиобиологических экспериментах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе рассматривается гомогенная по атомному составу ткань с постоянной плотностью, поэтому энергия, поглощенная в чувствительном объеме, с точностью до постоянного множителя может рассматриваться как поглощенная доза. Зависимость полной поглощенной энергии $\langle E \rangle$ (дозы) в чувствительном объеме, нормированная на единственный падающий фотон первичного излучения, зависит от энергии первичного пучка фотонов сложным образом (рис.1). Для толщин 0.5 мм и 2.0 мм при начальном повышении энергии фотонов кривая сначала резко возрастает, проходя через максимум в районе энергий 5-8 кэВ в зависимости от толщины, затем резко спадает. Достигнув минимума в районе энергий 50 кэВ, кривая снова начинает монотонно возрастать вплоть до конца исследуемого энергетического интервала. Для толщины слоя 5 мкм поведение кривой несколько отличается, отсутствует промежуточный максимум, кривая спадает до энергии порядка 40 кэВ, затем возрастает, достигая максимума в районе 85 кэВ, и при дальнейшем повышении энергии слабо спадает.

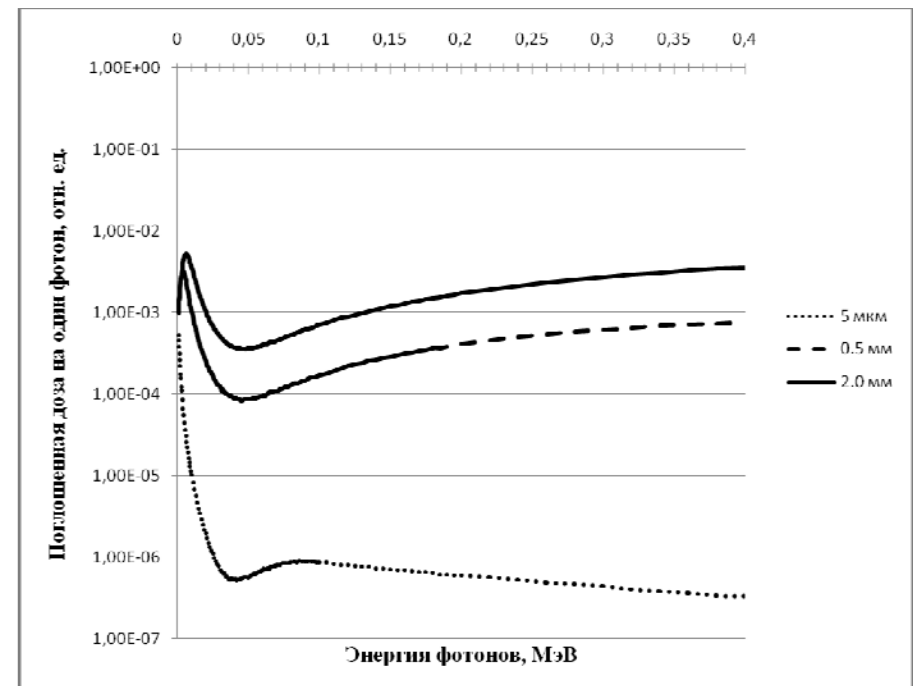


Рис.1. Зависимость поглощенной в слое дозы от энергии первичного пучка.

В случае достаточно толстых слоев первоначальное увеличение дозы при возрастании энергии фотонов связано с увеличением потерь энергии вторичных электронов. Дальнейшее уменьшение связано с уменьшением вероятности взаимодействия фотонов с веществом слоя. Возрастание снова обусловлено увеличением энергии вторичных электронов. Для тонкого слоя увеличение энергии вторичных электронов при малых энергиях фотонов не приводит к увеличению поглощенной дозы, поскольку их пробег меньше толщины слоя.

На рис.2 представлена зависимость количества актов ионизации, приходящихся на единицу поглощенной в слое вещества дозы. Для всех толщин исследуемого образца характер кривых практически одинаков. Кривая резко падает при увеличении энергии фотонов от 1 кэВ до ~17 кэВ. При дальнейшем увеличении энергии фотонов кривая достигает максимума в области энергий 41-43 кэВ, плавно спадает до энергий ~70 кэВ и слабо меняется в дальнейшем. Сильное изменение количества актов ионизаций, определяющих биологический эффект, на единицу поглощенной дозы может объяснять сильную зависимость коэффициента ОБЭ от энергии фотонов в области низких энергий.

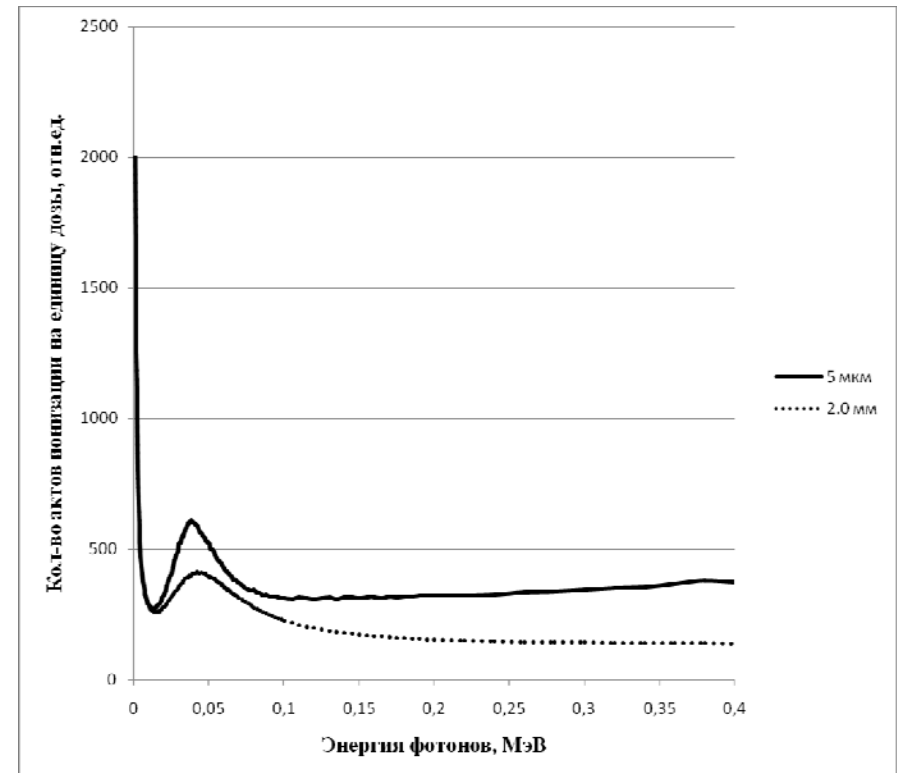


Рис.2. Зависимость количества актов ионизации, приходящихся на единицу поглощенной дозы, от энергии фотонов.

Характер поведения кривых может быть объяснен следующим образом. При начальном увеличении энергии фотонов уменьшение количества актов ионизации на единицу дозы обусловлено, по всей видимости, не ионизационными потерями энергии. По мере роста энергии фотонов энергия вторичных электронов становится достаточной для последующей ионизации вещества, и относительный вклад ионизационных потерь энергии в поглощенную дозу возрастает. При дальнейшем росте энергии вторичных электронов удельные потери энергии на ионизацию уменьшаются и кривая спадает. Вследствие достаточно малой толщины слоя все большая часть электронов проходит слой вещества, не теряя всей своей энергии, чем и объясняется выход кривых на примерно постоянное значение.

На рис. 3 представлены некоторые из спектров рентгеновского излучения, используемые в дальнейших расчетах. Характеристики соответствующих спектральных распределений представлены в табл.2. Для графиков №1 и №2 максимальная энергия в спектре 420 кэВ, для графика №4 – 120 кэВ и для №5 – 60 кэВ.

Таблица 2
Характеристики рентгеновских спектров

№	Материал анода	Напряжение, кВ	Толщина первого фильтра, мм	Толщина дополнительного фильтра, мм	Средняя энергия спектра, кэВ
1	W	450	0.7 Be		
2	W	420	0.7 Be		78,914
3	W	200	7.0 Be	0.5 Cu	46,338
4	W	120	1.5 Al	1.0 Al	31,230
5	W	60	0.4 Be		18,035
6	W	50	0.5 Be	0.25 Al	15,912
7	W	50	2.2 Be	0.5 Al	15,916
8	Mo	29	0.8 Be	0.03 Mo	11,253
9	Rh	28	1.0 Al		11,032
10	Rh	28	0.025 Rh		11,006
11	Mo	28	0.03 Mo		11,207
12	Mo	28	0.025 Mo		11,033
13	W	25	2.0 Be	0.3 Al	10,323

Для спектров рентгеновского излучения, полученных при условиях, перечисленных в таблице 2, выполнен расчет среднего количества актов ионизации, приходящихся на единицу поглощенной дозы, и оценены соответствующие значения ОБЭ по отношению к излучению с энергией 400 кэВ. Результаты приведены в таблице 3. Видно, что характер поведения коэффициента ОБЭ зависит от толщины слоя. Этим обстоятельством может объясняться разброс результатов измерений ОБЭ, выполненных различными авторами по различным методикам.

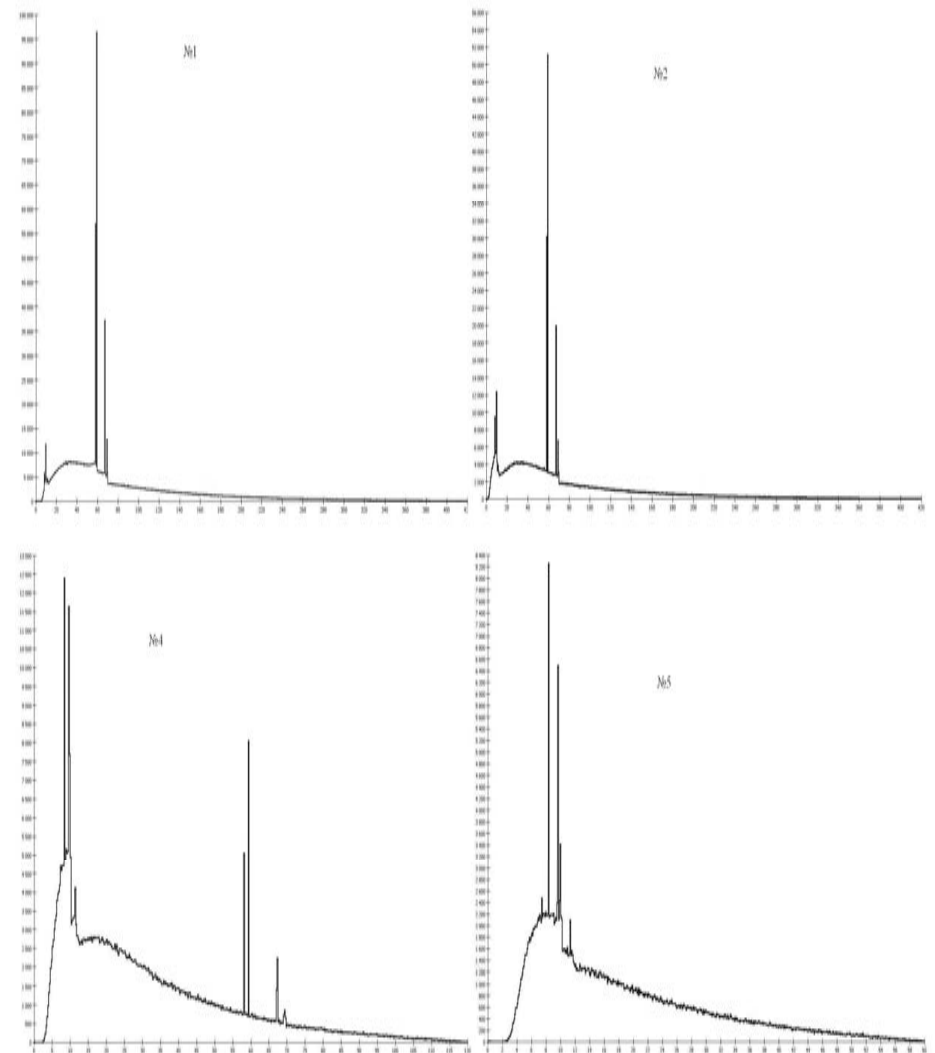


Рис. 3. Спектры рентгеновского излучения для условий №1, №2, №4, №5 согласно таблице 2.

Таблица 3

Среднее количество актов ионизации $\langle N \rangle$, приходящихся на единицу поглощенной дозы, и коэффициентов ОБЭ для различных рентгеновских спектров

№ спектра	5 мкм		0.5 мм	
	$\langle N \rangle$	ОБЭ	$\langle N \rangle$	ОБЭ
1	535±5	1	244±2	1
2	461±5	0,86±0,01	291±3	1,19±0,02
3	407±4	0,76±0,01	319±3	1,31±0,02
4	391±4	0,73±0,01	326±3	1,34±0,02
5	385±4	0,72±0,01	333±3	1,36±0,02
6	386±4	0,72±0,01	336±3	1,38±0,02
7	385±4	0,72±0,01	336±3	1,38±0,02
8	390±4	0,73±0,01	346±3	1,42±0,02
9	390±4	0,73±0,01	347±3	1,42±0,02
10	391±4	0,73±0,01	347±3	1,42±0,02
11	389±4	0,73±0,01	346±3	1,42±0,02
12	390±4	0,73±0,01	347±3	1,42±0,02
13	394±4	0,74±0,01	350±4	1,43±0,02

Литература

1. ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP, **21**, No. 1–3, Oxford: Pergamon Press., 1991.
2. Perkins S.T., Cullen D.E., Chen M.H., Hubbel J.H., Rathkopf J., Scofield J., Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-500400, 30, 1991.
3. Kellerer A. M. Electron Spectra and the RBE of X Rays. // Radiat. Res., 2002, **158**(1), P.13-22.
4. Zeitz L., Kim S. H., Kim J. H., Detko J. F. Determination of Relative Biological Effectiveness (RBE) of soft X Rays. // Radiat. Res., 1977, **70**, P. 552-563.
5. Bistrovic M., Biscan M., Viculin T. RBE of 20 kV X-rays determined for survival of V79 cells. // Radiother. Oncol., 1986, **7**, P. 175-180.
6. Spadinger I., Palcic B. The relative biological effectiveness of ^{60}Co γ -rays, 55 kVp X-rays, 250 kVp X-rays, and 11 MeV electrons at low doses. // Int. J. Radiat. Biol., 1992, **61**, P. 345-353.
7. Verhaegen F., Vral A. Sensitivity of micronucleus induction in human lymphocytes to low-LET radiation qualities: RBE and correlation of RBE and LET. // Radiat. Res., 1994, **139**, P. 208-213.
8. Hoshi M., Antoku S., Nakamura N. et al. Soft X-ray dosimetry and RBE for survival of Chinese hamster V79 cells. // Int. J. Radiat. Biol., 1988, **54**, P. 577-591.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ИННОВАЦИОННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

М.Ю. Берёзкин

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

Солнечная энергетика – одно из наиболее перспективных направлений развития возобновляемых источников энергии. Количество солнечной энергии, поступающей на Землю, превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и других энергетических ресурсов, в том числе возобновляемых. По существующим оценкам, солнечной энергии, поступающей на Землю каждую минуту, достаточно для того, чтобы удовлетворить текущие глобальные потребности человечества в энергии в течение года. Первые экспериментальные солнечные термальные электростанции были построены в Калифорнии еще в начале прошлого столетия [5]. Несмотря на это солнечная энергетика в плане новых технологических решений еще молодая и перспективная отрасль. По сравнению с традиционной энергетикой, которая прошла пик прироста и технологического совершенствования, солнечная энергетика находится на стадии экспоненциального роста. Это говорит о том, что как солнечная, так и возобновляемая энергетика в целом имеют большой инновационный потенциал.

В солнечной энергетике существует два основных направления – фотоэлектрэнергетика, реализующая метод прямого (безмашинного) преобразования солнечной энергии в электрическую с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП, или «фотоэлектрический модуль», «солнечная батарея», «солнечный модуль»), и термодинамические, в которых солнечная энергия преобразуется сначала в тепло, которое в термодинамическом цикле тепловой машины, в свою очередь, преобразуется в механическую энергию, а затем в генераторе – в электрическую. Наиболее широкое распространение в мире получили именно солнечные фотоэлектрические установки (СФЭУ). Кроме того, в мире широко используются солнечные коллекторы для теплоснабжения.

Фотоэлектрические преобразователи (фотоэлектрэнергетика)

Солнечные фотоэлементы могут использоваться как для централизованного, так и децентрализованного производства электроэнергии. Эта технология уже является конкурентоспособной, например, для удаленных районов, где нет сетей электропередач.

Технология концентрации солнечных лучей нуждается только в обычном солнечном свете, поэтому наилучшей зоной ее использования является «солнечный пояс» по обеим сторонам экватора. Эта технология частично может быть применима в засушливых районах юга Европы, Ближнего Востока, запада Индии, западной части Австралии, в Андах, на северо-востоке Бразилии, в северной Мексике и на юго-западе Соединенных Штатов. Повсеместная доступность солнечного излучения в беднейших тропических странах с ростом производства и снижени-

ем цены за счет технологических инноваций перенесется и приведет к быстрому росту солнечной энергетики в этих странах (так называемая «диффузия инноваций»).

Скорость роста солнечной энергетики (более 40% в год) увеличивается. По оценкам Гринпис, к 2030 г. установленная мощность солнечных модулей может составить 1480 ГВт, а к 2050 г. – 4600 ГВт.

Новые типы фотоэлектрических панелей в настоящее время находятся в стадии разработки (например, технология нанесения тонкопленочного покрытия на стекло). Эти новые технологии могут значительно снизить стоимость ФЭП. При том, что стоимость панелей примерно равна стоимости всех других компонентов системы, вместе взятых, то одной из важных задач модернизации – снижение стоимости других компонентов системы, входящих в солнечный модуль.

В производстве солнечных батарей до 2020 г. основными направлениями инновационной деятельности будут:

- бесхлорные технологии очистки кремния;
- новые полупроводниковые материалы (без участия кремния);
- тонкопленочные технологии;
- повышение срока службы модуля за счет разработки более долговечных материалов;
- повышения КПД преобразования фотоэлементов – со средних получаемых 16% сейчас до теоретических 93% – есть куда совершенствоваться.

После 2020 г. можно ожидать солнечных батарей с использованием квантовых наноразмерных эффектов. Производство солнечных батарей постепенно перейдет от кремния к новым материалам (рис. 1).

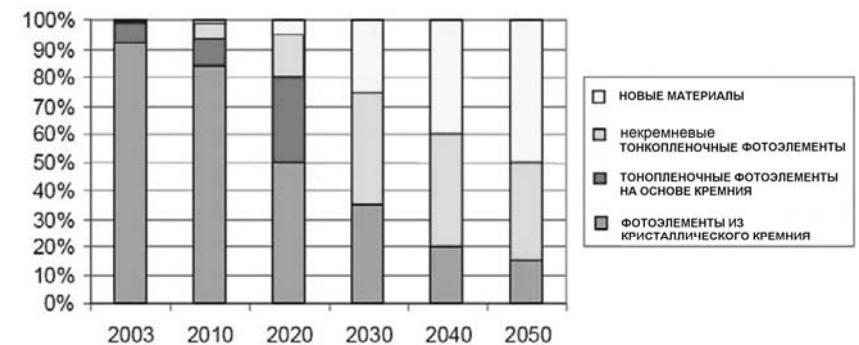


Рис. 1. Прогноз доли фотоэлементов из различных материалов до 2050 года [9].

Из всех видов возобновляемой энергетики по темпам роста первое место занимает солнечная энергетика. В 2010 г. в мире построено 22,7 ГВт фотоэлектростанций (ФЭС), в том числе Германия 7 ГВт, Италия 5,6 ГВт, Чехия 1,2 ГВт, Япония 1 ГВт. Темпы роста производства СЭС составили 118% по сравнению с 2009 г. В конце 2011 г. установленная мощность СЭС в мире достигнет 66 ГВт [11]. Ни одна отрасль промышленности в мире, включая телекоммуникации и производство компьютеров, не имела таких темпов роста. Для сравнения, в 2010 г. в мире

завершено строительство трех АЭС общей мощностью 3 ГВт, которое продолжалось более 5 лет.

Пока 95% всех СЭС в мире изготавливаются в виде пластин из кремния высокой степени очистки (99,999%). Содержание кремния в земной коре 29,5% массы – второе место после кислорода, содержание урана 0,0003%. Несмотря на то, что кремния в земной коре больше, чем урана в 98300 раз, стоимость монокристаллического кремния лишь немного уступает стоимости урана, что связано с устаревшей грязной хлорной технологией производства. В настоящее время разработаны уникальные бесхлорные технологии получения кремния с низкими энергетическими затратами.

Еще один путь решения проблемы заключается в снижении расхода кремния на один мегаватт мощности с 6-8 т в настоящее время в 50-1000 раз за счет использования новых типов концентраторов и матричных кремниевых солнечных элементов. Переход на матричные элементы приведет к снижению расхода кремния в 1000 раз. Такая технология не требует применения серебра и трудоемких операций, используемых в настоящее время [5]. Ожидается, что в ближайшие десять лет станет ясно, насколько тонкопленочные технологии смогут обеспечить снижение стоимости и повышение КПД. Инновационные процессы не только позволяют создавать новые технологии, но и помогают накапливать опыт производства, необходимый для коммерциализации технологий.

Общий КПД доступных на рынке ФЭП колеблется в диапазоне 6-15% в зависимости от типа фотоэлемента. Основным материалом, используемым для изготовления фотоэлементов, – кристаллический кремний. Другие материалы, например арсенид галлия (GaAs), в силу крайне высокой стоимости используются только в солнечных батареях для космических приложений. Первый тонкопленочный фотоэлемент – модуль на основе аморфного кремния (a-Si) – был разработан в 1980-е годы. Позднее в промышленном производстве солнечных батарей были использованы другие полупроводники – теллурид кадмия (CdTe) и диселенид меди и индия (CIS/CIGS). Потенциал тонкопленочных модулей оценивается как очень высокий, однако до настоящего времени их распространение ограничивалось высокой стоимостью.

Таблица 1. Оценка технико-экономических характеристик ФЭП до 2050 года.

	2007	2015	2020	2030	2040	2050
КПД (максимальный)	42%	46%	49%	54%	60%	65%
Капитальные затраты, долл. США/кВт	3746	2610	1776	1027	785	761
Установленная мощность, ГВт	6	98	335	1036	1915	2968
Эксплуатационные расходы, долл. США/кВт/год	66	38	16	13	11	10

Установленные мощности солнечных модулей, присоединенные к энергосистемам, сосредоточены, главным образом, в Японии, Германии и США. Фотоэлементы часто считаются рентабельными при использовании на месте, например, на метеорологических станциях, в автономных системах отдельно стоящих зданий. Автономные системы фотоэлементов особенно хорошо подходят для необеспеченных энергоснабжением районов. Они стоят дороже, но могут конкурировать с другими автономными системами электроснабжения малой мощности, особенно в удаленных районах.

Ожидается, что возможное будущее снижение стоимости ФЭП примерно наполовину будет обеспечено инновационными технологиями, направленными на совершенствование материалов, процессов, КПД преобразования и конструкции. Значительного снижения издержек можно также добиться с помощью увеличения объемов производства и экономии за счет масштаба установок.

Кроме направления, связанного с разработкой экологически чистых технологий производства, ведутся поиски по повышению КПД фотопреобразования. В настоящее время максимальный КПД солнечных батарей достиг 43% при теоретическом пределе 93%. Сейчас наиболее распространены солнечные элементы из поликристаллического кремния с КПД около 16%. На сегодня многие лаборатории мира уже сообщили о достижении ими КПД прямого преобразования солнечной энергии в электрическую в 34-45%. Весьма перспективными являются фотоэлектрические элементы представляющие собой квантовые и наноструктуры.

Все существующие в мире конструкции, материалы и технологии изготовления солнечных модулей обеспечивают срок службы модулей 20 лет в тропическом климате и 25 лет в умеренном климате с потерей до 20% мощности к концу срока службы. Это еще один путь для совершенствования технологии. Используя новые экспериментальные данные со временем можно увеличить срок эксплуатации солнечных модулей до 40-50 лет [7].

Поскольку для производства фотоэлементов нужны значительные инвестиции, объемы рынка и производства имеют большое значение. Бум солнечной энергетики не мог произойти без серьезных государственных программ, которые предполагали значительные инвестиции в эту отрасль.

В силу того, что интенсивность солнечного излучения непостоянна, автономным солнечным энергоустановкам необходимы аккумуляторы. По этой же причине солнечные энергоустановки можно использовать как часть диверсифицированной системы энергоснабжения. Совместимость систем зависит от характеристик кривой нагрузки. В солнечных районах, где пик нагрузки приходится на летние дни (что часто обусловлено кондиционированием воздуха), вклад солнечной энергии в покрытие пиковых нагрузок может быть существенным. На более высоких широтах, где пиковая нагрузка приходится на зимнее утро, вклад солнечной энергии оказывается незначительным, что обуславливает необходимость создания резервных мощностей.

До последнего времени не было недостатка в кристаллическом кремнии. Однако по мере роста уровня производства ФЭП, удовлетворение спроса на кристаллический кремний при сложившемся на мировом рынке уровне предложений становится серьезной проблемой. Чтобы решить возникшую проблему, необходимо быстро наладить новое производство этого сырья. Для этого придется осущест-

вить значительные капиталовложения в отрасль, ранее удовлетворявшую свою потребность в кремнии за счет индустрии полупроводников. Подходы к производству солнечных фотоэлементов диверсифицируются; в частности, изучаются различные виды полупроводниковых материалов.

Производство поликристаллического кремния для нужд солнечной энергетики неуклонно растет. Так если потребление в 2006 г. кремния в данном секторе энергетики составило более 23 тыс. т, то в 2008 – более 46 тыс. т. При этом такой показатель как расход кремния на Вт установочной мощности за тот же период снизился с 10 до 8.7 г/Вт. Такая динамика полностью отвечает росту установленных мощностей солнечных модулей и систем. Сегодня стоимость одного килограмма поликристаллического кремния «солнечного качества» осталась практически на уровне 2006 года и достигает суммы в 200 долларов. Однако ожидаемое перенасыщение рынка неизбежно должно привести к снижению стоимости данного материала. Основным поставщиком дешевых кремниевых пластин, ФЭПов и модулей в последнее время стал Китай (более 50% рынка в 2010 г.).

Солнечные термодинамические электрические станции (гелиотермоэнергетика)

Существует три основных типа устройств для концентрации солнечного излучения: цилиндрические параболоиды, сферические параболоиды и установки башенного типа. Параболоцилиндрические концентраторы и установки башенного типа, как правило, применяются в крупных централизованных энергосистемах, хотя первые могут применяться и в меньших системах как для нагрева и охлаждения, так и для выработки электроэнергии. Чтобы компенсировать непостоянство солнечного излучения и тем самым повысить коммерческую стоимость производимой энергии, используются тепловые аккумуляторы или резервное топливо.

Путь преобразования в термодинамических СЭС включает в себя четыре основных последовательных элемента: концентратор, приемник (ресивер), систему передачи/аккумуляции и систему преобразования полученной энергии в конечную форму. Концентратор воспринимает солнечное излучение и фокусирует его на приемнике. Приемник поглощает сконцентрированный солнечный свет, преобразует его в тепло и передает тепло рабочей жидкости. Система передачи/аккумуляции передает нагретую жидкость в систему преобразования энергии. На некоторых термодинамических СЭС часть тепловой энергии сохраняется для последующего использования.

Технологии концентрации солнечных лучей готовы к внедрению в двух из существующих трех вариантов: с использованием параболических цилиндров (зеркал) и установок башенного типа. В то же время использование параболических тарелок по-прежнему требует дальнейших научно-исследовательских работ. Затраты все еще остаются слишком высокими, поэтому решающее значение имеет разработка соответствующих программ поддержки внедрения для обеспечения будущего гелиотермальных станций.

Преимущество солнечных термодинамических технологий – их уникальная способность к интеграции в традиционные тепловые электростанции. Любую из перечисленных технологий можно интегрировать в качестве «солнечной топки» в традиционные тепловые циклы параллельно с камерой сгорания для ископаемых видов топлива. Это позволяет обеспечить аккумулирование тепла или надежную резервную мощность за счет ископаемого топлива без сооружения отдельных ре-

зервных станций и без изменений в энергосистеме. При небольшом объеме дополнительной энергии, получаемой на основе природного газа или любого другого ископаемого топлива, солнечные станции могут надежно снабжать потребителей электроэнергией на постоянной основе. Таким образом, гелиотермальный метод обладает уникальной способностью дополнять меняющуюся выходную мощность «солнечной топки» с помощью аккумулированного тепла или резервного нагревателя на основе ископаемого топлива.

Как эффективность, так и стоимость таких комбинированных систем может быть весьма высокой. Текущие цены на электроэнергию составляют примерно 0,10 долл./кВтч, и ожидается, что к 2050 г. они упадут до уровня 0,72 долл./кВтч. Такие цены характерны для газовых электростанций малой мощности с низким КПД (40-45%), тогда как КПД централизованных станций мощностью 500 МВт составляет 60%. Если влияние масштаба на КПД распространить на гибридную схему, то экономические показатели рассматриваемой технологии могут оказаться менее обнадеживающими.

Оптимальные условия для использования термодинамических СЭС имеются в регионах с засушливым или полусушливым климатом, включая такие регионы, как Южная Европа, Северная и Южная Африка, Ближний Восток, западная Индия, Западная Австралия, плато Пуна и Альтиплано в Андах, северо-восточная Бразилия, северная Мексика и юго-запад США. В настоящее время наблюдается тенденция к комбинации солнечных коллекторов, вырабатывающих пар, с традиционной газовой станцией комбинированного цикла. Существует проект добавить поле солнечных коллекторов к действующей угольной станции в Австралии. В долгосрочной перспективе очень многообещающим представляется прямое производство энергии путем использования солнечного излучения в транспортабельных химических топливах, например в солнечно-водородных преобразователях.

В настоящее время проекты солнечных станций разрабатываются в Испании (50 МВт), в штате Невада в США (68 МВт) и в других районах. В 2012 г. должна быть пущена в эксплуатацию СЭС мощностью 500 МВт, объем выработки которой планируется на уровне 1047 ГВт.ч/год.

Таблица 2. Оценка технико-экономических характеристик солнечных термодинамических электростанций до 2050 года.

	2007	2015	2020	2030	2040	2050
Капитальные затраты с учетом аккумуляции, долл. США/кВт	7250	5576	5044	4263	4200	4160
Установленная мощность, ГВт	1	25	105	324	647	1002
Эксплуатационные расходы, долл.США/кВт/год	300	250	210	180	160	155

Во многом успех СЭС зависит от успешности создания систем аккумулирования тепла. Современные системы аккумулирования позволяют выдавать нагрузку в течение нескольких часов в отсутствие солнца. Поэтому средний КИУМ солнечных термальных электростанций сейчас составляет 0,39 против 0,22 у фотоэлектрических. Ниже дан прогноз развития технологии в части аккумулирования энергии (рост уровня КИУМ).

Капитальные затраты на строительство и эксплуатацию солнечных термальных электростанций очень велики, а темпы совершенствования технологии ниже, чем для фотоэлектрэнергетики. Однако использование солнечного тепла для накопления химической энергии – термokatалитического преобразования тепловой энергии в химическую и обратно – позволяет аккумулировать энергию солнца и использовать высокопотенциальное тепло для нагрева пара [4].

В Европе установленная мощность новых или строящихся СЭС составляет 750 МВт. В 2012 г. предполагается доведение установленной мощности СЭС до 2 ГВт. По некоторым данным, только Испания может ввести к 2017 году 10 ГВт мощностей. В США проектируются СЭС мощностью 7 ГВт.

Солнечные коллекторы для теплоснабжения (гелиотеплоэнергетика)

Плотность солнечной энергии, падающей на 1 кв. км земной поверхности на экваторе, составляет 1 ГВт. Мощность солнечных установок на этой площади составляет сотни мегаватт. Солнечная энергетика позволяет обеспечить значительную долю в теплоснабжении даже в мегаполисах и на крупных предприятиях.

На данный момент лидером мировой установленной мощности коллекторов является Китай. В Европе и Японии имеется около 10 ГВт(т) плоских коллекторов и 9 ГВт(т) вакуумных трубчатых коллекторов. Большинство из них в качестве теплоносителя используют воду, воздушные коллекторы представляют только 1% рынка.

Рыночные лидеры в Европе – Германия, Греция и Австрия. Наибольшая удельная площадь поверхности коллекторов на одного жителя отмечается на Кипре – 582 м², затем идет Австрия – 297 м²; в среднем по Европейскому Союзу – 33,7 м² на жителя.

Лидером по установленной мощности солнечных коллекторов в мире является Китай, в Европе – Германия (рис. 2).

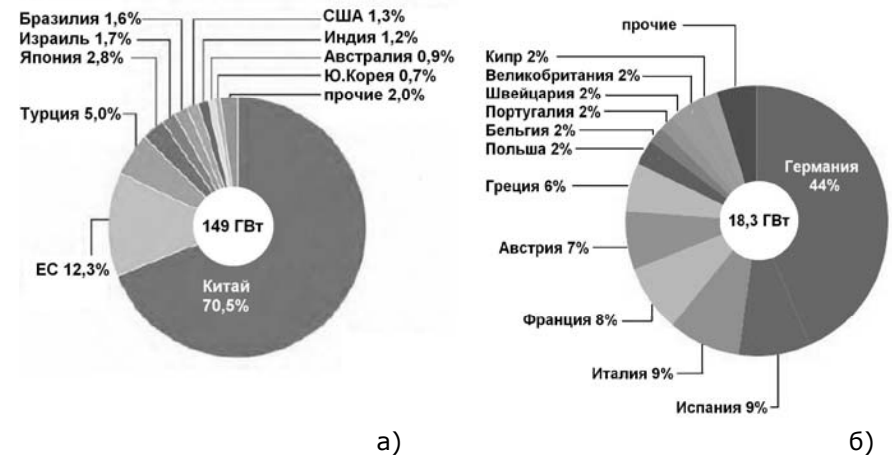


Рис. 2. Суммарная установленная мощность солнечных коллекторов по странам мира (а) и Евросоюза (б) [10].

Широкое применение локальных систем отопления и нагрева воды приведет к дальнейшей автономизации потребителя. Снизится использование электроэнергии для нагрева воды и отопления. Так, сейчас только в Краснодарском крае летом 200 МВт электрической мощности уходит на нагрев воды. Наиболее перспективными для применения солнечного тепла регионами в России являются Приморье, Юг Сибири и Забайкалье, Северный Кавказ.

На распространение гелиотермальных технологий большое влияние окажет повышение эффективности концентратора и снижение его стоимости. Поскольку концентратор является модульным элементом, можно принять простую стратегию, в рамках которой разработка прототипов и их исследование будут осуществляться в реальных эксплуатационных условиях параллельно с работой существующего оборудования. Модульная конструкция также позволяет сконцентрироваться на определенных характеристиках отдельных узлов, в том числе свойствах материалов для отражателя и конструкции несущих опор, которые вполне могут быть усовершенствованы.

Разработка инновационных технологий направлена на получение отражающих материалов со следующими характеристиками:

- высокий коэффициент отражения (>92%) для длины волны от 300 нм (нанометров) до 2500 нм;
- низкий коэффициент загрязнения (<0,15%, близкий к характеристикам посеребренных стеклянных зеркал).

Повышение мощности станций является необходимым шагом для всех гелиотермальных технологий. На девяти солнечных станциях в Калифорнии мощностью от 14 до 80 МВт, где используются параболические концентраторы и термомасла в качестве рабочей жидкости, мощность уже была увеличена.

Повышение мощности снижает удельные капитальные затраты, удельные затраты на эксплуатацию и обслуживание и увеличивает КПД. Интеграция в более

крупные установки, особенно для установок башенного типа, сопряжена с серьезными сложностями в силу менее модульной конструкции. В этой области пока не созданы подходы к повышению мощности с низким уровнем риска.

Другим важным фактором снижения стоимости термодинамических СЭС является усовершенствование систем аккумулирования, ориентированных на конкретные требования той или иной технологии, зависящие от используемого теплоносителя и необходимой температуры. В целом, разработки в области аккумулирования должны пройти несколько последовательных этапов, связанных с различной длительностью сроков доводки, прежде чем технология будет воспринята рынком.

Что касается положения дел с солнечной энергетикой в России, то практическое использование солнечной энергии здесь крайне ограничено, несмотря на широкие исследования, которые проводились многие десятилетия и проводятся в этом направлении. В стране существуют лишь три центра производства солнечных элементов и модулей – Краснодарский край 6,2 МВт, Рязанская область 3,83 МВт и Московская область 5,57 МВт. 90% производимых в России фотоэлектрических элементов идет на экспорт. Первая в России солнечная электростанция, подключенная к сети работает в Белгородской области (мощность – 0,15 МВт). Есть планы строительства на многие десятки мегаватт солнечных электростанций в Краснодарском и Ставропольском крае, Туве, Бурятии.

Несмотря на научн-исследовательский потенциал экономических, законодательных, инвестиционных предпосылок (как это происходило и происходит в странах бурно развивающих солнечную энергетiku с помощью государственных программ финансирования), а с ними и преспектив инновационного развития солнечной энергетики в России не сложилось.

Литература

1. Берёзкин М.Ю. Эколого-технологический императив инновационного развития солнечной энергетики мира. – Физические проблемы экологии (Экологическая физика). – М.: МАКС Пресс, 2010. – №18.
2. Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. – М.: [б.и.], 2005. – 264 с.
3. Мировая энергетика – 2050 (Белая книга) / Под ред. В.В. Бушуева, В.А. Калманова. – М.: ИД «Энергия», 2011. – 360 с.
4. Пармон В.Н. Термокаталитическое преобразование солнечной энергии и его потенциальные возможности. – Новосибирск: Институт катализа им. Г.К. Борескова, 1991.
5. Рюмин В. Солнечный луч и электричество // Электричество и жизнь. – №1, 1912. – с. 1-4.
6. Стребков Д.С. Матричные солнечные элементы. – М.: Изд. ГНУ ВИЭСХ, 2010. – т. 3, 310 с.
7. Стребков Д.С., Тверьянович Э.В. Концентраторы солнечного излучения. – М.: Изд. ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 315 с.
8. Чупров В.А. Шкрадюк И.Э. Технологическая картина мировой энергетики до 2050 г. – М.: Центр охраны дикой природы; Гринпис России, 2010. – 78 с.
9. Frankl et al. Technology Roadmap: Solar photovoltaic energy. – International Energy Agency, 2010.

10. Renewables 2010 Global status report. – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2011.
11. Solar Thermal Markets in Europe. – European Solar Thermal Industry Federation, 2008.

ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА РАЗВИТИЕ ТЕЧЕНИЙ В ВОДОЕМЕ В ПЕРИОД ФОРМИРОВАНИЯ ВЕСЕННЕГО ТЕРМОБАРА

Блохина Н.С., Горшкова Н.А.

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Введение

К числу явлений, которые оказывают существенное влияние на термогидродинамические режимы водоемов, относится конвективное перемешивание, возникающее вследствие плотностной неустойчивости водных масс в период весеннего прогрева и осеннего охлаждения пресных водоемов и слабосоленых морей (до 24‰). Эта плотностная неустойчивость связана с нагревом весной или охлаждением осенью поверхностных вод до температуры максимальной плотности (в пресных водоемах - 4 °С) и образованием в этой связи фронтального раздела – термобара.

Термобар (термический бар, ТБ) представляет собой узкий вертикальный столб воды в водоеме с температурой максимальной плотности от поверхности до дна. Он разделяет водоем на две термические зоны с разными видами вертикальной стратификации температуры. Термобар ограничивает обмен веществом между этими зонами, что, с одной стороны, способствует интенсивному нагреванию вод и накоплению биогенных элементов в прибрежной части озера, а с другой стороны, препятствует распространению загрязнений из прибрежной зоны, влияя в целом на экологическое состояние водоема. В больших глубоких озерах время существования термобара достигает нескольких месяцев. В связи с этим, изучение термогидродинамических процессов в водоемах в период существования в них термобара представляет большой научный и практический интерес.

Современное состояние исследований этого явления характеризуется большим количеством натуральных измерений, начиная с первых работ Фореля на Женевском озере [11] и Тихомирова на Ладожском и Онежском озерах [8-10], единичными лабораторными экспериментами и небольшим числом математических моделей, описывающих реальный процесс.

В большинстве имеющихся работ по изучению температурных распределений и течений в водоеме в период существования в нем термобара рассматриваются случаи, когда водоем полностью свободен ото льда. Однако, как показано в работе [1], термогидродинамические процессы, в водоеме свободном ото льда и еще полностью от него не освободившемся, существенно отличаются. Кроме того, воздействие ветра на водную поверхность в период формирования термобара оказывает сильное влияние на систему течений в водоемах. Влияние ветра на формирование термобара, зародившегося в водоеме свободном ото льда посвящены ра-

боты [3], [13]. Однако аналогичных работ для водоемов свободных ото льда, в которых течения и термобар сформировались в период таяния ледового покрова, не проводилось.

В настоящей работе с помощью математического моделирования исследуются влияние ветра на развитие термобара и термогидродинамические процессы в пресном водоеме, сформировавшиеся к моменту полного таяния ледового покрова.

Особенности температурного распределения и структуры течений в водоеме свободном и частично покрытом льдом в момент формирования весеннего термобара.

Как показано в работе [1] картина течений и температурное распределение в водоеме, частично покрытом и свободном ото льда, в момент существования термобара в прибрежной области существенно различаются. На Рис. 1 представлены поля распределения температуры (T) и функции тока (ψ) для случая водоема свободного ото льда (а) и частично покрытого льдом (б) через 8.5 часов после начала прогрева водоема и зарождения термобара у берега. На всех представленных ниже рисунках шаг сетки по вертикали равняется 0.8 м, а по горизонтали – 10 метров.

В случае (б) в момент начала прогрева водоема лед находился в центральной части и распространялся к берегу на 50 метров. К моменту времени 8.5 часов лед полностью растаял. По Рис. 1 видно, что месторасположение термобара в этих двух случаях остается одинаковым. Распределение изотерм во всей области, исключая центральную часть схоже. Отличие лишь в их наклоне. Ближе к центру водоема (случай б) наблюдается значительный градиент температуры по горизонтали. Конвективные вихри справа и слева от термобара в случае (а) и (б) остаются одинакового размера. Однако во втором случае внутри антициклонического вихря, охватывающего водоем от центра до термобара, в его центральной части существует интенсивный глубинный вихрь (ГВ). Этот вихрь зародился у кромки льда и после его полного таяния занял область в 3-4 раза большую начальной длины ледового покрова. Именно этот вихрь способствует возникновению большого горизонтального градиента температуры в центре водоема, что замедляет его прогрев и перемещение термобара от берега в глубинную часть озера.

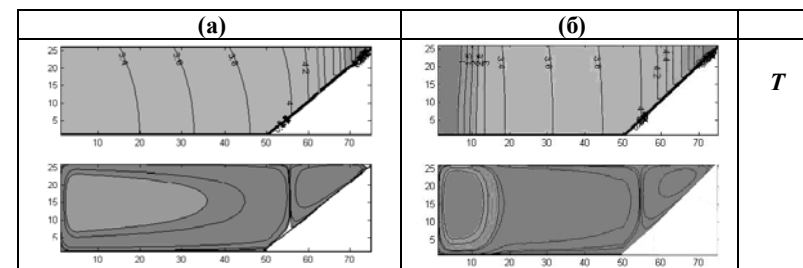


Рис. 1. Поля распределения температуры (T) и функции тока (ψ) для случая водоема свободного ото льда (а) и частично покрытого льдом (б) через 8.5 часов после начала прогрева водоема и зарождения термобара у берега. Скорость ветра $V=0$.

Постановка задачи.

Рассматривается движение вязкой несжимаемой жидкости в области, соответствующей половине водоема симметричного относительно оси Ox_3 (Рис.2). Водоем вытянут вдоль фронта термобара (оси Ox_1) и имеет наклонное дно.

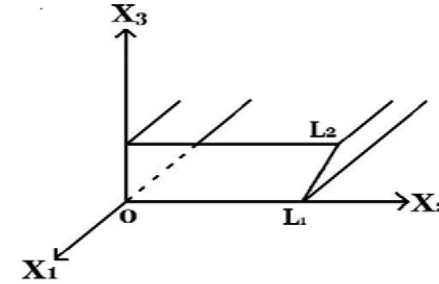


Рис.2. Схема водоема. H – глубина водоема; L_1 – ширина по дну; L_2 – ширина по поверхности;

Термические и динамические процессы в жидкости описывает следующая система уравнений:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U}\nabla)\vec{U} = -\frac{1}{\rho_0}\nabla p_1 + \nu\Delta\vec{U} - \frac{\bar{g}\rho_1(T - 4^0 C)}{\rho_0} \quad (1)$$

$$\text{div}(\vec{U}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{U}\nabla)T = \lambda\Delta T \quad (3)$$

$$\rho(T) = \rho_0(4^0 C) - \rho_1(T - 4^0 C) = \rho_0(4^0 C) - \rho_0(4^0 C)\gamma(T - 4^0 C)^2 \quad (4)$$

Здесь (1) – уравнение гидродинамики в приближении Буссинеска; (2) – уравнение неразрывности; (3) – уравнение теплопроводности и (4) – уравнение состояния пресной воды в районе 4^0C .

В уравнения введены следующие обозначения: t - время; \vec{U} - вектор скорости; T - температура воды; p_1 - гидростатическое давление; ρ и ρ_0 - плотность воды при температуре T и 4^0C соответственно, ν и λ - коэффициенты молекулярной вязкости и теплопроводности, $\gamma=0.000075$ град $^{-2}$.

Граничные условия

На дне водоема и правой наклонной границы задаются условия отсутствия потока тепла, прилипания и непроницаемости для скорости:

$$\frac{\partial T}{\partial x_3} = 0, U_1 = 0, U_2 = 0, U_3 = 0 \quad \text{-(дно)} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, U_{1n} = 0, U_{2n} = 0, U_{3n} = 0 \quad \text{-(права граница),} \quad (6)$$

где n - нормаль к наклонной поверхности.

На левой границе задаются условия симметрии для всех переменных и отсутствие горизонтального потока тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, U_1 = 0, U_2 = 0, \frac{\partial U_3}{\partial x_2} = 0 \quad (7)$$

На верхней границе водоема задается поток тепла Q и напряжение трения ветра τ .

$$-c_w \rho \lambda \frac{\partial T}{\partial x_3} = Q, U_1 = 0, \frac{\partial U_2}{\partial x_3} = \tau, U_3 = 0 \quad (8)$$

Здесь U_1, U_2, U_3 - проекции скорости на оси X_1, X_2, X_3 ;

$\tau = C_D \rho_a (V)^2$ - напряжение трения ветра на поверхности воды;

Поток $Q = Q_R + Q_S + Q_L + Q_{iw}$ состоит из:

Q_R - потока радиации, поступающего от Солнца;

$Q_S = \rho_a c_p C_T (T - T_a) V$ - потока явного и

$Q_L = LC_q (q - q_a) V$ - потока скрытого тепла;

$Q_{iw} = \delta_w \sigma (T_K + T)^4 (0.39 - 0.05 e_a^{1/2}) (1 - 0.6 n^2)$ - потока длинноволнового излучения с поверхности воды ($T_K = 273,15 \text{ K} - 0^\circ \text{C}$), учитывающий облачность и обратную радиацию в отсутствии облаков [4]. Здесь δ_w - излучающая способность воды ($\delta_w = 0,93$); σ - постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}^4$); c_p -

теплоёмкость воды; C_p - теплоёмкость воздуха при постоянном давлении; C_T и C_q

- коэффициенты Стентона и Дальтона для переноса тепла и влаги, C_D - коэффициент трения; L - скрытая теплота парообразования; T_a и q_a - температура и удельная влажность воздуха; T и q - температура поверхности воды и удельная влажность вблизи ее поверхности; V - скорость ветра над поверхностью водоема.

Выражение для скрытого потока тепла в зависимости от температуры подстилающей поверхности T может быть записано с учетом относительной влажности воздуха f и зависимости насыщающей влажности $\Phi(T_a)$ от температуры воздуха в виде [2]:

$$Q_L = LC_q (q - q_a) V = LC_q \left((1 - f) \Phi(T_a) + \frac{\partial \Phi}{\partial T} (T - T_a) \right) V \quad (9)$$

Длинноволновое излучение с поверхности воды согласно [12] можно записать через насыщающую упругость водяного пара E и относительную влажность воздуха f (выраженную в %)

$$Q_{iw} = \delta_w \sigma (T_K^4 + T^4) (0.39 - 0.05 (E(T_a) * f / 100)^{1/2}) (1 - 0.6 n^2)$$

При решении описанной системы уравнений с граничными условиями считается, что крупномасштабные конвективные структуры в водоеме формируется в турбулентной среде, а вдоль оси X_1 свойства конвективных образований остаются однородными, что позволяет перейти к решению плоской задачи. Для выделения

крупномасштабных структур в турбулентной среде используется подход, предложенный в работе [6].

Так как решается плоская задача, то уравнение неразрывности допускает введение функции тока ψ :

$$U_2 = \frac{\partial \psi}{\partial x_3}, \quad U_3 = -\frac{\partial \psi}{\partial x_2} \quad (10)$$

В переменных функции тока ψ и вихря φ в безразмерном виде система уравнений (1-3) запишется:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_3} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} \right) - 2(T - T_4) \frac{\partial T}{\partial x_2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_3} \frac{\partial T}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} \right) \quad (12)$$

$$\Delta \psi = \varphi. \quad (13)$$

Здесь T_4 – безразмерное значение температуры максимальной плотности пресной воды. При введении безразмерных переменных приняты: масштаб размеров - $L_m = H$ - глубина водоема; скорости - $V_m = \sqrt{gH}$; времени - $t = \sqrt{(H/g)}$; масштаб коэффициента турбулентной вязкости $\nu_m = H\sqrt{gH}$; температуры - $T_m = 1/\sqrt{\gamma}$:

Для замыкания системы уравнений и вычисления коэффициента турбулентной вязкости ν_T используется известное соотношение $\nu_T = C\varepsilon^{1/3}H^{4/3}$. Скорость диссипации турбулентной энергии ε находится из уравнения баланса турбулентной энергии. После необходимых выкладок, в безразмерном виде, уравнение замыкания имеет вид:

$$\mu^2 = \left(\frac{\nu_T}{H\sqrt{gH}} \right)^2 = \frac{C^3}{s} \int_s \left[4 \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2 \partial x_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} \right)^2 - (T - T_4) \frac{\partial T}{\partial x_3} \right] ds \quad (14),$$

где s – площадь области решения задачи. Коэффициент C подбирается экспериментально. Вопрос выбора коэффициента C обсуждается в [5].

Граничные условия для системы уравнений в переменных функции тока и вихря в безразмерном виде записываются следующим образом.

На дне водоема и правой наклонной боковой границе - условия прилипания и непроницаемости для скорости и отсутствия потока тепла соответственно имеют вид:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x_2} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \psi}{\partial n} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial n^2} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (15)$$

На левой границе области условие симметрии для всех переменных.

$$\frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \quad \psi = 0, \quad \varphi = 0 \quad (16)$$

На верхней границе граничные условия примут вид:

$$-\mu \frac{\partial T}{\partial x_3} = Q^b \quad \frac{\partial \psi}{\partial x_2} = 0, \quad \varphi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = \tau_b = \varphi = \frac{C_D \rho_a V_b^2}{\rho_o \mu} \quad (17)$$

Здесь $Q^b = Q/Q_1$, где в качестве масштабов потоков принята величина $Q_1 = \sqrt{\gamma / c_o \rho_o} \sqrt{gH}$. Индекс b обозначает величины в безразмерном виде.

Параметры задачи

В работе проведен анализ влияния ветра различной силы и направления, на структуру течений в водоеме и местоположения термобара в нем. Время воздействия ветра на водную поверхность составляло $t=0.28$ часа. Начальные поля распределения температуры (T) и функции тока (ψ) (Рис.3), поле вихря (φ) соответствуют случаю, когда лед полностью растаял, но термобар и сопутствующие ему течения зародились и развивались в водоеме, покрытом льдом в центральной части.

Термогидродинамические процессы рассматриваются в водоеме глубиной $H=20$ м и шириной 750 м (половина водоема). Скорость ветра принимает значения: $V=1, 3, 5, 7$ м/с. Направление ветра задается в двух направлениях: к берегу (Рис.4,а) и от берега (Рис. 4,б). Скорость ветра, направленного от берега будем при описании результатов расчета писать со знаком минус (-). Температура атмосферы принимается равной $T_a=8^\circ\text{C}$; относительная влажность воздуха $f=60\%$, балл облачности $n=0$. Поток солнечной радиации, поступающий на поверхность водоема равняется $Q_R=450$ Вт/м².

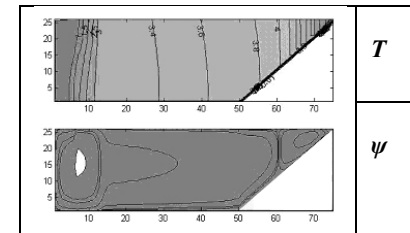


Рис.3. Начальные поля распределения температуры T и функции тока ψ .

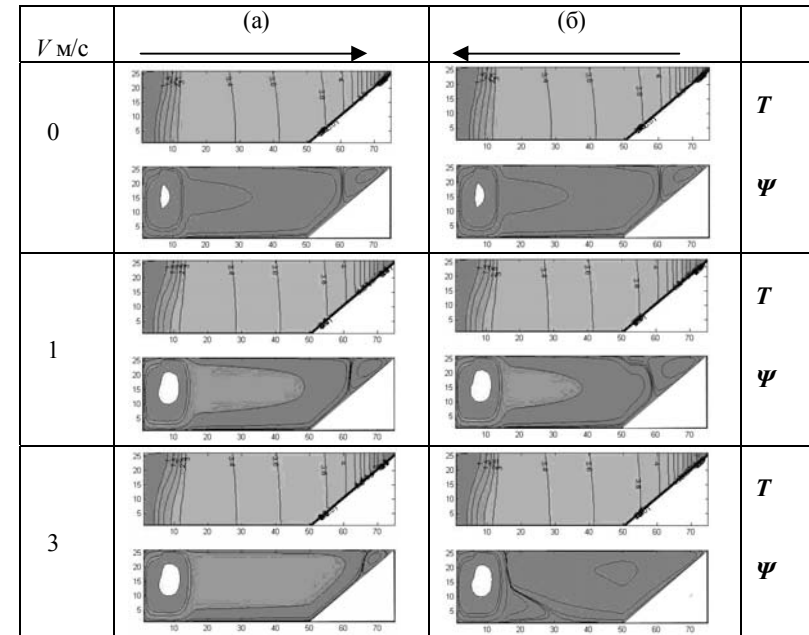
Задача решается численно. Система уравнений (11)-(13), граничные условия (15)-(17), уравнение замыкания (14) записываются в конечно-разностном виде с использованием центральных разностей для аппроксимации пространственных и односторонних для временных производных. Используется явная конечно-разностная схема. Уравнение Пуассона решается методом последовательной верхней релаксации. Расчеты проводятся на сетке 26×75 .

Обсуждение результатов математического моделирования

Поток солнечной радиации, поступающий на поверхность водоема за время расчета, способствовал продвижению термобара от берега к центральной части водоема. При отсутствии ветрового воздействия на поверхность воды, структура

течений и распределение температуры в водоеме через $t=0.28$ часа представлены на Рис. 4 ($V=0$ м/с). В этом случае в водоеме образуются две циркуляционные ячейки, сходящиеся в районе термобара (изотермы 4°C). Прибрежная конвективная ячейка вращается против часовой стрелки, а глубинная – по часовой, внутри которой существует глубинный вихрь, вращающийся в том же направлении.

Ветровое воздействие существенно изменяет структуру течений. При ветре, направленном к берегу (Рис. 4(a)) друг другу противостоят две силы. Сила, связанная с плотностной неустойчивостью (вследствие аномальной зависимости плотности воды от температуры) приводит к образованию термобара и конвективных структур справа и слева от него. Прогрев водоема способствует перемещению термобара к центру водоема. Этой силе противодействует сила, связанная с ветровым воздействием, направленная к берегу. Как видно из Рис. 4(a), при $V=1$ м/с, ветровое воздействие практически не оказывает влияние на распространение термобара и размер вихревых структур по обе стороны от него. При увеличении скорости ветра до 5 м/с, прибрежный вихрь еще существует. Однако он уменьшается в размере и смещается к берегу. При $V=7$ м/с он полностью исчезает. Таким образом, уже при небольших скоростях ветра, направленного к берегу ($V=3$ м/с) и непродолжительном времени его воздействия на водную поверхность ($t=0.28$ часа) силы, связанные с напряжением трения ветра, подавляют конвективный прибрежный вихрь. Изотерма 4°C , которая при отсутствии ветрового воздействия определяла месторасположение термобара, за это время практически не смещается к центру водоема.



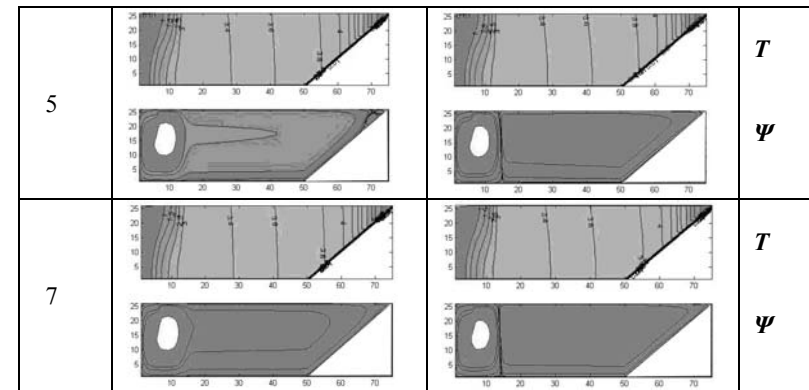


Рис. 4. Поля распределения температуры (T) и функции тока (ψ) для скоростей ветра $V=0, 1, 3, 5, 7$ м/с. (а) – ветер направлен к берегу и (б) - ветер направлен от берега.

При ветре, направленном от берега (Рис. 4(б)), плотностная неустойчивость, способствующая перемещению термобара от берега, и ветровое воздействие оказывают влияние в одном направлении. При $V=1$ м/с прибрежный вихрь увеличивается в размере по сравнению со случаями $V=0$ и 1 м/с. Область опускания поверхностных вод перемещается к центру водоема. Увеличение скорости ветра до $V=3$ м/с способствует так же увеличению прибрежного вихря. На поверхности водоема он достигает глубинного вихря (ГВ), сформировавшегося в районе ледового покрова внутри антициклонического вихря, слева от ТБ. При скоростях ветра $V=5$ и -7 м/с циклонический прибрежный вихрь полностью занимает область водоема от берега до ГВ. При скорости ветра $V=7$ м/с изотерма 4°C смещается на 50 м ближе к центру водоема, по сравнению с ее перемещением в случае скорости ветра $V=0$ м/с.

Сравнение случаев $V=1$ м/с (Рис. 4(а)) и $V=-1$ м/с (Рис. 4(б)) показывает, что даже небольшой по силе ветер меняет картину течений в водоеме. Образовавшиеся вихри имеют разный размер и разный наклон в области их схождения, в соответствии с направлением ветра. В случае увеличения скорости ветра, направленного к берегу, антициклонический вихрь постепенно захватывает весь водоем, сохраняя при этом в центре глубинный вихрь.

В противном случае, прибрежный циклонический вихрь постепенно увеличивается в размере и охватывает водоем до границы ГВ, который, в свою очередь, препятствует дальнейшему его распространению к центру.

Следует отметить, что с увеличением скорости ветра, область дивергенции водных масс и фронтальный раздела с температурой максимальной плотности (термобар) отстоят друг от друга все на большее расстояние. Таким образом, трактовка термобара как области схождения водных масс в районе изотермы 4°C неправомерна уже при небольших скоростях ветра.

Заключение

Показано, что ветровое воздействие имеет существенное влияние на структуру течений. Скорость и направление ветра определяют поведение и время жизни циркуляционных вихревых структур в водоеме, зону их схождения и месторасположение изотеры 4°C.

При больших скоростях ветра, направленного от берега, в водоеме доминирует прибрежный циклонический вихрь, занимающий область водоема до глубинного вихря (зародившегося у кромки льда). После достижения им границы ГВ, который препятствует дальнейшему его перемещению, резко замедляется увеличение размера прибрежного вихря и скорость перемещения его к центру водоема.

В случае скорости ветра, направленной к берегу, прибрежная циркуляция постепенно вытесняется конвективным вихрем, зародившейся слева от термобара. При этом глубинный вихрь практически не влияет на картину течений.

Показано, что трактовка термобара как области схождения водных масс в районе изотермы 4°C неправомерна уже при небольших скоростях ветра. Работа выполнена при финансировании РФФИ (гранты № 08-05-00574-а).

Литература

1. Блохина Н.С., Орданович А.Е. Влияние ледового покрова водоема на развитие весеннего термобара // ВМУ. 2012. №1. с. 113-118.
2. Блохина Н.С., Орданович А.Е. Особенности течений в пресных водоемах частично покрытых льдом весной // Физические проблемы экологии (экологическая физика), изд-во М.: МАКС пресс. 2011. № 17. с.54-63
3. Блохина Н.С., Соловьев Д.А. Влияние ветра на динамику развития термобара в период весеннего прогрева водоема// ВМУ. Серия 3 Физика. Астрономия. 2006. № 3. с. 59-63.
4. А. Гилл, Динамика атмосферы и океана, т.1. М.: изд-во «Мир». 1986. 397с.
5. Т.Б. Глуховская, А.Е. Орданович. О турбулентной конвекции в плоском горизонтальном слое // Механика жидкости и газа. 1993. №6. с.49-56.
6. Ковалев В.А., Орданович А.Е. Физико-математическая модель турбулентного горизонтального стратифицированного потока с учетом когерентных структур // Ч.1. Построение модели. М.: Деп. ВИНТИ.1981.№2771-81.
7. Д.А. Соловьев, Н.С. Блохина Лабораторное исследование влияния ветра на динамику развития термического бара // Океанология. 2010. т.50. №6. с.1-6.
8. Тихомиров А.И. О термическом баре в Якимварском заливе Ладожского озера. //Изв. Всесоюзного географического общества т. 91. № 5. 1959. с.424-438.
9. Тихомиров А.И. О термическом баре Ладожского озера // Изв. ВГО. т.95. вып. 2. 1963. с.134-142.
10. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л.: Наука. 1982. 232 с.
11. Форель Ф.А. Руководство по озераведению (общая лимнология).- СПб., 1912. 196с.
12. А.Х. Хргиан, Физика атмосферы. Л.: Гидромет. изд-во. 1969. 647 с.
13. Malm J. Thermal Bar Dynamics - Springtime Thermo- and Hydrodynamics in Large Temperate Lakes. PhD. Dissertation, Rep. 1012, Dept. of Water Resources Eng., Lund Univ., Sweden. 1994. 248pp.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ПРИЛИВНОЙ ДИНАМИКЕ МОРЯ И ЭКСПРЕССИИ ГЕНОВ

Г.И. Бортникова

Ногинский филиал Московского государственного областного университета

Анализируя эволюцию формы Земли, ее климата и уровня вод в геологических и более коротких периодах, Б.Л. Личков обосновал их как ответ на приливные изменения гравитационного поля. Результатом таких изменений являются колебания экологических условий, которыми обусловлены столетние циклы уловов сельди в Атлантическом океане [1]. Из этого заключения очевидно наличие биологического ритма популяции рыб, который связан с динамикой энергии гравитационного поля Земли. Изучение биологических ритмов у организмов разного уровня сложности обнаружило колебания функций, синхронных приливным изменениям гравитационного поля. Так, у морских равноногих ракообразных, как в естественных условиях, так и в аквариуме, существует около-14-дневный ритм плавательной активности [2]. В лаборатории описана полулунная миграция рачков, которая имеет сдвиг фазы спонтанной приливо-отливной активности по отношению к максимуму прилива [3,4]. У мальков радужной форели максимальный рост наблюдается в ново- и полнолуние [5]. Гравитация усиливает различия акропетального и базипетального цитоплазматических потоков у гидры [6], создает метаболические градиенты в развивающемся яйце [7]. Однако, приливные ритмы характерны не только для организмов, обитающих в воде. С фазами Луны меняется уровень циркадной активности ацетилхолинэстеразы в ретикулярной формации ствола мозга мышей [8]. Е. Graviion наблюдал динамику роста корней рассады в питательном растворе в зависимости от фаз Луны. В период от ново- до полнолуния увеличение степени прорастания в первой и третьей четверти чередовалось с ее снижением [9]. На возникновение энантиотропизма у мягкой пшеницы влияет долгопериодная составляющая силы тяжести [10]. В лаборатории экологические условия остаются постоянными, но колебания функций, связанные с приливными изменениями гравитационного поля Земли, сохраняются. В настоящее время механизм влияния приливных изменений гравитационного поля непосредственно на организм находится на стадии разработки.

Вследствие суточного вращения Земли относительно Луны и Солнца, величина напряженности непрерывно и закономерно меняется во времени. Длительность лунных суток 24 ч 50 мин, лунно-полусуточная составляющая изменяется в пределах от 6 до 18 часов. Совместное с Солнцем действие Луны вызывает появление колебаний напряженности гравитационного поля Земли месячных и полумесячных периодов (29,53 и 14,76 суток). Величина приливных изменений напряженности в максимуме их суммарного влияния составляет $2,4 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$ [11]. Однако, несмотря на малую величину, следствием приливного воздействия являются океанические приливы высотой до 14 м.

Таким образом, одна сторона действия гравитационного поля – это изменение условий, являющихся естественной средой обитания для живой природы. Другая, его синхронное влияние на биологические системы разного уровня сложности, т.к. установлено, что тонкие биохимические механизмы адаптации орга-

низма к внешним условиям отражаются в особенностях его тканевой и внутриклеточной среды, включая структурный и молекулярный уровень. Поэтому актуальность изучения непосредственного действия гравитационного поля на массы обусловлена еще и тем, что для живых организмов оно является не только энергетическим фоном, как для Земли и ее сред, но и информационным, возможно, «настраивающим» метаболизм на динамику жизненно важных условий.

Гипотеза механизма взаимодействия гравитационного поля и массы.

В физике механизм взаимодействия гравитационного поля и массы до настоящего времени не разработан и это обстоятельство тормозит решение множества вопросов в разных областях науки, в том числе, в биологии и медицине. Поэтому для решения этой проблемы актуальными являются новые, нетрадиционные представления и подходы. Таким новым представлением стала общая теория относительности А. Эйнштейна. В астрофизике больших масс и скоростей, сильных гравитационных полей, в квантовой механике, эта теория широко востребована. Однако, ее потенциал в области слабых гравитационных полей, где применим закон Всемирного тяготения И. Ньютона, до настоящего времени практически не использован. Поэтому была предпринята попытка подойти к пониманию возможного механизма течения некоторых процессов с точки зрения влияния на них переменного гравитационного поля, взаимодействия его геометрических свойств и масс.

Предположим, что масса (m) в интервале постоянного гравитационного поля центральной массы (M), которое является для нее фоном (m_ϕ), создает к нему градиент энергии (ΔE_m):

$$\Delta E_m = -(m - m_\phi) c^2, \quad (1)$$

искривляющий пространство интервала в виде собственного гравитационного поля (средние g_m и r), соответствующего закону тяготения. Если учесть, что в интервале постоянного гравитационного поля существует градиент его энергии по направлению к центральной массе (разное m_ϕ), то искривление поля массой m различно в разных направлениях, поэтому ее гравитационное поле будет постоянным и неоднородным. При движении центральной массы по эллиптической орбите, неоднородная энергия интервала периодически изменяется. Тогда градиент энергии массы m в интервале, будет изменяться вместе с фоном (m_ϕ) как по разным направлениям, так и во времени.

Соответственно основному уравнению гравитационного поля, при заданных начальных условиях все тела в нем вне зависимости от их массы движутся следующим образом

$$a = -grad u, \quad (2)$$

a - ускорение тела в постоянном гравитационном поле, $grad u$ - градиент потенциальной энергии на определенном интервале. Из уравнения следует, что разность напряженностей интервала M в пространстве при изменении во времени $\Delta t = (t+1) - (t-1)$ обуславливает появление между силовыми линиями и эквипотенциальными поверхностями границ интервала относительного ускорения $a = \Delta g$ [12]. Поэтому в динамике приливная волна относительно геометрического центра массы изменяется по эллиптической форме с неравными радиусами, образуя два разных полупространства (приливное неравенство). Одно полупространство имеет меньшую энергию (полупространство апогея для Солнца, A - полупространство

для любых масс), другое – большую энергию (полупространство перигелия для Солнца, П - полупространство для любых масс). Интервал изменяющейся напряженности гравитационного поля массы связан с ней интервалом времени ее изменения в двух полупространствах. Например, для центральной массы

$$M = \frac{g_1^2}{4\gamma} \left(\frac{g_1 g_2}{\sqrt{g_1} - \sqrt{g_2}} \right)^2, \quad (3)$$

где Δt - интервал времени изменения средней величины напряженности, обусловленной массой (g_i) на среднем расстоянии R от геометрического центра, от g_{t-1} до g_{t+1} , соответствует $2\Delta R$, γ – гравитационная постоянная. В этом же интервале можно описать геометрические свойства поля с помощью кривизны ($K = a/R$) – как относительного ускорения (a) изменения относительного расстояния при $R = 1$ м:

$$K = \frac{g}{2R^2} \sqrt{\frac{g_1}{g_{t+1} g_{t-1}}} (\sqrt{g_{t-1}} - \sqrt{g_{t+1}}), \quad (4)$$

в формулу которой входит удвоенный эксцентриситет (e):

$$2e = \sqrt{\frac{g_1}{g_{t+1} g_{t-1}}} (\sqrt{g_{t-1}} - \sqrt{g_{t+1}}), \quad (5)$$

связанный с изменением относительного расстояния (например, между апогелием и перигелием приливной волны относительно Солнца).

Однако, вследствие переменной напряженности интервала приливной волны поля центральной массы, минимальная (фоновая) периодичность гравитационного поля массы m в нем (кривизна, $K_m = a_m/r$), оказывается также переменной и имеет равную с ним кривизну $K = K_m = K_M$ и период (T) [13]:

$$K = \frac{2e}{R^2}, \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (6,7)$$

Тогда любое гравитационное поле должно быть переменным, а масса в нем сосуществует с собственным гравитационным полем как частица-волна (масса – сложно периодическая приливная волна). Следствием переменности кривизны, является изменение среднего радиуса (r) (длины волны) собственного гравитационного поля m , в виде $\Delta r = \pm e r$. При этом средний радиус, напряженность и относительное ускорение минимальной, равной фоновой, кривизны приливной волны собственного гравитационного поля m обусловлены отношением масс (n) [14],

$$n = \frac{a}{\sqrt{M}}, \text{ отсюда } r = nR, g_m = n^2 g, a_m = n^2 a, \quad (8)$$

За полупериоды возрастания и уменьшения энергии поля интервала M возникают приливные волны противоположно направленных относительных ускорений. На определенных (орбитальных) расстояниях от нее эти волны (основные, связанные с центральной массой) могут обращать массы (например, m). На других расстояниях приливная волна периода обращения (модулирующая, связана с фиктивной массой, массой-феей, МФ) складывается с приливными волнами других периодов и образуется суммарное сложно периодическое изменение энергии гравитационного поля в каждой его точке. Например, приливная волна с примерным периодом $T = 29$ суток (1992 г., апогей 14 августа, $6,4 \cdot 10^8$ м, перигей 28 августа, $5,6 \cdot 10^8$ м, средний радиус $R = 6 \cdot 10^8$ м, эксцентриситет $e=0,064$) на орбитальном расстоянии движет Луну. Физическое время этой приливной волны, соответствующее изменению напряженности между апогеем и перигеем, $\Delta t = 2 \cdot 10^5$ с = 2, 3 суток, кривизна по вертикали $K = 6,4 \cdot 10^{-12}$ с⁻². На расстоянии среднего радиуса Земли ($r = 6,4 \cdot 10^6$ м) эта волна создает модулирующее колебание, которое смещает эквипотенциаль-

ную поверхность на противоположных ее сторонах $\pm \Delta g = e g = 0,41 \cdot 10^6 \text{ м} = 410 \text{ км}$ с относительным ускорением $\pm a = K g = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$, соответствующим локальным изменениям поля Земли под действием некоторой массы, $M_F = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ кг}$. Очевидно, что все слои Земли, ее гидросфера и атмосфера, будут отражать приливные изменения собственного гравитационного поля, что скажется на их динамике и изменении механических и других свойств, которые, в частности, достоверно установлены в их внутригодовых и многолетних вариациях (15).

Отношение n делает приливные волны полей M и m подобными, в связи с этим относительные характеристики поля и движения, а также геометрические изменения в соответствии с ними, у разных по величине масс в одном интервале поля центральной массы M синхронны. Это предствление соответствует известной синхронности в тектонических движениях земной коры [11]. В многолетних исследованиях, проведенных на биологических, химических объектах и процессах разной природы, С.Э. Шноль и его сотрудники, обнаружили и доказали существование самопроизвольных синхронных флуктуаций, которые, по предположению авторов, обусловлены влиянием космофизических факторов [16,17,18]. Поэтому изменения параметров масс, в случае их зависимости от собственных гравитационных полей, можно сопоставлять с ходом параметров поля центральной массы в интервале. При этом полученные результаты необходимо интерпретировать как зависимость от геометрических свойств собственных гравитационных полей, которые выражены приливными волнами с характерными для них особенностями деформаций силовых линий и эквипотенциальных поверхностей. Фоновым для массы Земли в интервале является гравитационное поле Солнца. Напряженность годовой приливной волны изменяется в вертикальной (плоскости эклиптики) и горизонтальной (плоскости, перпендикулярной направлению Солнце-Земля) плоскостях с относительными ускорениями.

Динамика эксцентриситета при колебаниях энергии гравитационного поля сопровождается разными по скорости изменениями плотности силовых линий и эквипотенциальных поверхностей, т.е. относительными ускорениями (a), зависящими от относительных расстояний в интервале приливной волны. В общем случае, относительное вертикальное ускорение a :

$$a = \frac{g}{1 - \epsilon^2} = K l = l \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2, \quad (9,10)$$

где l - относительное расстояние.

С этой точки зрения, движение Луны происходит за счет относительного ускорения в приливной волне поля Земли с периодом около 28 суток, а вращение массы Земли – вследствие изменения относительного ускорения приливной волны с периодом около 24 часов. Движения этих масс происходят независимо, в соответствии с динамикой приливных волн, а не под влиянием друг на друга. Однако, в процессе отражения движением Земли геометрических свойств приливных волн в ряде периодов (суточном, годовом и около-28-дневном и долгопериодных) ее расстояния между Солнцем и Луной изменяются. Поэтому относительные ускорения в этих периодах будут влиять на амплитуды непосредственно приливных волн.

Относительные ускорения гравитационного поля в динамике моря.

Чтобы подойти к ответу на вопрос о возможной адаптивной синхронизации гравитационным полем реагирования живого организма и окружающей среды,

возникла необходимость найти естественную модель, позволяющую оценить динамику метаболизма специализированных к восприятию механического стимула клеток и адекватного экологического фактора, одновременно изменяющихся в ответ на действие гравитационного поля. Для этого было выбрано место (г.Курильск) и время, в котором одновременно регистрировали приливной уровень воды и биологический показатель. Данные по уровню воды получены из таблиц приливов [19], приливные изменения напряженности представлены в таблицах [20].

В выбранном интервале времени наиболее выраженными колебаниями напряженности являются около-12-часовые, фрагмент которых показан на рисунке (рис.1)

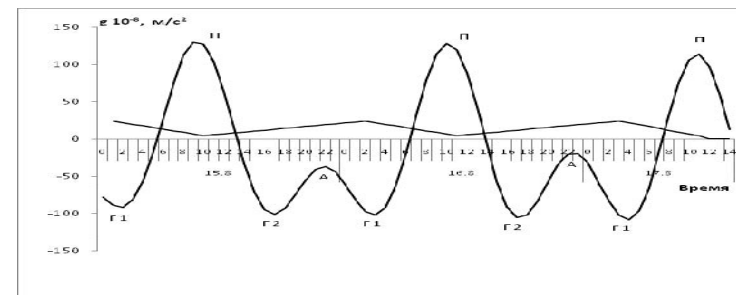


Рис.1. Фрагменты хронограмм приливных изменений напряженности (g) гравитационного поля и уровня воды (ломаная линия, реальные значения увеличены 20^x) по местному времени. Буквами П и А обозначены полупространства, Г – горизонтальная плоскость.

Видно, что приливные изменения имеют не только разную величину, но и разные знаки: положительный знак, связан с возрастанием напряженности поля Земли ($9,8 \text{ м/с}^2$), а отрицательный – с ее уменьшением. При распределении величин приливных значений напряженности по рангу реальные уровни воды (Н, м) во время приливов и отливов связаны с возрастанием напряженности обратной линейной зависимостью (рис.2). Приливы соответствуют отрицательным значениям напряженности (относительным ускорениям возрастания расстояний), а отливы - ее положительным значениям (относительным ускорениям уменьшения расстояний) (рис.3). Уравнение регрессии $H = -0,0038g + 0,65$, где ($g \times 10^8$). Корреляция между фактическими и расчетными данными высока: $k/k = 0,88$ ($n=15$, $P < 0,01$), реальный уровень воды $H = (0,60 \pm 0,10)$ м, а расчетный $(0,67 \pm 0,08)$ м.

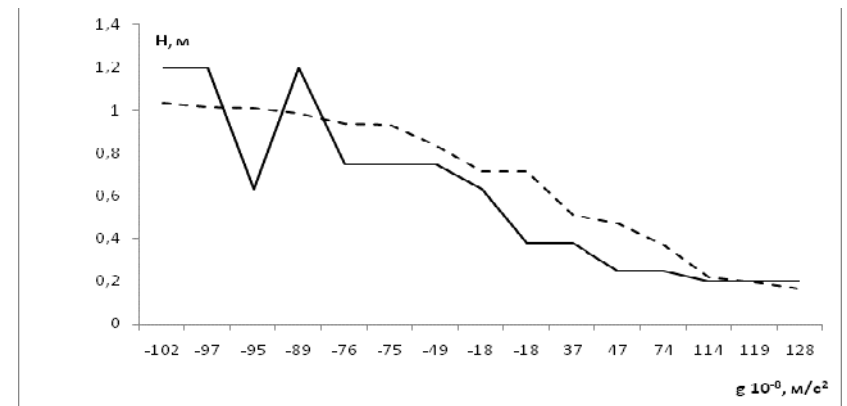


Рис.2. Реальные уровни воды (H) от приливных значений напряженности (g): сплошная линия – реальные уровни, пунктир – расчетные по уравнению регрессии.

Уровень воды, отражает связанную с эксцентриситетом приливных волн динамику геометрических свойств поля. Оценка показывает изменение относительных расстояний между эквипотенциальными поверхностями (1) в приливной волне, которое частично реализуется изменением уровней ее сред, атмосферы, гидросферы и литосферы: ($T=12$ ч и $g = 100 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$): $l = g / K = 10^{-6} / 2 \cdot 10^{-8} = 50$ м. Синхронно с возрастанием приливных значений напряженности увеличивается давление воды на дно моря (вес), что соответствует отливу, а уменьшение напряженности связано с уменьшением веса, что соответствует приливу. Приливная волна (рис.1) должна иметь 2 полупространства, которые, предположительно, показаны на рис. 3а.

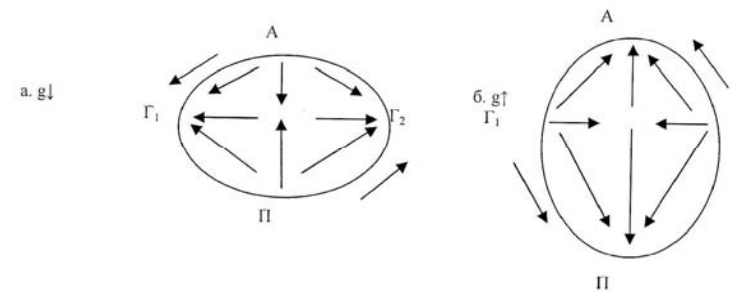


Рис.3. Векторы внутри эллипсоида приливной волны гравитационного поля Земли показывают направления относительных ускорений в ее полупространствах: а. при уменьшении напряженности ($g\downarrow$), б.при возрастании напряженности ($g\uparrow$). Внешние стрелки показывают направление суточного вращения.

Ранее было показано [14], что при уменьшении напряженности происходит уменьшение относительных расстояний по вертикали (со стороны большего уменьшения образуется П-полупространство, со стороны меньшего - А) и увеличение в горизонтальной плоскости (Γ_1 и Γ_2). Если напряженность поля возрастает, то возрастают относительные расстояния по вертикали (со стороны большего возрастания образуется А-полупространство, со стороны меньшего - П) и уменьшаются в горизонтальной плоскости (3б).

Геометрические свойства собственного гравитационного поля клетки.

Одним из удобных объектов для исследования связей между изменениями энергии гравитационного поля, условиями среды обитания и адаптивными к ним метаболическими процессами, являются мигрирующие к месту нереста лососи, которые для осуществления перехода из соленой воды Охотского моря в речную воду адаптируются, находясь в приливной зоне в течение августа - сентября. Изменение уровня воды является важным экологическим фактором, обуславливающим отсутствие или появление приливно-отливных течений разной скорости и направления, насыщенность воды кислородом, изменение температуры, давления, солености, и т.д. Эти условия сопряжены с появлением определенных особенностей движения рыб и связанного с ним уровня метаболизма. Для контроля двигательной активности, в числе других функций, необходима и активизация органа равновесия и инерциальной навигации - вестибулярного анализатора [21].

Одной из наиболее вероятных стратегий биохимической адаптации обмена веществ клетки к среде обитания, является изменение в ней количества или концентрации макромолекул, таких как ферменты и нуклеиновые кислоты [22]. Поэтому в качестве индикатора уровня метаболизма был выбран относительный уровень содержания нуклеиновых кислот в ядрах рецепторов одного из отолитовых отделов вестибулярного анализатора - утрикулуса, практически без порога восприимчивого горизонтальные ускорения. Позднее было установлено, что ритм частоты встречаемости числа ДНК-содержащих тяжей, идущих от политенных хромосом к ядерной оболочке и между хромосомами в клетках слонных желез личинок комаров, имеет окологодовой период с максимумом в октябре [23]. Число таких ядер возрастает при центрифугировании, что указывает на возможность механической, в том числе и гравитационной, причины этих изменений.

Материалы и методы. В г.Курильске (о. Итуруп) 2,6,7 и 12 сентября 1973и 15,16,17 августа 1974 г.г. отлавливали рыб (*Oncorhynchus gorbuscha* W.) в приливной зоне Охотского моря, помещали их в садки в морской воде у берега на глубине 1 м. У 49 особей независимо от пола размером 35-43 см, каждые 2-3 часа выделяли вестибулярный аппарат в хрящевой капсуле, фиксировали его в свежеприготовленном растворе Карнуа в течение часа, затем отмывали и помещали в этанол. Гистохимические исследования проводили в стационарных условиях лаборатории: материал (клетки *maculae utriculi*) окрашивали по Эйнарсону на нуклеиновые кислоты [24]. Серийные срезы фотометрировали. В соответствии с плотностью, выражали относительное содержание нуклеиновых кислот в условиях единицах (С, у.е.). Величину кривизны (К) приливных изменений гравитационного поля рассчитывали по формуле (6), где интервал времени $\Delta t = 2$ ч.

Мониторинг относительного уровня нуклеиновых кислот в ядрах рецепторов утрикулуса рыб через примерно равные интервалы времени выявил колебания с

периодом от 4 до 16 часов, при среднем периоде около 8 часов. Результаты показывают, что колебания относительного содержания нуклеиновых кислот не являются случайным разбросом данных, т.к. средний максимум ($4,31 \pm 0,05$), отличается от среднего минимума ($4,0 \pm 0,02$) (у.е.) достоверно, $P < 0,001$. Поскольку в неделящихся рецепторных клетках количество ДНК неизменно, то очевидно, что динамика относительного содержания нуклеиновых кислот в ядрах рецепторных клеток связана с уровнем РНК. Поэтому относительно постоянный уровень нуклеиновых кислот представлен ДНК, который в хронограмме составляет не меньше минимума. Для лучшей демонстрации колебаний РНК из хронограммы общего содержания нуклеиновых кислот был вычтен его минимальный уровень (рис.4).

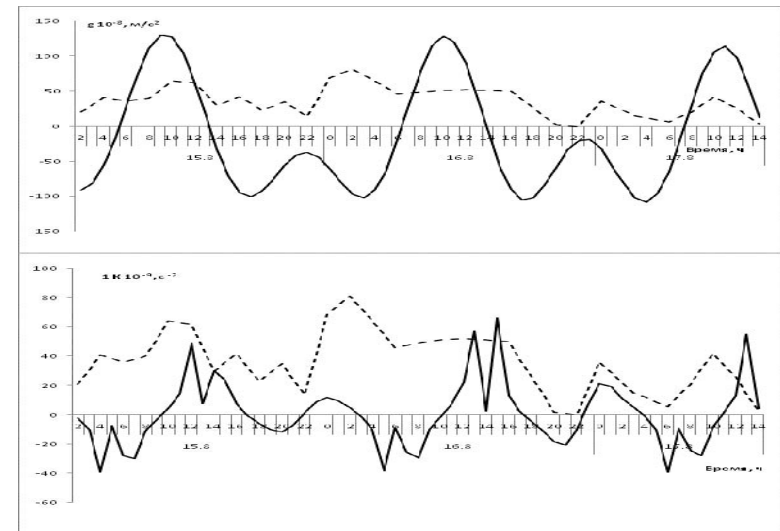


Рис.4. Хронограммы соответствующих местному времени изменений содержания РНК (пунктир), значений напряженности (g) и скорости ее изменения (K) (внизу).

Через одинаковые интервалы времени, как показано ранее [13], по отношению к приливной волне напряженности регистрируется скорость ее изменения с периодом примерно в 2 раза меньшим. Оказалось, что содержание РНК имеет максимум примерно в области $K = 0$ ($K = j \text{ m} / \text{r}^3$), а кривая зависимости почти симметрична относительно нуля (рис.5).

На рис. 5 показана линия регрессии средних по классам значений относительного содержания РНК от соответствующих абсолютных величин кривизны K . Максимальный уровень синтеза в клетках совпадал с минимальным значением ($K \rightarrow 0$) и был с ней наилучшим образом связан показательной функцией: $(K \cdot 10^3)^3$, $C = 4,37 K^{-0,022}$, средние экспериментальные ($4,13 \pm 0,03$) и расчетная ($4,12 \pm 0,01$) значения отличаются недостоверно [25]. Реакция клеток на динамику приливных изменений напряженности гравитационного поля, не имеет какого-либо сходства

с изменением уровня воды. Однако, во время приливов и отливов двигательная активность любых обитателей околоприливной зоны вместе с водой или относительно нее неизбежно возрастает, а значит метаболизм в рецепторных клетках смещается в сторону катаболизма. При неизменном уровне воды, во время уменьшения скорости приливных изменений поля любого направления, обмен веществ смещается в сторону преобладания восстановительных процессов - анаболизма. Можно предположить, что для процессов в клетке, имеющих анаболическую направленность, более адекватна потенциальная энергия гравитационного поля, а для двигательной активности кинетическая энергия, связанная с большим эксцентриситетом. Очевиден приспособительный генетический ответ клеток на динамику относительных ускорений собственного гравитационного поля, связанную с приливной динамикой моря.

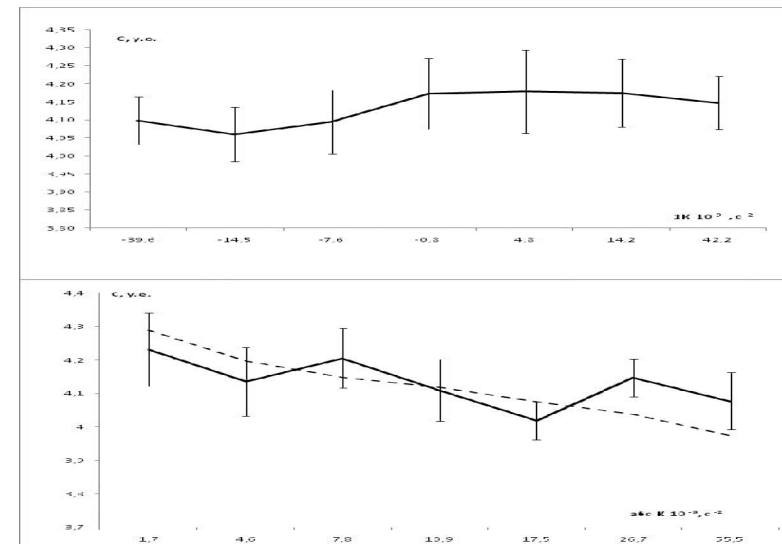


Рис.5. Ход средних по классам значений уровня содержания РНК в ядрах рецепторов (С) в опыте (сплошные линии) и линия регрессии (пунктир) от: кривизны (К) (вверху) и абсолютных ее величин (внизу).

Математические оценки показывают, что гравитационное поле Земли, напряженность которого принято считать постоянной, должно оказывать влияние только на биологические структуры, размеры которых превышают 2 мкм [26]. Оно не может оказывать действие на молекулярные процессы т.к. тепловая энергия субклеточных структур, выраженная в броуновском движении, примерно на 2 порядка больше потенциальной энергии, получаемой ими при воздействии силы тяжести [27]. Сформулирована гипотеза о том, что живые организмы на Земле адаптированы не к силе тяжести, а к средам, сформированным силой

тяжести, которые имеют векторную организацию [28, 29]. При этом обнаружено, что форма, размер, ориентация, но и возрастание включения меченого тимидина в фибробласты, увеличение числа эндотелиальных клеток в культурах, синтезирующих ДНК может быть обусловлена механическим воздействием [30,31,32]. Это означает, что в результате механического воздействия генетический материал клетки может активизироваться. Причем показано, что включение меченого тимидина во время синтеза ДНК сопровождалось его распределением соответственно поляризации клетки во время митоза [33]. Установлен факт пространственно-временной зависимости процессов деления клеток и синтеза в них ДНК: момент повышения синтеза сдвигается в последующие сутки примерно на 1 час [34], что может быть связано с полем, отражаемым также движением Луны. Исходя из вышеизложенного, можно предположить, что векторная организация биологического пространства может быть обусловлена относительными ускорениями приливных изменений собственных гравитационных полей масс клеток, структур и молекул. Оценки движения пробных частиц в условиях гравитационного поля клетки показывают, что в процессе ее деления (митозе) при средней длительности анафазы 15 мин и расстоянии диаметра клетки 10^{-5} м, скорость относительного движения в зависимости от кривизны ($2 \cdot 10^{-2}$ мин⁻²) оказывается $3 \cdot 10^{-6}$ м/мин, что соответствует известному диапазону скоростей движения хромосом ($0,2-5 \cdot 10^{-6}$ м/мин) и реальной средней скорости редупликации ДНК ($1,2 \cdot 10^{-6}$ м/мин) по Алову [35]. Поэтому реальную среду клетки можно представить как систему пробных частиц в ее собственном гравитационном поле. При участии АТФ энергии относительных ускорений приливных изменений собственного гравитационного поля клетки достаточно для создания известных характеристик движения внутриклеточных структур.

Анализ литературы и полученные результаты показывают, что живые организмы любого уровня сложности, являются детекторами механических полей, в том числе и гравитационных. При этом биологические детекторы преобразуют механическую энергию в двигательную активность, рост, структурно - функциональные изменения разного уровня, включая образование нуклеиновых кислот, ферментативных белков и др.. Таким образом, в соответствии с предполагаемым механизмом взаимодействия гравитации и массы, необходимо учитывать, что живые организмы, это также массы, поэтому их собственные гравитационные поля неизбежно связаны с гравитационным полем места обитания. Очевидно, что вода океана, как и уровень синтетической активности клеток, одновременно отражают изменения энергии фонового гравитационного поля Земли в области их расположения. Адекватность динамики содержания РНК в ядрах клеток механорецепторов вестибулярного анализатора рыб приливным изменениям гравитационного поля означает их «вписанность» как во временную организацию функций в организме, так и условий окружающей среды. Приливные волны, по-видимому, могут обуславливать в ядре, как в геометрическом центре массы клетки, и в клетке, необходимые условия для конкретных процессов метаболизма. Этими условиями могут быть механические и геометрические изменения непосредственно организменного и клеточного пространства масс: относительные ускорения, расстояния, направления движения, плотности, объемы и т.д. как жидких сред, так и масс структур и молекул, связанных с их собственными гравитационными полями. Отсюда можно заключить, что биологические ритмы, по-

видимому, являются приливными изменениями гравитационных полей биологических систем разного уровня сложности. Они входят в единый комплекс с изменяющимися условиями окружающей среды и являются адаптивными к ним на основе приливной динамики энергии гравитационных полей.. Поэтому гравитационное поле необходимо оценивать как универсальный физический экологический фактор.

Литература.

1. Личков А.А. О чертах симметрии Земли, связанных с ее гравитационным полем, тектоникой и гидрологией // Земля во Вселенной. М.: Мысль, 1964. 156 с.
2. Parisi V., Mezzadri M. Behavioral strategies in biorhythm of brackish water invertebrates // J. Interdiscip. Cycle Res. 1988. V. 19. N3. P. 201-202.
3. Reid D., Naylor E. Freerunning endogenous semilunar rhythmicity in a marine isopod crustacean // J. Mar. Biol. Assoc. U.K. 1985. V. 65. N 1. P. 85-91.
4. Reid D. Semi-Lunar and seasonal variations in the phasing of the endogenous circatidal rhythm of isopod *Eurydice pulchra* // J. Interdiscip. Cycle Res. 1988. V. 19, N 3. P. 204.
5. Farbridge K., Leatherland J. Lunar periodicity of growth cycles in rainbow trout *Salmo gairdneri* Richardson // J. Interdiscip. Cycle Res. 1987. V. 18. N 3. P. 169-177.
6. Hejnowicz Z., Buchen B., Stevers A. The endogenous Difference in the Rates of Acropetal and Basipetal Cytoplasmic Streaming in *Chara* Rhizoids is Enhanced by Gravity // Protoplasma. 1985. V. 125. N3. P. 219-229.
7. Пальмбах Л.Р. Сила тяжести и развитие позвоночных животных // Проблемы космической биологии. М.: Наука. 1976. т. 33. С. 74-91.
8. Levandowski M. Influence of moon phase of circadian AchE activity in the brain stem reticular formation of mouse under LD 12/12 in comparison with locomotor activity // J. Interdiscip. Cycle. Res. 1988. V. 19. N 3. P. 190-191.
9. Gravion E. Modifications of the growth of seedling roots versus time on scale of copper sulphate solution // Geo-cosmic relations: the Earth and its macro-environment. Amsterdam The Netherland. April 20-th-22-nd. 1989.
10. Сулима Ю.Г. Биосимметрические и биоритмологические явления и признаки у сельскохозяйственных растений. Кишинев: ред.- изд. Отдел АН СССР. 1970. 148 с.
11. Грушинский Н.П., Сажина Н.Б. Гравитационная разведка. М.: Недра. 1981. 391 с.
12. Бортникова Г.И. Масса - гравитационное поле как динамическая система. // Система «Планета Земля»: 200 лет со дня рождения Измаила Ивановича Срезневского. 100 лет со дня издания его словаря древнерусского языка. Монография. - М.: ЛЕНАНД, 2012, С. 313-318.
13. Бортникова Г.И. Гипотеза механизма закономерности Тициуса-Бодде // Молодой ученый. №7. 2009. С. 7-14 (<http://www.moluch.ru/>).
14. Бортникова Г.И. Геометрические свойства гравитационного поля // Молодой ученый. Т.1. №5 (16). 2010. С. 7-14 (<http://www.moluch.ru/>).
15. Сидоренков Н.С., Жигайло Т.С. Астрономические причины anomalно жарких летних сезонов // Физические проблемы экологии (экологическая физика): Сборник научных трудов. Под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева. - Москва, МАКС Пресс, 2011, №17, С. 392-407.
16. Шноль С.Э. О самопроизвольных синхронных переходах молекул миозина в растворе из одного состояния в другое // Вопросы мед. химии. 1958. Т. 4. С. 443-454.

17. Шноль С.Э. Синхронные конформационные колебания молекул актина, миозина и актомиозина в растворах //Сб. Молекулярная биофизика. М.: Наука.1965. С. 56-62.
18. Удальцова Н.В., Коломбет В.А., Шноль С.Э. Возможная космофизическая обусловленность макроскопических флуктуаций в процессах разной природы. Препринт ОНТИ НЦБИ АН СССР. Пушино.1987.96 с.
19. Таблицы приливов на 1974 г. Воды Азиатской части СССР. Л.: изд. Главного управления навигации и океанографии мин. обор.1973.
20. Таблицы за приливные изменения силы тяжести на 1973,1974 г.г. ВНИИ геофизики. М.: Мин. Геологии СССР. 1972,1973 г.г.
21. Lindman H. H. Cellular pattern find nerve supply of the (labyrinth) vestibular sensory epithelia //Acta oto-laryng., suppl. 22. 1969. P. 86.
22. Хочачка П., Сомеро Дж. Стратегия биохимической адаптации. М.: Мир.1977. 398 с.
23. Глазко Т.Т. Однотипные изменения структуры политенных хромосом ядер клеток слонных желез личинок *Chironomus Thummi* под влиянием онтогенетических и экзогенных факторов // Закономерности индивидуального развития живых организмов. М.: Наука.1986.С.30.
- 24.Пирс Э. Метод галлоцианин-хромовые квасцы для выявления нуклеиновых кислот (Эйнарсона) //Гистохимия. М: Иностранная литература. 1962. С.192.
25. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа.1980. 293 с.
- 26.Pollard F. //J. Theoret. Biol. 1965.V.8. P.113-123.
- 27.Таирбеков М.Г., Парфенов Г.Л. Биологические исследования в космосе.// Космич. биол. и авиакосм. мед. 1981. № 2.С.51-60.
- 28.Газенко О.Г., Парфенов Г.П. Космическая биология в третьем тысячелетии // Косм. биол. и авиакосм. мед. 1982.т.16, в.2. С.4-10.
29. Парфенов Г.П. Исследования на микроорганизмах, культурах клеток, грибах, растениях и насекомых // Космическая биология и медицина. М.: Наука, 1987.С.300-311.
30. Попов С.В., Марголис Л.Б. Образование клеточных отростков под действием локальных внешних сил, приложенных к плазматической мембране //Биологические мембраны.1987.Т.7. № 1. С.26-36.
- 31.Brunette D.Mechanical stretching increases the number of epithelial cells synthesizing DNA in culture// J.Cell Sci.1984.V.69.P.35-45.
32. Sheehar G.M., Ansat A., Shaikh D. The effect of mechanical tension on tririated thymidine incorporation (DNA-synthesis) in fibroblasts // J. Sci. and Technol.1984.V. 8. N 1-2. P. 23-29.
33. Ломакина Л.Я. Регуляция биосинтеза ДНК в митотическом цикле // Клеточный цикл. Проблемы регуляции. М.:Наука.1973. С.9-32.
- 34.Савченко Т.В., Романов Ю.А. Топографическое распределение пролиферирующих гепатоцитов в дольке печени интактных крыс на протяжении суток // Бюлл. экспер. биол. и мед. 1989. № 2. С.227-229.
35. Алов И.А. Движение компонентов клетки при митотическом делении //Движение немышечных клеток и их компонентов.Л.ЛЮ: Наука.1977. С.104-120.

НАРАСТАНИЕ И ТАЯНИЕ ЛЬДА В УСЛОВИЯХ АЗОВСКОГО МОРЯ.

А.Е. Букатов, Анд.А. Букатов.

Морской гидрофизический институт НАН Украины

На основе известных соотношений теплового и динамического взаимодействия океана и атмосферы выполнен анализ составляющих теплового баланса для физико-географических условий Азовского моря. Получены оценки времени начала ледообразования и изменения толщины морского льда при его нарастании с учетом таяния.

Введение. Прогнозирование интенсивности образования и таяния льда в акватории Азовского моря представляет интерес для планирования и наиболее рационального использования природных ресурсов в этом районе. Лед на Азове является важным компонентом гидрологического режима в зимний период. Он оказывает влияние на динамику моря за счет своей массы, упругости и сил взаимодействия между льдинами [1].

Началом холодного периода принято считать переход температуры через ноль. Для прибрежных станций на Азовском море самый ранний переход отмечается 28 ноября в Таганроге, самый поздний – 06 января – в Керчи. Зимний сезон наиболее длителен на северном побережье Азовского моря – 108 дней в Таганроге. На южном берегу его длительность существенно меньше и составляет 78 – 80 дней. Устойчивый переход температуры воздуха через -5°C отмечается только в Мариуполе, Таганроге и небольшой части Таганрогского залива. На побережье длительность указанного периода составляет 35 – 36 дней. Устойчивый переход через -10°C и ниже для Азовского моря отсутствует. Самые низкие суточные температуры наблюдаются в январе и феврале при вторжениях арктического воздуха в тылу циклонов. Температура воздуха при этом может понижаться до -32°C на севере и до -26 – -29°C на южном побережье. Последние отрицательные значения минимальных температур отмечаются на прибрежных станциях в мае, а первые – в октябре [2].

Современное повышение температуры воздуха в этом районе наиболее выражено зимой и в первой половине весны. Это проявляется в изменении суровости зим. За последние 30 лет повторяемость умеренных зим составила 42 %, мягких 48 %, суровых 10 %. (За период в 120 лет 43 %, 36 %, 21 % соответственно) [3]. Так же типичным стало более раннее образование льда. Увеличилась вероятность появления льда в декабре, как в мягкие так и в умеренные зимы. В январе в умеренные зимы прослеживается пониженная ледовитость. Непостоянство ледовых условий в зависимости от суровости зим является основной особенностью ледового режима Азовского моря. Продолжительность ледового сезона зависит от района моря (от 122 дней в вершине Таганрогского залива до 61 дня в южных районах моря). Наиболее мощный (практически пресный) лед образуется в Таганрогском заливе, его среднемноголетняя максимальная толщина составляет 42 см. В южных районах максимальная среднемесячная толщина 21 – 26 см. В суровые зимы толщина льда может достигать 80 см в Таганрогском заливе и 44 см в южных районах. Например, в зимний сезон 2005 – 2006 годов с 6 по 22 февраля толщина льда в Таганрогском заливе составляла 50 – 70 см [4]. Так как глубина Азовского

моря невелика и запас тепла незначителен, ледовые условия на море могут резко меняться при изменении погодных факторов. Зимой возможно неоднократное появление и исчезновение льда. В среднем отмечается 3 – 6 случаев очищения ото льда, а в некоторых пунктах в отдельные годы число очищений достигает 10 – 12. В разгар зимы ледяной покров может покрывать всю акваторию Азовского моря и образовывать почти сплошной припай, а в отдельные годы большая часть моря остается свободной ото льда.

Наряду с циркуляционными факторами на процессы появления и исчезновения ледяного покрова влияет и солнечная радиация. В осенне-зимний период ее влияние уменьшается, так как над морем преобладает пасмурная погода. В период таяния льда значительно увеличивается число ясных дней. Наличие снега на льду оказывает заметное влияние на его радиационные и прочностные характеристики. Толщина снежного покрова на припаях, по данным прибрежных гидрометеостанций, невелика. Ее минимальные значения составляют несколько сантиметров, а максимальные превышают 30 см вдоль северного побережья Таганрогского залива. В остальных районах толщина снега составляет округленно 20 – 25 см (за исключением Керчи). Наибольшая толщина снежного покрова отмечается в январе-феврале. При этом снежный покров на Азовском море весьма неустойчив [2].

Общей закономерностью является то, что температура поверхности тонкого льда обычно значительно отличается от температуры воздуха. Для толстого же льда температура верхней поверхности льда близка к температуре воздуха [5]. По данным работы [6] для Арктики, при наблюдении за образованием молодого льда в разводье в январе месяце, температура льда и воздуха фиксировались в первые сутки -4°C (лед) и -18°C (воздух на высоте 0.01 м). Для Байкала [7] температура воздуха на поверхности чистого льда на 1 – 2°C выше, чем температура спокойного воздуха в тихую погоду на высоте 2 м, а температура льда под полуметровым снежным покровом на 3 – 4°C ниже температуры воды под ледяным покровом. Средняя температура на поверхности слоя льда в средней части южной оконечности Байкала -0.5°C , а воздуха -1.3°C на высоте 2 м. В центральном и северном районах озера соответствующие температуры поверхности льда и воздуха равны -0.9 , -2.3°C и -1 , -2.2°C .

Морской лед является фактором, активно влияющим на процессы взаимодействия моря и атмосферы. С одной стороны, ледяной покров существенно препятствует теплообмену между двумя средами. С другой стороны, наличие ледяного покрова определяется интенсивностью процессов теплового и динамического взаимодействия между океаном и атмосферой. Интенсивное ледообразование способствует конвективной циркуляции в верхних слоях моря, обусловленной быстрым охлаждением и осолонением поверхностного слоя воды. Активное же таяние способствует быстрому опреснению поверхностного слоя [6].

Из всего количества коротковолновой радиации, поступающей от Солнца во время таяния льда, в воду проникает только около 5 – 10 % [8]. Талые воды образуют сравнительно тонкий поверхностный слой воды пониженной плотности. Толщина этого слоя в основном определяется интенсивностью волнения, в результате которого вода хорошо перемешивается. В более глубоких слоях из-за резкого возрастания градиента плотности перемешивание быстро ослабевает. Поэтому поглощенное водой тепло концентрируется в пределах этого поверхностного слоя. Талые воды, препятствуя перемешиванию и поступлению тепла из глубинных

слоев к поверхности в период охлаждения моря, способствуют быстрой потере теплозапаса поверхностного слоя и новому образованию льда.

В настоящее время выполнено большое количество теоретических и экспериментальных исследований, посвященных тепловому балансу многолетнего ледяного покрова Арктического бассейна, включая роль разводьев и молодых льдов в общем тепловом балансе [6, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Используя основные положения и методы этих работ, оценим влияние потоков тепла (турбулентного потока тепла, коротковолнового и длинноволнового радиационного балансов) на процессы таяния и нарастания льда на Азовском море.

Оценка потоков тепла. Для вычисления суммарного потока тепла на границе снег (лед) – атмосфера, используется формула $\Phi = H + LE + Rg + F$, где H , LE – вертикальные турбулентные потоки явного и скрытого тепла; Rg , F – длинноволновой (ДРБ) и коротковолновой (КРБ) радиационный балансы.

Для определения турбулентных потоков явного и скрытого тепла можно использовать [6,10] интегральные аэродинамические формулы

$$H = \rho c_p St u (T_0 - T), \quad (1)$$

$$LE = L' \rho Da u [q_0 - q], \quad (2)$$

где T , u – температура воздуха и скорость ветра на высоте 2 м; T_0 – температура верхней границы снежно-ледового покрова, St , Da – числа Стэнтона и Дальтона, принимаемые при расчетах равными 0.0017; ρ , c_p – плотность и теплоемкость воздуха; L' – удельная теплота испарения; q_0 и q – удельная влажность подстилающей поверхности и воздуха. Величины q_0 и q вычисляются по формулам

$$q_0 = \frac{0.622e_0}{p} 10^{\frac{a_1(T_0-273)}{b_1+(T_0-273)}}, \quad q = \frac{0.622e_0 f}{p} 10^{\frac{a_1(T-273)}{b_1+(T-273)}} \quad (3)$$

полученным при условии определения максимальной упругости водяного пара с помощью формулы Магнуса. Здесь $e_0 = 611$ Па; $a_1 = 7.45$ и $b_1 = 235$ – эмпирические коэффициенты; p – атмосферное давление, f – относительная влажность (для условий зимнего Азова обычно высокая- 70-80%).

Значение Rg , характеризующее длинноволновой радиационный баланс, можно получить, используя формулу Ангстрема [6], линеаризованную относительно $T_0 - T$, с параметрическим учетом облачности:

$$Rg = \varepsilon_{1,2} \sigma T^3 [T(a + b10^{-ce}) + 4(T_0 - T)] \cdot (1 - Cn), \quad (4)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана; $\epsilon_{1,2}$ – излучательная способность льда или снега; n – балл общей облачности; $a = 0.18$, $b = 0.25$, $c = 0.000945$, $C = 0.82$ – эмпирические коэффициенты; e – парциальное давление водяного пара в атмосфере.

Расчет коротковолнового радиационного баланса поверхности можно провести по Формуле Зиллмана с параметризацией влияния облачности по Маршуновой:

$$F = - \frac{S_L \cos^2 z_\odot (1 - \alpha_{1,2})(1 - i_0)(1 - Cn)}{(\cos z_\odot + 2,7)e \cdot 10^{-5} + 1,085 \cos z_\odot + 0,1}, \quad (5)$$

где S_L – солнечная постоянная; z_\odot –солнечный зенитный угол; $\alpha_{1,2}$ – альbedo снега или льда, i_0 – коэффициент, определяющий, какая часть коротковолновой радиации поглощается в толще ледяного покрова.

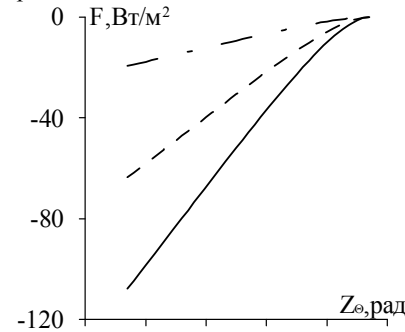


Рис.1. – Зависимость коротковолнового радиационного баланса от величины солнечного зенитного угла и облачности.

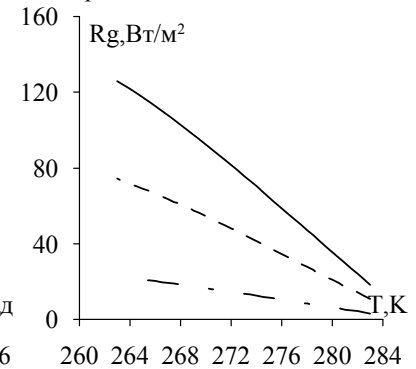


Рис.2. – Зависимость длинноволнового радиационного баланса от температуры воздуха и облачности.

На Рис.1 представлены полученные графики зависимости F от величины солнечного зенитного угла (угла между нормалью в точке наблюдения и направлением на Солнце), при его значениях, примерно соответствующих декабрю при продолжительности дня 10 часов и максимальной величине угла 67.35° . Парциальное давление пара принималось соответствующим температуре поверхности снежно-ледяного покрова, а альbedo его поверхности полагалось равным 0.6 (среднее значение для снега). Коэффициент поглощения снежно-ледяного покрова и солнечная постоянная задавались равными 0.3 и 1367 Вт/м^2 . Сплошная, штриховая и штрихпунктирная линии соответствуют значениям, полученным при облачности 0, 50 и 100 %. Видно, что с увеличением зенитного угла величина коротковолнового баланса убывает. При отсутствии облачности его максимальное по модулю значение составляет 107.64 Вт/м^2 . Соответствующие значения при 50% и 100% облачности равны 63.51 и 19.38 Вт/м^2 . При продолжительности дня 10 часов 30 минут и максимальной величине зенитного угла 60.76° , соответствующих фев-

рало графики распределения F по z_{\ominus} качественно аналогичны приведенным на Рис. 1. Максимальные величины КРБ при этом равны 140.64, 82.98, 25.32 Вт/м² для облачности 0, 50, 100%.

Длинноволновой радиационный баланс вычислялся в диапазоне изменения температуры воздуха T от -10 до 10°C. Температура поверхности снежно-ледового покрова принималась равной 0°C. Полученные зависимости Rg от температуры изображены на Рис.2 при облачности 0, 50, 100% сплошной, штриховой и штрихпунктирной линиями. Они показывают, что с увеличением T в рассматриваемом диапазоне ДРБ практически линейно убывает. Увеличение облачности приводит к уменьшению значений Rg и скорости убывания с ростом температуры.

Турбулентные потоки явного H (сплошная линия) и скрытого LE (штриховая линия) тепла, полученные для того же температурного режима, что и ДРБ (Рис.2), приведены на Рис.3. Они соответствуют скорости ветра 2 м/с и относительной влажности воздуха 70%, наиболее характерной для Азовского региона в зимний сезон. Графики свидетельствуют о том, что при выбранных значениях параметров зависимость потока явного тепла от T практически линейная. Скорость его изменения с увеличением температуры воздуха больше, чем скорость изменения потока скрытого тепла.

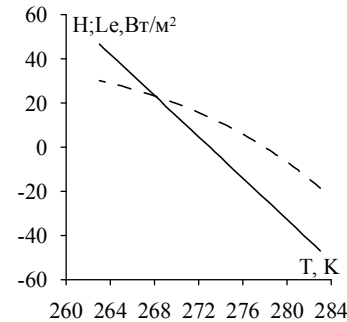


Рис.3. – Влияние температуры воздуха на турбулентные потоки явного и скрытого тепла.

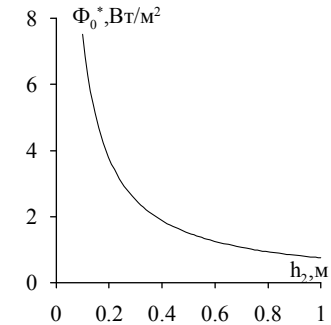


Рис.6. – Величина потока тепла от моря, при которой прекращается нарастание льда заданной толщины.

Оценка времени начала ледообразования. Для определения момента начала ледообразования воспользуемся методом, описанным в работах [5, 12]. Интегральные уравнения балансов тепла и солей

$$\int_0^{h_{j+1}} \gamma S_{j+1} dz = \int_0^{h_j} \gamma S_j dz + \int_{h_j}^{h_{j+1}} \gamma S_j dz + \int_{t_j}^{t_{j+1}} \phi dt +$$

$$+ \int_{t_j}^{t_{j+1}} k_{\omega} \gamma \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=h} dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} \int_0^{h(t)} \gamma W \frac{\partial S}{\partial n} dz dt, \quad (6)$$

$$\int_0^{h_{j+1}} c_{\omega} \gamma \theta_{j+1} dz = \int_0^{h_j} c_{\omega} \gamma \theta_j dz + \int_{h_j}^{h_{j+1}} c_{\omega} \gamma \theta_j dz + \int_{t_j}^{t_{j+1}} \Phi dt +$$

$$+ \int_{t_j}^{t_{j+1}} \lambda_{\omega} \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z+h} dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} \int_0^{h(t)} c_{\omega} \gamma W \frac{\partial \theta}{\partial n} dz dt, \quad (7)$$

определяют температуру θ и соленость S воды в слое конвективного перемешивания и могут быть использованы для расчета даты. Здесь h_j, h_{j+1} - толщина верхнего однородного слоя на моменты t_j и t_{j+1} ; c_{ω} и γ - удельная теплоемкость и плотность морской воды.

Левые части этих уравнений характеризуют теплозапас и содержание солей в слое конвективного перемешивания толщиной h_{j+1} на момент времени t_{j+1} . Первые члены правой части характеризуют запас тепла и солей в момент времени t_j в слое толщиной h_j . Вторые слагаемые показывают приток тепла и солей за счет изменения толщины слоя конвекции от h_j до h_{j+1} . Третьи члены суммы определяют приток тепла и солей в результате теплообмена с атмосферой и процессов осолонения или опреснения поверхностных вод, а четвертые – в результате турбулентной диффузии между слоем конвекции и нижележащими слоями за интервал времени $\Delta t = t_{j+1} - t_j$. Коэффициенты турбулентной теплопроводности λ_{ω} и диффузии k_{ω} следует определять независимым способом. Последние слагаемые в уравнениях характеризуют адвекцию тепла и соли со скоростью течения W в направлении \bar{n} . Глубина конвективного перемешивания определяется из условия $\gamma_{j+1} \leq \gamma_j(h_{j+1})$, чтобы плотность воды в слое конвекции была не больше плотности в подстилающем слое. В случае вынужденной конвекции за счет ветрового перемешивания, температура и соленость этого слоя описываются теми же уравнениями, что и при свободной конвекции. Особенность заключается в том, что глубина h_{j+1} здесь определяется не только соотношением плотностей выше- и нижележащих слоев, но и механическим воздействием ветра. Для определения глубины ветрового перемешивания можно воспользоваться известными соотношениями для стационарного случая, например формулой С.А. Китайгород-

ского $h_v = 0.16u^2$ [12]. Слой конвективного или ветрового перемешивания является практически гомогенным, температура и соленость воды в слое принимаются неизменными, а скорость перемешивания бесконечно большой.

При решении этой системы интервалы времени выбираются такими, чтобы изменение толщины слоя конвекции было достаточно малым и позволило представить интегралы приближенно. Кроме того, плотность принимается постоянной и выносится из-под знака интеграла. После проведения перечисленных преобразований получается система уравнений, решение которой находится методом последовательных приближений.

Применение этого подхода для нашего случая имеет ряд особенностей. Азовское море относится к типу солоноватоводных и максимум плотности воды наступает еще до начала замерзания [5, 14]. После охлаждения до температуры наибольшей плотности дальнейшее понижение температуры приводит к уменьшению плотности, вертикальное перемешивание прекращается. Кроме того, море мелководно и стратификация слабо выражена. Вычисляя поток тепла в результате теплообмена с атмосферой по формулам (1), (2), (4), (5) определим время Δt изменения температуры воды до точки замерзания при данной солености из формулы, полученной в результате упрощения системы уравнений (6), (7) и предполагая толщину слоя конвективного перемешивания равной глубине моря

$$\theta_{j+1} = \theta_j - \frac{\Phi \Delta t}{c_w \gamma h}. \quad (8)$$

Здесь θ_j и θ_{j+1} температура воды в j и $j+1$ момент времени, Φ тепловой баланс поверхности моря, h глубина. Удельную теплоемкость и плотность воды вычислим по эмпирическим формулам О.И. Мамаева:

$$c_w = 4.1784 + 8.46 \cdot 10^{-6} (\theta_K - 33.67)^2 - 0.005075 S - 0.0000 S^2 \text{ Дж/(г град)}, \quad (9)$$

$$\gamma = 1 + 10^{-3} [28.152 - 0.0735\theta - 0.00469\theta^2 + (0.802 - 0.002\theta)(S - 35)] \text{ г/см}^3, \quad (10)$$

где S - соленость в промилле, θ - температура воды в градусах Цельсия, θ_K - температура воды в градусах Кельвина.

Расчет времени начала замерзания проводился для декабрьского и февральского потоков тепла при скорости ветра 2 м/с, относительной влажности воздуха 70%. Коэффициенты облачности и поглощения коротковолновой радиации в воде, альbedo и излучательной способности поверхности воды принимались равными 1, 0.3, 0.1, 0.91 соответственно. Температура воздуха варьировалась от -2 до -30°C. Графики зависимости времени начала замерзания от температуры воздуха, полученные при глубине моря 3м и начальной температуре воды 1°C, даны на Рис.4,а. Сплошная и штриховая линии соответствуют декабрю ($S=12\text{‰}$) и февралю ($S=5\text{‰}$). Аналогичные зависимости для декабря при начальной температуре воды 3°C, $S=5\text{‰}$ и глубине моря 7м приведены на Рис 4,б (сплошная линия). Штриховая линия здесь соответствует солености 12‰.

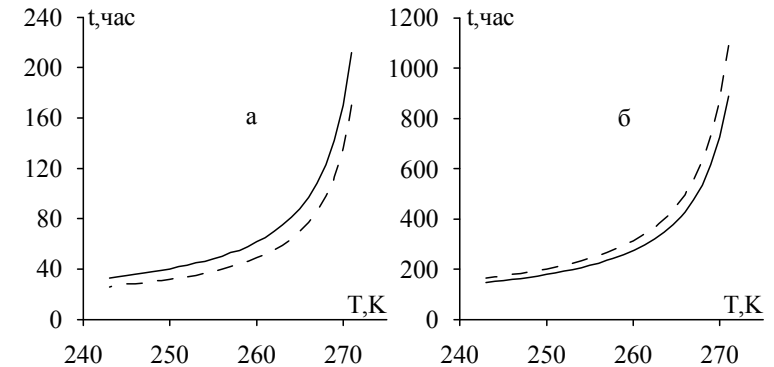


Рис.4. – Зависимость времени начала ледообразования от температуры воздуха, солености и температуры морской воды.

Приведенные на Рис.4 зависимости показывают, что в феврале при солености 5‰ и температуре воздуха -2°C лед начинает образовываться через 170 часов, а при $T = -30^{\circ}\text{C}$ через 26 часов. В декабре при солености 12‰ замерзание наступает через 33 и 212 часов при $T = -30^{\circ}\text{C}$ и $T = -2^{\circ}\text{C}$. Если $h = 7\text{ м}$, а начальная температура воды 3°C , то при солености 5‰ лед образуется через 888 часов при $T = -2^{\circ}\text{C}$ и через 147 часов при $T = -30^{\circ}\text{C}$. В случае же солености 12‰ начало ледообразования наступит через 1090 и 165 часов при температуре воздуха -2° и -30° .

Ледообразование для февральских потоков тепла при $h = 7\text{ м}$, начальной температуре воды 1°C и $S = 5\text{‰}$ начнется через 395 часов при $T = -2^{\circ}\text{C}$ и через 59 часов при $T = -30^{\circ}\text{C}$. В случае $S = 12\text{‰}$ для начала замерзания потребуется 570 и 77 часов при морозе -2°C и -30°C соответственно.

Сопоставление графиков на Рис.4 показывает, что уменьшение начальной температуры воды приводит к более раннему ледообразованию, в то время как рост солености обуславливает увеличение время начала замерзания.

Полученные результаты, не смотря на принятые упрощения и допущения, сопоставимы с реальными сроками начала ледообразования. Так, по данным [4] для зимнего сезона 2005-2006 годов ледообразование началось 9 января в результате понижения температуры воздуха 6 января до -3°C . Начальные формы льда в это время прослеживались в прибрежной части Таганрогского залива, у кос по северу моря, в Улютинском заливе и на юге Ясенского залива. С 11 по 14 января среднесуточная температура воздуха в это время удерживалась около $-1^{\circ}\text{C} - -3^{\circ}\text{C}$. В Таганрогском заливе и по северу моря продолжался процесс ледообразования. С 15 по 18 января температура снизилась до $-2^{\circ}\text{C} - -7^{\circ}\text{C}$. 19 января было отмечено кратковременное потепление, сменившееся 20 января резким снижением температуры на $20\text{-}25^{\circ}\text{C}$. В течении суток все Азовское море и северная часть Керченского пролива покрылась льдами сплоченностью 10 баллов. Таким образом, понадобилось 15 суток для полного замерзания моря.

Оценка изменения толщины льда при его нарастании. Как было показано в работе [6], в случае квазистационарности процессов на границах снежно-ледяного покрова при условии постоянства теплофизических свойств льда и снега и отсутствия тепловых источников во льду, распределение температуры близко к линейному, а поток тепла через снежно-ледяной покров можно рассчитывать по формуле

$$EH = -\lambda_2 \frac{T_0 - T_2}{h_2 + \lambda_2 h_1 / \lambda_1}, \quad (11)$$

где T_0 - температура верхней поверхности снежно-ледового покрова; T_2 - температура на границе лед-вода, равная температуре замерзания воды при данной солености; λ_1 и λ_2 - теплопроводность снега и льда; h_1 и h_2 - толщина слоя снега и льда. Температуру T_2 можно определить по эмпирическому соотношению $T_2 = -0.053S$, где S - соленость(‰) [16].

Для определения потока тепла через снежно-ледовый покров в рассматриваемом случае формула (11) используется при условиях $h_1 \geq 0.01$ м; $h_2 \geq 0.05$ м. Кроме того, предполагается, что температура T_0 ниже температуры замерзания воды T_2 . Тогда нарастание льда Δh_2 определяется по формуле

$$\Delta h_2 = (EH - \Phi_0) \Delta t / L_2 \rho_2, \quad (12)$$

где L_2 - удельная теплота плавления льда, Φ_0 - поток тепла от нижележащего слоя моря. При отсутствии снега ($h_1 = 0$)

$$EH = -\lambda_2 (T_0 - T_2) / h_2. \quad (13)$$

Если снег есть, то его прирост определяется выражением $\Delta h_1 = v_1 \cdot \Delta t$, где v_1 - интерполированная скорость выпадения твердых осадков.

Оценим величину нарастания льда на Азовском море за период 10 суток, исходя из начальной толщины льда 10 см при значениях его плотности, теплопроводности и удельной теплоемкости, равных 917 кг/м^3 , 2.09 Вт/(м·К) , $3.3 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ соответственно. Оценку проведем при отсутствии снега ($h_1 = 0$) и в случае слоя снега толщиной $h_1 = 5$ см при значениях его теплоемкости 0.1 Вт/(м·К) (свежий снег) и 0.25 Вт/(м·К) (лежалый снег). Температуру T_0 верхней поверхности льда (снега) задаем в диапазоне от -1°C до -2°C , а поток тепла Φ_0 от нижележащего слоя моря, как и в [10], примем равным 2, 5 и 8 Вт/м^2 . Отметим, что темпера-

тура замерзания морской воды при солености 5‰ и 12‰ равна, соответственно - 0.27 °С и -0.64 °С.

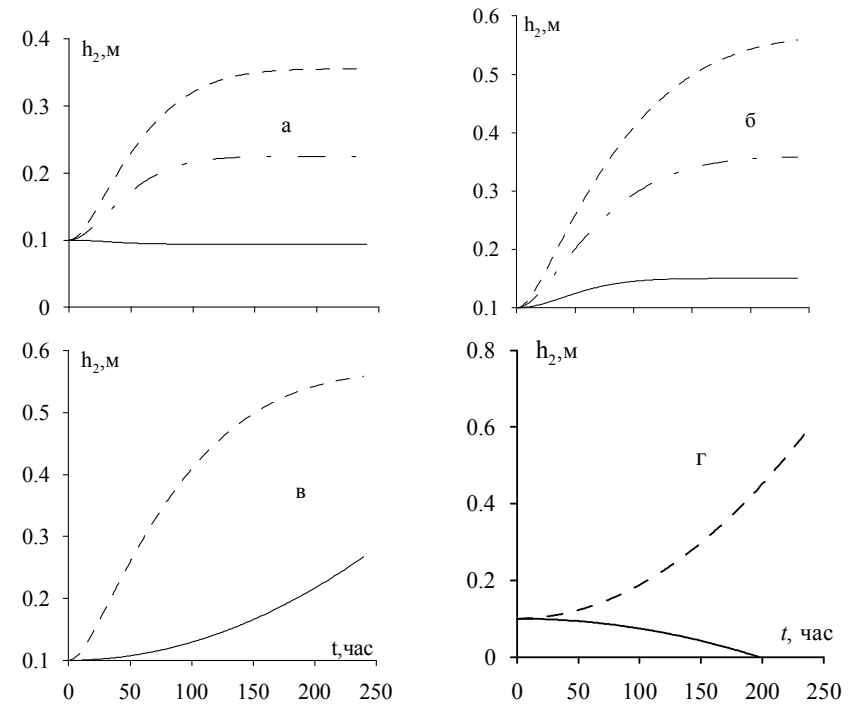


Рис.5. – Изменение толщины льда во времени.

На Рис.5 приведены графики, характеризующие влияние снега, а также изменений температуры поверхности льда (снега) и величины Φ_0 . При отсутствии снега нарастание толщины льда при значениях T_0 , равных -1, -1.5, -2°С, иллюстрирует сплошная, штрихпунктирная и штриховая линии на Рис.5,а для потока тепла 8 Вт/м² и на Рис.5,б для потока тепла 5 Вт/м². Видно, что в случае потока тепла 8 Вт/м² при $T_0 = -1^\circ\text{C}$ нарастание практически не происходит. При $T_0 = -2^\circ\text{C}$ за 10 суток (240 часов) толщина h_2 достигает значения 35 см. Причем максимальная скорость приходится на первые 5 суток, после которых прирост практически прекращается. Если $T_0 = -1.5^\circ\text{C}$, то прирост h_2 прекращается уже после 4 суток, успевая при этом составить 10 см. Уменьшение потока тепла до 5 Вт/м² привело к более интенсивному нарастанию льда. В этом случае при $T_0 = -1^\circ\text{C}$ толщина h_2 за

10 суток изменилась от 10 до 15 см. При значениях T_0 , равных -1.5 и -2°C прирост толщины льда составил почти 25 и 45 см.

Влияние слоя снега, покрывающего лед, на изменение толщины льда для $T_0 = -2^\circ\text{C}$ иллюстрируют графики на Рис.5,в и Рис.5,г при величине потока тепла 5 и 2 Вт/м². Сплошная и штриховая линии на Рис.5,в отвечают распределениям h_2 по времени при толщине слоя снега (лежалого) 5 см и при $h_1 = 0$, а на Рис.5,г случаям свежего и лежалого снега толщиной 5 см. Напомним, что начальная толщина льда составляет 10 см. Приведенные зависимости показывают, что снег влияет не только на величину прироста льда, но существенно воздействует и на характер изменения его толщины. В течении 10 суток толщина льда достигла 25 см при $h_1 = 5$ см и более 50 см при отсутствии ($h_1 = 0$) снега (Рис.5,в). Если при фиксированных значениях T_0 и Φ_0 в случае лежалого снега толщина льда нарастает, то при свежем снеге лед начинает таять (Рис.5,г).

Из формул (11) и (12) можно получить величину потока тепла от моря $\Phi_0 = \Phi_0^*$, при которой нарастание льда не происходит. При отсутствии снега, она определяется выражением:

$$\Phi_0^* = -\lambda_2(T_0 - T_2)/h_2. \quad (14)$$

Для солености воды 12‰, зависимость величины Φ_0^* от толщины льда показана на Рис. 6, при T_0 и T_2 равных -1°C и -0.64°C . Видно, что величина потока Φ_0^* меняется от 7.52 Вт/м² (для льда толщиной 0.1 м) до 0.75 Вт/м² (для метрового льда).

Оценка изменения толщины льда с учетом его таяния. Рассмотрим теперь изменение толщины льда с учетом его таяния при отсутствии снега в предположении, что температура T_0 ниже температуры T_2 . В этом случае в зависимости от соотношения EH и Φ_0 таяния льда может осуществляться как снизу, в соответствии с выражением (12), так и сверху, определяясь формулой

$$\Delta h_2' = Q\Delta t / (L_2\rho_2), \quad (15)$$

где $Q = H + LE + Rg + F - EH$ представляет собой разбаланс потоков тепла, обуславливающий таяние. Суммарное изменение толщины льда Δh за счет таяния находилось по формуле $\Delta h = \Delta h_2 + \Delta h_2'$. Начальное значение толщины льда принималось равным 50 см. Температура его верхней и нижней поверхностей задавалась равной 0°C и -0.64°C , что соответствует начальной температуре таяния пресноводного льда и температуре замерзания воды при $S = 12\%$. Расчеты H и LE выполнялись при скорости ветра 2 м/сек для дневной температуры воздуха

2°C и 5°C на высоте 2 м. Величины потоков F и Rg , необходимые для оценки изменения толщины льда за счет его таяния, полагались равными вычисленным в первом разделе для декабря и февраля. Поток тепла Φ_0 от морской воды принимался равным 2 Вт/м². Учитывая значительную зависимость F от зенитного угла Солнца в течении дня, при расчетах использовалось ее среднее дневное значение. Для декабря такое значение F составляет примерно -10 Вт/м² при полной облачности и -47.94 Вт/м² для ясного неба. Аналогичные значения для февраля равны -11.55 Вт/м² и -64.16 Вт/м². Отметим, что с уменьшением облачности увеличивается поток как коротковолновой, так и длинноволновой радиации и влияние последней для декабря (при дневной температуре воздуха 2°C и температуре поверхности льда 0°C) становится настолько значительным, что разбаланс потоков тепла оказывается положительным. Это приводит к прекращению таяния льда сверху. Изменение его толщины осуществляется только снизу. За 10 дневных часов величина Δh_2 составляет 3 мм. При ночном понижении температуры поверхности льда до -1°C лед продолжает таять снизу и за 14 часов уменьшение его толщины составит еще 2 мм. Если при ночной температуре воздуха температура поверхности льда опустится до -1.5°C, то за ночь лед нарастет на 8 мм. Тогда за сутки его толщина изменится от 50 см до 50.5 см.

При дневной температуре воздуха 5°C таяние льда в декабре приводит к уменьшению его толщины до значения 43.6 см за день при отсутствии облачности. Облачность может уменьшить таяние, но не более, чем на 1 мм. Ночью при температуре поверхности льда -1°C за 14 часов происходит нарастание льда на 1 мм. Если же температура поверхности льда опустится до -1.5°C, то за ночь после безоблачного дня нарастет 1 см льда и его толщина составит 44.6 см по истечении суток.

В феврале зенитный угол Солнца меньше, а продолжительность дня и величина F больше, чем в декабре. Поэтому таяние льда осуществляется интенсивнее. При дневной температуре воздуха 2°C и температуре поверхности льда 0°C за 10 ч 30 мин дневного времени лед стаивает примерно на 7 мм при всех рассматриваемых значениях коэффициента облачности. Повышение дневной температуры воздуха увеличивает толщину стаивания льда.

Учитывая неоднородность распределения солености воды по акватории Азовского моря, был проведен анализ ее влияния на изменение толщины льда. Результаты показали, что с увеличением солености прирост льда практически линейно уменьшается. В частности, в декабре при начальной толщине льда 49.7 см и температуре его поверхности -1.5°C за ночь нарастет 14, 10, 6 мм при S , равной 6, 10, 14‰ соответственно.

Заключение. На основе известных соотношений, характеризующих интенсивность теплового и динамического взаимодействия моря и атмосферы, выполнен анализ составляющих теплового баланса для региона Азовского моря. Рассмотрена зависимость времени начала образования азовоморского льда от температуры воздуха, температуры и солености морской воды для формирующихся в декабре и феврале потоков тепла. Получены количественные оценки зависимости

изменений толщины льда от температуры его верхней и нижней поверхности, а так же от покрывающего лед снега и потока тепла от морской воды.

Литература

1. *Букатов А.Е., Завьялов Д.Д., Букатова О.М., Соломаха Т.А.* Влияние ледяного покрова на волновые возмущения в Азовском море // Морской гидрофизический журнал. - 2001. - №4. - С. 11-22.
2. <http://www.azovskoe.com/>
3. *Букатов А.Е., Павленко Е.А.* Анализ связи климатической изменчивости метеорологических характеристик и ледового режима Азовского моря с индексами атмосферной циркуляции // Физические проблемы экологии (экологическая физика). М.: МАКС Пресс. - 2012. - 18. - С. 48-71.
4. *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. - 2008. - 41 с.
5. *Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е.* Морской лед. – Ленинград: Гидрометеиздат. - 1975. - 317 с.
6. *Макитас А.П.* Тепловой баланс арктических льдов в зимний период. Ленинград: Гидрометеиздат. - 1984. - 65 с.
7. <http://ozerobaikal.info/>
8. *Доронин Ю.П.* Влияние ледяного покрова на теплообмен атмосферы с океаном // Проблемы Арктики и Антарктики: / Сборник статей. - Выпуск 43 - 44. - Ленинград: Гидрометеиздат. - 1974. - С. 52-60.
9. *Кузнецов И.М., Миронов Е.У.* Особенности нарастания толщины морского льда // Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института: / Исследования ледяного покрова Северного Ледовитого океана. - Том 435. - Санкт Петербург: Гидрометеиздат. - 1995. – 35-46.
10. *Трешиников А.Ф., Алексеев Г.В., Макитас А.П., Назурный А.П., Савченко В.Г., Хрол В.П.* Взаимодействие океана и атмосферы в Северной полярной области. Ленинград: Гидрометеиздат. - 1991. - 175 с.
11. <http://fcr.ocean.ru/>
12. *Доронин Ю.П.* Тепловое взаимодействие атмосферы и гидросферы в Арктике. - Ленинград: Гидрометеорологическое издательство. - 1969. - 298 с.
13. *Макитас А.П.* Теплообмен между атмосферой и океаном в Арктическом бассейне через льды различной толщины // Труды Ордена Ленина Арктического и Антарктического научно-исследовательского института: / Крупномасштабные взаимодействия атмосферы и океана. - Том 347. – Ленинград: Гидрометеиздат. - 1977. - С. 68-74.
14. *Паундер Э.* Физика льда. - Москва: Мир. - 1967. - 189 с.
15. *Матишов Г.Г., Гаргона Ю.М., Бердников С.В., Дженюк С.Л.* Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. М.: Наука. - 2006. - 304 с.
16. *Перри А.Х., Уокер Дж.М.* Система океан-атмосфера. - Л.: Гидрометеиздат. - 1979. - 195 с.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
ВЕРТИКАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВОД АЗОВСКОГО МОРЯ

Букатов А.Е., Павленко Е.А.

Морской Гидрофизический Институт НАНУ

На основе данных экспедиционных съемок за период 1952-2006 гг. проведено исследование вертикальной устойчивости вод Азовского моря. Получены оценки вклада изменчивости температуры и солености в формирование плотностной стратификации вод. Проведен анализ статистических связей между динамикой величин устойчивости вод и изменениями значений индексов атмосферной циркуляции NAO, EA, EATL/WRUS.

Введение. Важную роль в формировании Азовской экосистемы играет устойчивость плотностной стратификации вод. Чем больше увеличение плотности с глубиной, чем больше её вертикальный градиент, тем выше устойчивость. Рост устойчивости обуславливает уменьшение вертикального обмена теплом, веществом и количеством движения. Это приводит к ухудшению кислородного режима, возникновению обширных зон придонной гипоксии, сероводородного заражения и заморозов. Стратификация вод определяется изменениями температуры и солёности воды на поверхности и в водной толще, где их изменения связаны с адвекцией и адиабатическими процессами. По результатам исследований [1] за период 1992-2010 гг. зоны гипоксии до 2001 г. имели место главным образом в заливах северного побережья и в глубоководной части Азовского моря. С 2001 г. отмечается расширение областей их локализации. Заморные явления охватывают как северную, так и южную часть моря: заливы Крымского побережья и Арабатский залив.

Аналізу вертикальной устойчивости вод Азовского моря посвящены многие работы. Большинство исследований, наиболее полным из которых является [2], выполнены по осреднённым для всей толщи вод величинам вертикальной устойчивости. Однако, в настоящее время в связи с общим осолонением моря характерно увеличение различий между поверхностными и придонными водами, и расслоение вод по плотности. В связи с этим осредненные характеристики устойчивости не дают полного представления пространственно-временной структуры плотностной стратификации вод.

Известно, что климатические условия на Земле меняются достаточно быстро как в глобальном масштабе, так и на уровне отдельных регионов. Поэтому представляет интерес исследование взаимосвязи многолетней изменчивости гидрологических характеристик Азовского моря с различными факторами, определяющими изменение климата в современный период. Тенденции климатических изменений в Европейском регионе невозможно правильно объяснить, не принимая в расчет колебания во времени индексов Северо-Атлантического (NAO) [3-7], Восточно-Атлантического (EA) [5, 8] колебаний, и индекса EATL/WRUS [5], характеризующего колебание, охватывающее восточную Атлантику и западную Россию.

В настоящей работе выполнено исследование пространственно-временной изменчивости устойчивости вод Азовского моря на основе климатиче-

ского термохалинного массива с вертикальным разрешением 1 м и горизонтальным $0,15^\circ$. Проведен анализ статистических связей между динамикой величин устойчивости вод и изменениями значений индексов атмосферной циркуляции NAO, EA, EATL/WRUS.

Материалы и методика. В качестве исходных данных использованы архивы экспедиционных съемок МГИ НАНУ за период 1978-1996 гг. и данные климатического атласа Азовского моря (NOAA Atlas NESDIS 65) за 1952-2006 гг. [9]. Климатический термохалинный массив Азовского моря сформирован на основе данных за 30-летний период (1976-2006 гг.). Общее число гидрологических станций, вошедших в данный массив, составило 15 тыс. Контроль качества данных проводился в соответствии со схемой, принятой в Лаборатории Морского Климата NOAA [9]. Для расчета термохалинных характеристик акватория моря была разбита на 176 “квадратов” величиной $0,15^\circ$ по широте и по долготе (рис. 1а). Пространственное осреднение термохалинных характеристик производилось непосредственно внутри каждого квадрата.

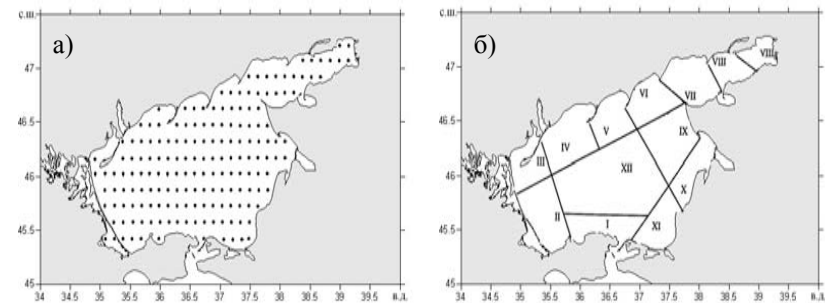


Рис. 1 – Схема условных “квадратов” (а), районирование Азовского моря (б).

Для каждой точки сетки (центр “квадрата”) рассчитывались многолетние среднемесячные профили значений частоты плавучести $N(z)$, характеризующих устойчивость вод:

$$N^2(z) = \frac{g}{\rho(z)} \frac{d\rho(z)}{dz},$$

где z – глубина, $\rho(z)$ – плотность морской воды, определяемая по данным гидрологических измерений, g – ускорение свободного падения. Вертикальные профили $N(z)$ получены с шагом 1 м путем использования 4-точечной схемы Рейнигера-Росса (комбинация метода взвешенных парабол и линейной интерполяции). Рассчитаны вертикальные среднемесячные профили частоты плавучести для географических районов моря (рис. 1б), выделенных по классификации [10]. Построены климатические поля частоты плавучести для горизонтов 2, 5 и 10 м.

Для оценки вклада изменчивости температуры (T) и солености (S) в формирование плотностной стратификации вод рассчитаны термическая и соленостная составляющие устойчивости:

$$E_t = \alpha \frac{dT}{dz}, E_s = \beta \frac{dS}{dz},$$

где α – коэффициент термического расширения, β – коэффициент соленосного сжатия [11]. Рассчитаны вертикальные среднемесячные профили E_t , E_s для выделенных районов моря. Построены климатические поля термической и соленосной составляющих устойчивости для горизонтов 2, 5 и 10 м.

Проведен анализ статистических связей между динамикой величин устойчивости вод и изменениями значений индексов атмосферной циркуляции NAO, EA, EATL/WRUS [12]. Для расчетов использовался параметрический коэффициент парной линейной корреляции. Коэффициенты получены на основе среднемесячных профилей частоты плавучести для центрального района Азовского моря за период после зарегулирования стока рек (1952-2006 гг.).

Анализ результатов. Плотностная стратификация вод Азовского моря определяется в основном гидрометеорологическими условиями над акваторией моря, водообменном с Черным морем и речным стоком. Максимальные значения частоты плавучести наблюдаются в зонах фронтальных разделов, формирующихся между речными и азовоморскими водами, а также при адвекции соленых черноморских вод [2].

На рис. 2 приведены среднемесячные вертикальные профили частоты плавучести для наиболее характерных районов Азовского моря: Керченского района (I); Таганрогского залива (VIII); Темрюкского залива (XI); центрального района (XII) Азовского моря. Из рисунка видно, что зимой в наиболее глубоководных районах моря наблюдается слабоустойчивая, нейтральная или неустойчивая стратификация, обусловленная охлаждением верхних слоев воды и зимней конвекцией. В центральной части моря величины $N(z)$ составляют 1-5 цикл/час (рис. 2г), в Керченском районе 5-6 цикл/час (рис. 2а). В Темрюкском заливе (рис. 2в) в январе, феврале образуется слой скачка плотности, обусловленный распространением по поверхности моря вод речного стока и ветровым перемешиванием. Максимум $N(z)$ достигает в данном районе 14-15 цикл/час на глубинах 3-5 м. Величины $N(z)$ в поверхностном и придонном слое не превышают 7 цикл/час. В Таганрогском заливе (рис. 2б) максимум частоты плавучести находится в поверхностном слое. На горизонте 1 м величины $N(z)$ достигают 36-55 цикл/час. Это можно объяснить наличием ледяного покрова, который препятствует ветровому перемешиванию пресных речных вод с более солеными придонными слоями. Устойчивость с глубиной уменьшается, у дна величины $N(z)$ составляют 1-5 цикл/час. Максимальные среднемесячные вертикальные градиенты плотности для различных районов Азовского моря приведены в табл. 1.

Таблица 1. Максимальные вертикальные градиенты плотности, усл.ед./м

Район Месяц	I	VIII	XI	XII
1	–	0,39	0,13	0,02
2	–	–	0,14	0,02
3	–	0,38	0,15	0,02
4	0,02	0,38	0,18	0,03
5	0,03	0,31	0,17	0,03
6	0,15	0,32	0,17	0,02
7	0,05	0,32	0,20	0,04
8	0,04	0,18	0,19	0,05
9	0,05	0,25	0,14	0,02
10	0,05	0,07	0,12	0,02
11	0,05	0,09	0,13	0,02
12	0,01	1,40	0,10	0,02

Примечание: За период январь-март недостаточно данных.

Весной общая устойчивость моря усиливается. На рис. 3 показано пространственное распределение значений $N(z)$ на различных горизонтах в мае. Как видно из рисунка, в центральной части моря величины $N(z)$ составляют 6-11 цикл/час. В Керченском районе наибольшие значения $N(z)$ наблюдаются в основном в придонном слое, где располагаются относительно высокосолёные черноморские воды. Максимум отмечен в апреле, и достигает 7 цикл/час. В мае, в связи с прогревом поверхностного слоя, максимум $N(z)$ поднимается на поверхность и составляет 10 цикл/час. В устьевых областях р. Кубань в весенний период сохраняется слабовыраженный слой скачка плотности на глубинах 3-5 м. В апреле максимум $N(z)$ достигает 23 цикл/час. В Таганрогском заливе, весной устойчивость верхних слоев ослабевает, а придонных увеличивается. В апреле максимум $N(z)$ опускается на глубину 5 м и составляет 32 цикл/час (VIII район).

В летний период высокие градиенты плотности связаны в основном с интенсивным прогревом поверхностного слоя (рис. 2, 4). В глубоководных районах придонные слои прогреваются намного медленнее поверхностных. В центральной части моря наибольшие величины устойчивости отмечены в придонном слое в июне ($N(z)=19$ цикл/час). К августу максимум $N(z)$ поднимается в поверхностный слой и составляет в среднем для XII района 11 цикл/час на горизонте 1 м. В Темрюкском заливе максимум $N(z)$ отмечен у дна. В июне и июле он равен 27 цикл/час. В августе максимум $N(z)$ также поднимается к поверхности и составляет 23 цикл/час. В Керченском районе в летний период максимум $N(z)$ находится в поверхностном слое и достигает 22 цикл/час в июне. В Таганрогском заливе максимум $N(z)$ находится у дна на протяжении всего летнего периода (на глубинах 5 м). Для района VIII в июне и июле он равняется 32 цикл/час.

Осенью в глубоководных районах формируется слабоустойчивая стратификация (рис. 2, 5). Частота плавучести в центральном районе составляет 3-9 цикл/час. В Темрюкском заливе максимумы $N(z)$ остаются в поверхностном слое,

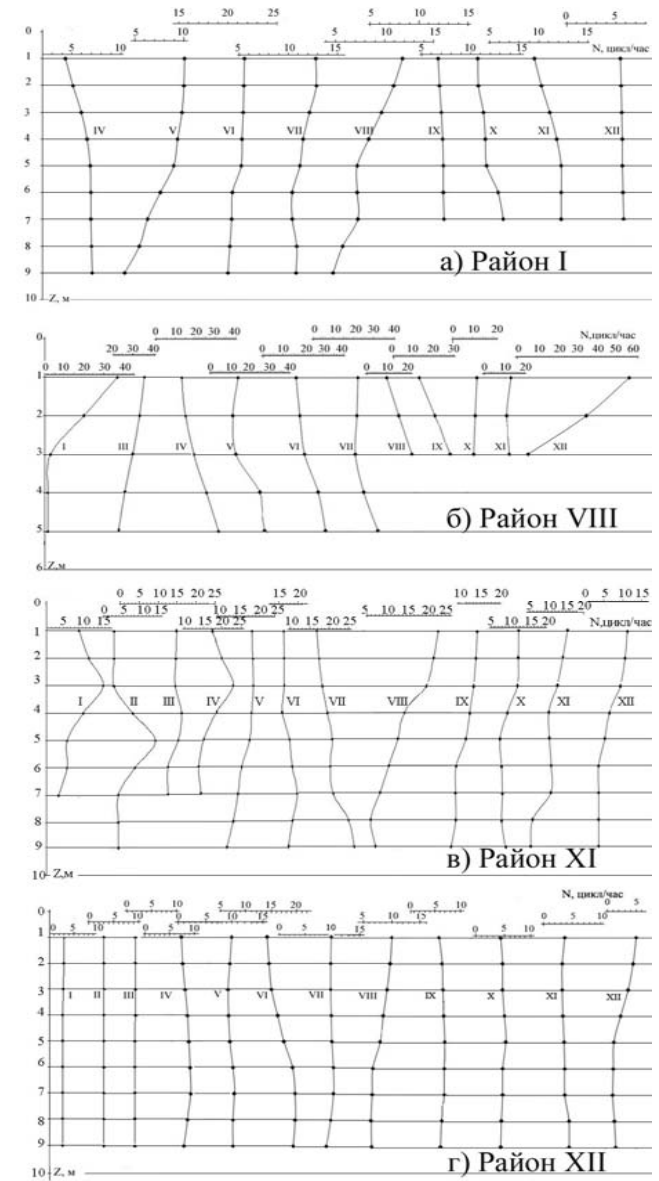
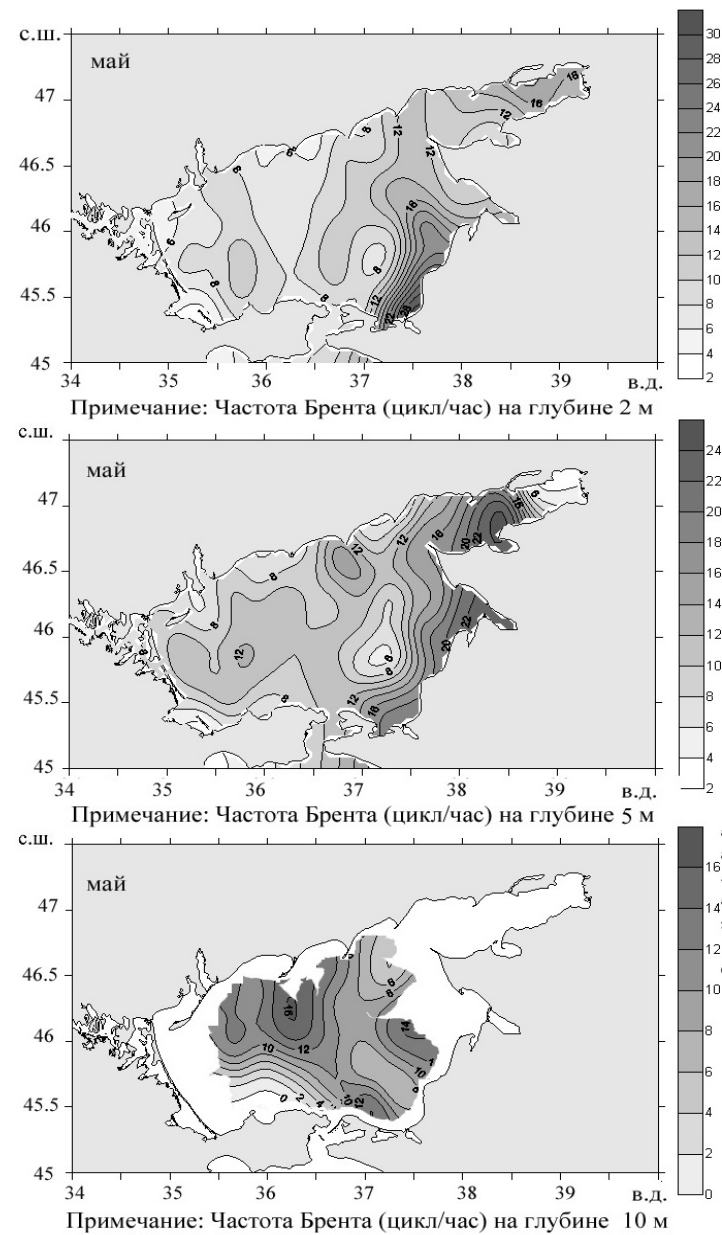


Рис.2 – Среднемесячные вертикальные профили $N(z)$ для а) Керченского района; б) Таганрогского залива; в) Темрюкского залива; г) центрального района Азовского моря.

Рис. 3 – Пространственное распределение $N(z)$ в весенний период.

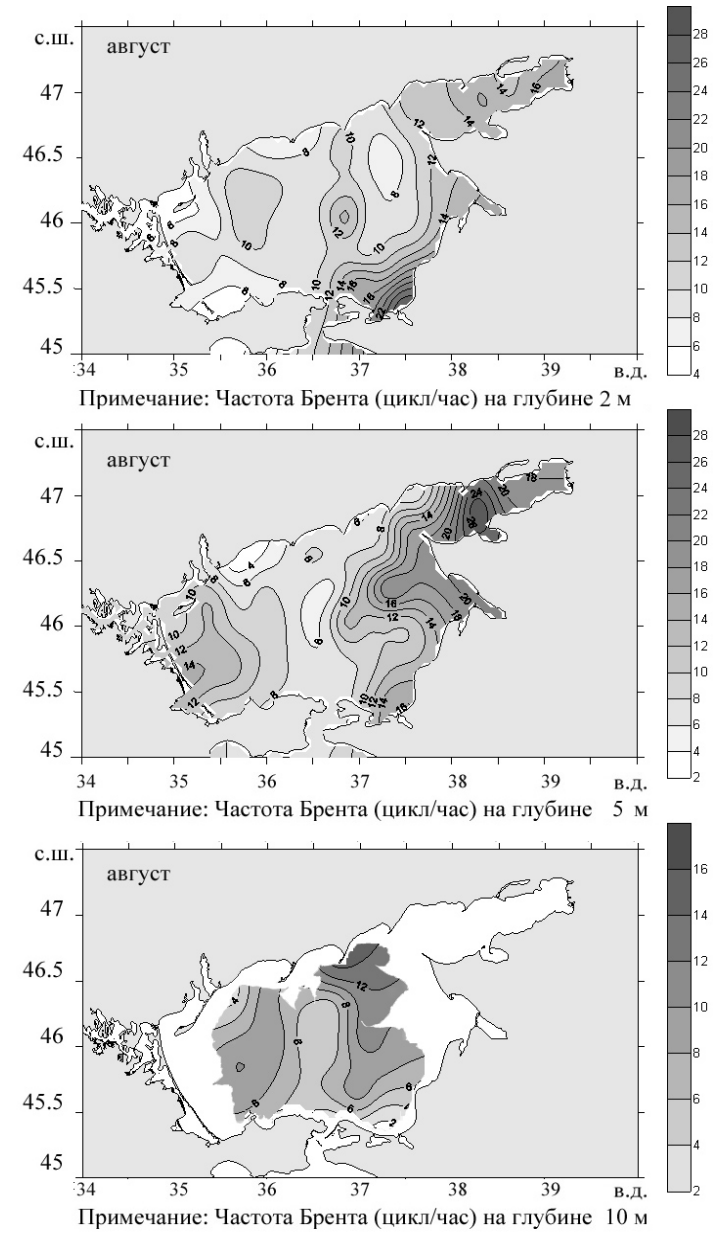
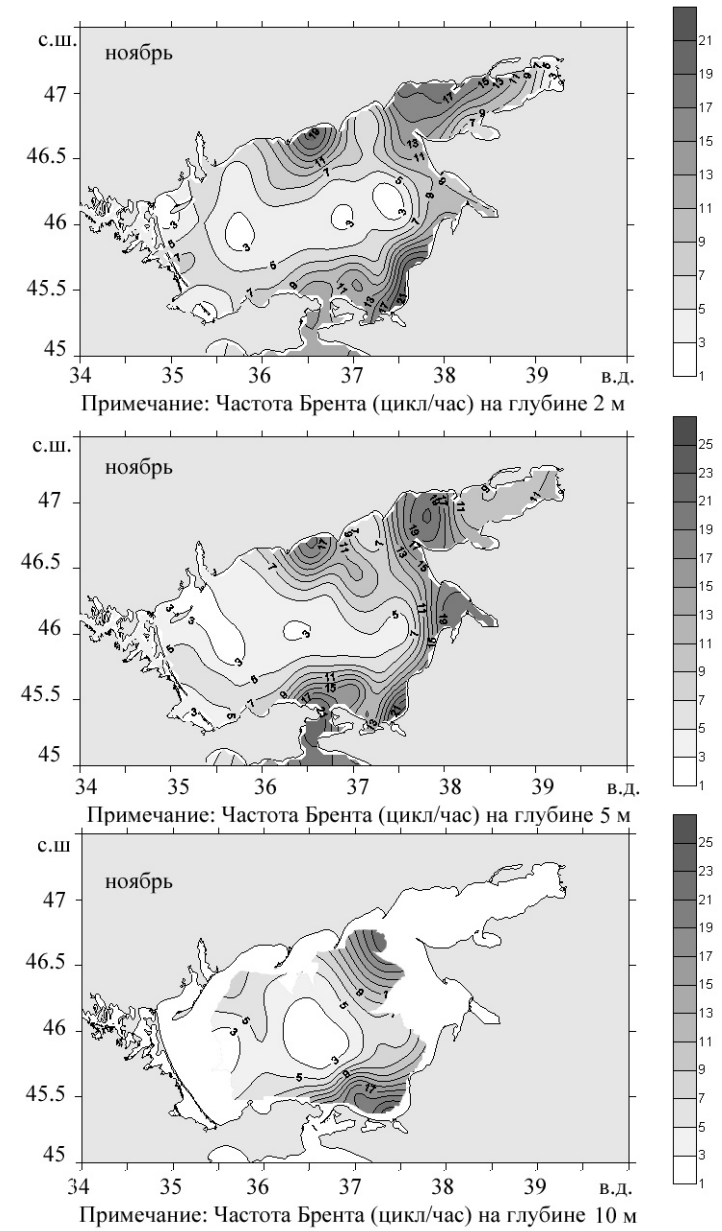


Рис. 4 – Пространственное распределение $N(z)$ в летний период.

Рис. 5 – Пространственное распределение $N(z)$ в осенний период.

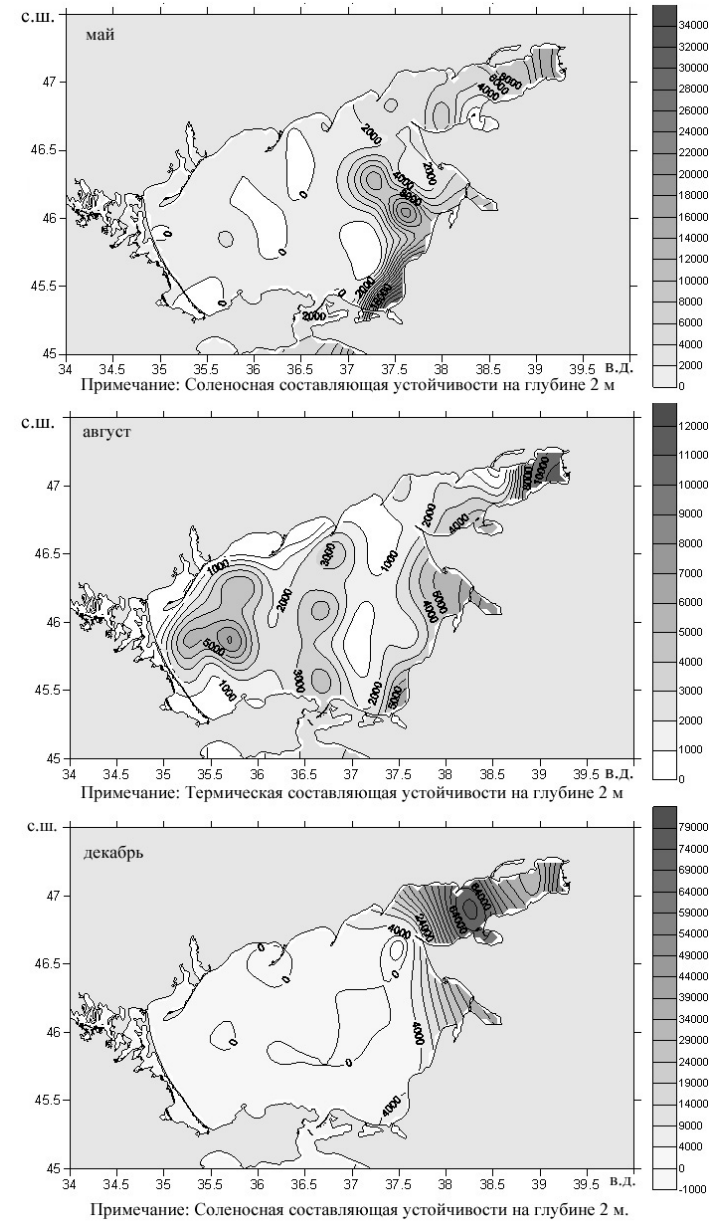


Рис. 6 – Пространственное распределение E_t и E_s в поверхностном слое.

и составляют 12-16 цикл/час. В Керченском районе максимумы $N(z)$ находятся в придонном слое, и равняются 12-13 цикл/час. В Таганрогском заливе в сентябре максимум $N(z)$ остается у дна и составляет 28 цикл/час (VIII район). В ноябре он поднимается в поверхностный слой, достигая значения 14 цикл/час.

Максимум вертикальной устойчивости вод в наиболее глубоководных районах моря наблюдается летом. Причем, максимум E_t приходится также на лето, а максимум E_s отмечен весной. На рис. 6 представлены величины E_t и E_s на глубине 2 м, где отмечены их наибольшие значения. Анализ среднемесячных профилей E_t и E_s для выделенных районов (рис. 1а) показал что, в центральном районе моря E_t больше E_s в 4 раза. Средние значения E_t и E_s в слое 0-3 м достигают 2550 усл.ед. и 670 усл.ед. соответственно. В Темрюкском заливе наоборот E_s составляет 13200 усл.ед. и превышает в 4.5 раза E_t , равное 2990 усл.ед.. В Керченском районе в поверхностном слое E_t равняется 3000 усл.ед., а E_s 160 усл.ед. Следует отметить, что в Керченском районе наибольшие значения E_s находятся у дна, где достигают в среднем 1150 усл.ед.. Осенью в наиболее глубоководных районах вклад соленостной составляющей больше, чем термической в 4 раза. Здесь E_t равняется 150 усл.ед. на глубине 1 м, а на востоке моря значения E_t отрицательные. E_s максимально в Темрюкском заливе и достигает в поверхностном слое 7600 усл.ед. Минимум общей вертикальной устойчивости для глубоководных районов, а также минимум E_t и E_s отмечен в зимний период (рис.6). В центральном районе в декабре вклад E_s в общую устойчивость в поверхностном слое равняется 1350 усл.ед. В Темрюкском заливе и Керченском районе E_s в среднем для района составляет 5250 усл.ед. (на глубине 1 м) и 1100 усл.ед. (8 м) соответственно. В зимний период E_t принимает отрицательные значения. Весной, в связи с интенсивным прогревом поверхностного слоя в центральном районе моря E_t больше E_s в 1.5 раза и составляет 3000 усл.ед.. В районах I, XI вклад изменчивости солености в весенний период остается больше, и E_s превышает E_t в 5 раз. Наибольшие значения E_s выявлены для района XI, 15000 усл.ед.

В Таганрогском заливе вклад соленостной составляющей больше чем термической во все сезоны года. Наиболее высокие значения устойчивости отмечены зимой (рис.6). Они связаны с распространением подо льдом пресных вод стока р. Дон. При этом $E_s=50000$ усл.ед., а E_t принимает отрицательные значения. Весной в поверхностном слое E_s больше E_t в 1,5 раза и составляет в среднем для района 4000 усл.ед.. У дна (горизонт 5 м) средние значения E_s и E_t равны 11100 усл.ед. и 150 усл.ед. соответственно. Летом $E_s=6000$ усл.ед., а его превышение над E_t составляет 2 раза. Осенью термическая составляющая отрицательная, а $E_s=5500$ усл.ед.

Характер пространственно-временной структуры вертикальной устойчивости вод IV, V, IX, X районов близок к пространственно-временной структуре устойчивости центральной части моря. Для районов VI характерны многие закономерности климатической изменчивости, выявленные для Таганрогского залива. Пространственно-временная изменчивость устойчивости вод районов II, III характеризуется некоторыми признаками, отмеченными как для Керченского района, так и для центральной части моря.

Анализ статистических связей между динамикой величин устойчивости вод и изменениями значений индексов атмосферной циркуляции NAO, EA, EATL/WRUS показал, что наиболее тесные зависимости отмечены для индекса

NAO. Статистически значимые величины коэффициентов корреляции положительны, и получены для летне-осеннего периода. Наибольшие коэффициенты корреляции найдены для величин устойчивости в поверхностном слое. В табл. 2 показаны коэффициенты корреляции для горизонтов 1-5 м. Максимум коэффициентов корреляции соответствует горизонту 1 м в августе и составляет 0,49 (уровень значимости 0,10).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между величинами устойчивости вод и индексами NAO за 1952-2006 гг.

Месяц Горизонт, м	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-0,24	-0,25	-0,21	-0,10	0,49	0,47	0,46	0,48
2	-0,16	-0,24	-0,18	-0,10	0,45	0,46	0,41	0,45
3	-0,01	-0,24	-0,13	-0,07	0,38	0,45	0,41	0,41
4	0,11	-0,25	-0,17	0,02	0,23	0,43	0,47	0,26
5	0,18	-0,26	-0,20	0,05	0,07	0,43	0,46	0,03

Примечание: 1). Жирным шрифтом отмечены оценки значимые для уровня значимости 0,10. 2). За период декабрь-март недостаточно данных.

Коэффициенты корреляции, характеризующие связи между динамикой величин устойчивости вод и изменениями значений индексов атмосферной циркуляции EA, EATL/WRUS не являются статистически значимыми.

Закключение. Таким образом, на основе данных экспедиционных съемок за период 1952-2006 гг. проведено исследование вертикальной устойчивости вод Азовского моря. Максимум устойчивости вод в наиболее глубоководных районах моря наблюдается в летний период. Величины частоты плавучести составляют для XII района моря 19 цикл/час, а в XI и I районе 27 цикл/час, 22 цикл/час соответственно. Причем, в центральном районе вклад термической составляющей устойчивости превышает вклад соленосной в 4 раза. В Темрюкском заливе наоборот соленосная составляющая больше в 4.5 раза термической. В Таганрогском заливе максимум устойчивости отмечен зимой. Величины частоты плавучести достигают 36-55 цикл/час (VIII район). В Таганрогском заливе вклад соленосной составляющей больше чем термической во все сезоны года. Анализ статистических связей между динамикой величин устойчивости вод и изменениями значений индексов атмосферной циркуляции NAO, EA, EATL/WRUS показал, что наиболее тесные зависимости отмечены для индекса NAO. Статистически значимые величины коэффициентов корреляции положительны, и получены для летне-осеннего периода.

Литература

1. А.Т. Кочергин, Л.В. Крискевич / Океанографический мониторинг заморозов в Азовском море / Системы контроля окружающей среды // Сб. науч. тр., НАН Украины, МГИ. – Севастополь, 2010. – №14. – с. 222-224.
2. Г.Г. Магишов, Ю.М. Гаргопа, С.В. Бердников, С.Л. Дженок // Закономерности экосистемных процессов в Азовском море / Южн. науч. центр РАН. - М.: Наука, 2006. - 304 с.

3. 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.
4. Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperature and precipitation // Science.1995.–Vol. 269. – P. 676–679.
5. 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.
6. Osborn T.J. Recent variations in the winter North Atlantic Oscillation // Weather. – 2006. –61, №12. – P. 353-355.
7. Букатов А.Е., Павленко Е.А. Анализ связи климатической изменчивости метеорологических характеристик и ледового режима Азовского моря с индексами атмосферной циркуляции // Физические проблемы экологии (Экологическая физика). – М.: МАКС Пресс, 2012, №18, с. 48-72.
8. Нестеров Е.С. О восточно-атлантическом колебании циркуляции атмосферы. // Метеорология и гидрология. 2009.– № 12.– С. 32 –40.
9. Matishov G., Levitus S., eds. Climatic Atlas of the Sea of Azov // NOAA Atlas NESDIS 65, U.S. Government Printing Office, Washington, 2008. – 148 pp.
10. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том V. Азовское море. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. – 236 с.
11. Океанографические таблицы. Под ред. З.И. Мироненко. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 477с.
12. <http://www.cpc.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>

ВАРИАЦИИ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ.

Е.В. Воронина

Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

Исследование напряженно-деформированного состояния неоднородной активной среды в области подготовки сильного землетрясения является актуальной задачей современной геофизики не только потому, что является основным прогностическим параметром сейсмической активности [1], но, и, что может быть более важным, - объясняет физические процессы в области готовящегося сейсмического события и описывает механизм разрушения среды.

Согласно основным положениям физической мезомеханики, процесс разрушения среды, на любом масштабном уровне, состоит из ряда последовательных этапов [2,3,5]:

1. формирование концентраторов напряжений. Ими могут быть области контакта сред с разной реологией, такие как жесткие включения. Концентраторы напряжений обусловлены разной деформируемостью объемов горных пород;

2. релаксационный стесненный сдвиг с поворотом. Благодаря упругому повороту жесткого блока как целого, в области очага будущего землетрясения имеет место изгибная деформация. Изгибная деформация представляет собой локальное осложнение общего поля сдвиговой деформации и формирует трещины отрыва в условиях локального растяжения;

3. взаимодействующие трещины отрыва, при снижении нормального напряжения сжатия, приводят к образованию магистрального разрыва в виде финального релаксационного сдвига.

Необходимым условием процесса формирования магистрального разрыва является наличие в области готовящегося землетрясения изгибной деформации [2]. По наблюдениям, область изгибной деформации соответствует области форшоков, простирание которой ориентировано под некоторым углом к плоскости основного разлома. В этой области происходит развитие пористости материала горной породы в виде трещин нормального отрыва, что и представляет собой начальный этап разрушения среды.

Важнейшей характеристикой изгибаемых объектов является наличие нейтральной поверхности, представляющей собой границу между деформацией сжатия и растяжения. В области деформации сжатия материал горной породы упрочняется, а в области растяжения – ослабляется. Локальное разрушение происходит в направлении действия максимальных растягивающих напряжений [5]. Эта область соответствует области ранних афтершоков. На нейтральной поверхности хотя бы одна из главных компонент тензора напряжений должна быть равна нулю. Напряжения растяжения считаются положительными, а напряжения сжатия – отрицательными. В окрестности нейтральной поверхности главные компоненты тензора напряжений меняют знак и имеют значительный градиент.

Изучение изгибных деформаций земной поверхности представляет собой очень сложную задачу. Во-первых, потому, что трансформация поворота жесткого включения в структуре среды в изгибную деформацию в его окрестности не опи-

сывается уравнениями. Во-вторых, изгибная деформация и соответствующие изгибные напряжения представляют собой локальное осложнение на фоне общей деформации сдвига. И, наконец, теория изгиба рассматривает идеальные объекты, ограниченные свободной поверхностью, а в природе мы имеем дело с ограниченной областью неоднородных горных пород. Так что единственное, на что мы можем пока претендовать – обнаружение связи процесса подготовки разрушения с очагами последующих землетрясений.

В настоящей работе исследуются особенности вариаций, снимаемых в процессе разрушения среды напряжений, полученные по данным о механизмах очага предшествующих событий. Для анализа выбраны 4 землетрясения 2011-2012гг. Одно из них произошло в зоне субдукции Тихоокеанской океанической плиты под Евразию, три других – в областях внутриконтинентальной коллизии Ближнего Востока.

Постановка задачи.

Компоненты тензора напряженно-деформированного состояния среды S_{ij} , определяемого по механизмам очага землетрясений, могут быть выражены через три главных значения S_1, S_2, S_3 и направляющие косинусы главных осей декартовой системы координат. Система координат, связанная с географической, определяет ось X как направление на восток, ось Y – на север, ось Z – к центру Земли. Тогда, главные значения тензора в тригонометрическом выражении имеют вид [4]:

$$\begin{aligned} S_1 &= S \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\varphi), \\ S_2 &= S \frac{2}{\sqrt{3}} \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{3}\right), \\ S_3 &= S \frac{2}{\sqrt{3}} \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

где S - интенсивность тензора напряжений, φ - угол вида напряженного состояния, изменяющийся в диапазоне: $0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$. Диапазон углов: 0° - 15° соответствует двухосному горизонтальному сжатию плоского слоя; 15° - 45° - взбросовому типу напряженного состояния в геологической интерпретации; 45° - 75° описывает одноосное горизонтальное сжатие, 75° - 105° – сдвиговый тип напряженного состояния; 105° - 135° характерен для одноосного горизонтального растяжения; 135° - 165° - сбросового типа механизмов очага; 165° - 180° соответствует двухосному горизонтальному растяжению.

Угол вида напряженного состояния определяется также параметром Лодена-Надаи, характеризующим соотношение главных значений тензора напряжений. Он равен:

$$\mu = \frac{(S_2 - S_3) - (S_1 - S_2)}{(S_1 - S_3)} = \frac{2S_2 - S_1 - S_3}{S_1 - S_3} = 2 \frac{S_2 - S_3}{S_1 - S_3} - 1$$

Его значения изменяются в диапазоне ± 1 , причем $\mu = 0 \pm 0,26$ описывает состояние сдвиговой неустойчивости среды. По существу, параметр Лоде-Надаи является косинусом угла вида напряженного состояния.

Анализ данных и полученные результаты.

В работе использовались данные о механизмах очага землетрясений Гарвардского университета [Harvard CMT Catalog] с магнитудой более 5.5, произошедших в рассматриваемых регионах за период с 1990 года по настоящее время. Сейсмо-тектоническая деформация региона определяется в основном сильными событиями. Данные, помимо общих сведений о времени, месте и силе землетрясения, содержат информацию о нормированной величине и ориентации тензора снимаемых в процессе вспарывания напряжений, а также – угловые параметры нодальных плоскостей.

Главные компоненты тензора снимаемых напряжений в данных каталога описываются угловыми параметрами векторов максимальных значений напряжения сжатия P и растяжения T, а также – ориентацией промежуточной оси N, которая совпадает с ориентацией плоскости подвижки. Составляющая напряжений вдоль этой оси представляет собой тангенциальные напряжения, снимаемые на разрыве. Значения величины снимаемых напряжений для каждого из событий нормированы на величину статического сейсмического момента M_0 . Рассмотрим каждый из анализируемых случаев подробно.

1. Землетрясение 11 марта 2011 года у восточного побережья острова Хонсю.

Сильнейшее землетрясение современности произошло в районе Японского желоба, на границе между Тихоокеанской и Евразийской тектоническими плитами. Тихоокеанская плита в этом регионе смещается на запад со средней скоростью 79 мм/год. Начиная с 1973 года, в этом районе произошло семь землетрясений с магнитудой более 7.0. В данном случае активизировался разлом длиной 300 км. и шириной по, почти вертикальному, падению около 150 км. Механизм очага типа взброса по близмеридиональной плоскости подвижки. Глубина гипоцентра 30 км., координаты эпицентра: 38,29°N; 142,37°E. Землетрясение с магнитудой $M=9.0$ сопровождалось одним из сильнейших цунами и унесло более 15700 человеческих жизней. За 2 дня до основного толчка, на расстоянии 40 км от гипоцентра наблюдались два сильных форшока. Афтершоки землетрясения происходят до сих пор.

На Рис.1. представлен район исследования – северная часть острова Хонсю. Эпицентр землетрясения 11 марта 2011 года обозначен звездочкой. Ось японского желоба и границы более мелких плит указаны сплошной линией. Механизмы очага предшествующих землетрясений почти все - взбросового типа. Гипоцентры землетрясений в прибрежной зоне расположены в пределах земной коры, на глубинах менее 35 км; западнее, под самой территорией острова наблюдаются и более глубокие события, что является наглядной иллюстрацией погружения океанической плиты. В левом нижнем углу приводится механизм очага землетрясения 11 марта 2011 года. Азимут главной оси сжатия (черная точка) 115° ; оси растяжения (белая точка) – 306° , что соответствует осредненным значениям для региона в целом (рис.3. 4.)

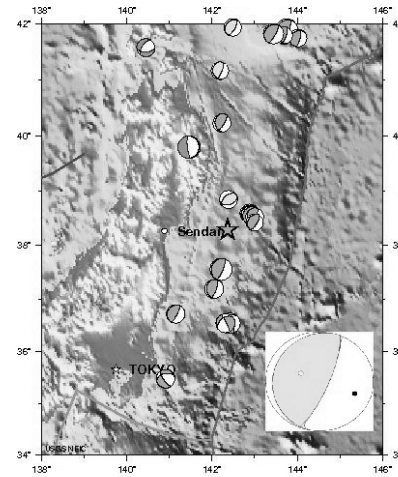


Рис.1

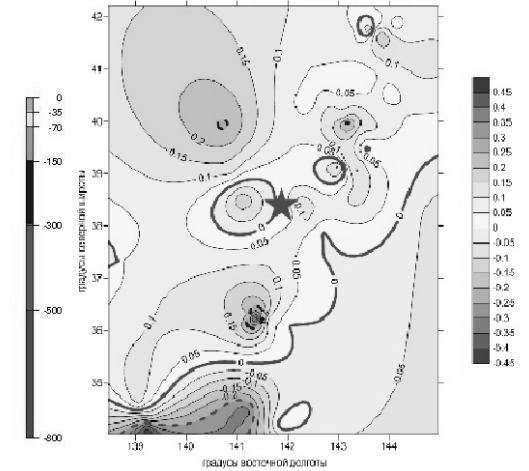


Рис.2

На Рис. 2 представлено распределение параметра Лодэ-Надаи в рассматриваемом регионе перед землетрясением 11 марта 2011 года. Изолинии положительных значений на северо-западе региона соответствуют напряжениям растяжения, на юго-востоке преобладают изолинии отрицательных значений, что свидетельствует о том, что здесь имеют место напряжения сжатия. Граничная область нулевых значений, выделенная утолщенной кривой, имеет особенности в виде отдельных областей резкой смены характера напряжений. Это объясняется существенной неоднородностью горных пород, образующих поверхностные структуры. Нулевая линия является проекцией на поверхность Земли нейтральной плоскости, разделяющей области сжатия от областей растяжения, согласно представлениям об изгибных деформациях в области очага готовящегося разрушения. Пунктиром обозначена граница между различными видами напряженного состояния. В данном случае это граница между сдвиговым типом напряженного состояния среды и состоянием одноосного горизонтального сжатия.

Как видно из рисунка 2, эпицентр землетрясения приурочен к области растяжения и находится на небольшом удалении от линии нулевых снимаемых напряжений. Океаническая плита в проекции на земную поверхность испытывает деформацию сжатия, а континентальная окраина – деформацию растяжения.

Гистограмма регионального распределения ориентации осей растяжения и сжатия представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

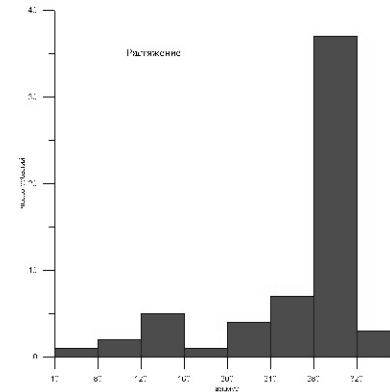


Рис. 3.

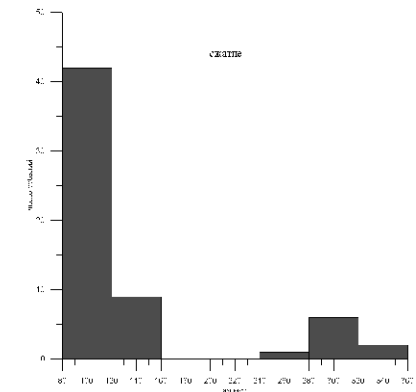


Рис. 4.

Как видно из рисунков, напряжения растяжения и сжатия в регионе строго ориентированы: ось Т в северо-западном направлении (азимут около 300°), ось Р – в восточном направлении (азимут $\sim 100^{\circ}$). Азимут отсчитывается от направления на север.

2. Землетрясение 23 октября 2011 года в восточной Турции.

Землетрясение с магнитудой 7,1 на глубине 16км произошло в зоне внутриконтинентальной коллизии Аравийской и Евразийской плит. Аравийская плита смещается в северном направлении со средней скоростью 24 мм/год. В результате землетрясения погибло 17000 человек.

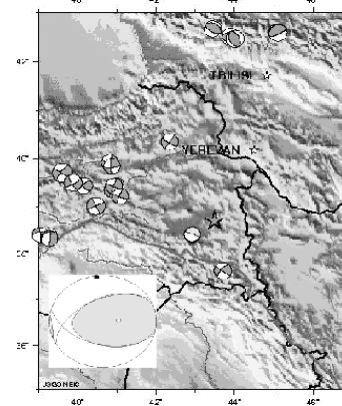


Рис.5.

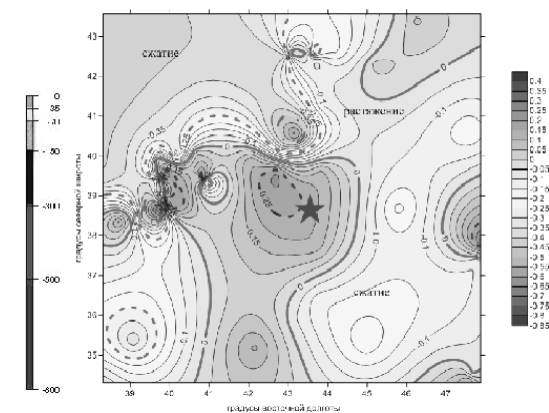


Рис.6.

На рисунке 5 показаны механизмы очага землетрясений, которые произошли в восточной Турции за исследуемый период. Основной тип механизмов очага западнее эпицентра изучаемого землетрясения типа сдвига, объясняется смещениями вдоль северо-анаатолийского разлома. Слева внизу дан механизм очага землетрясения 23 октября 2011 года. Механизм очага типа взброса по субши-

ротной плоскости подвижки. Азимут оси растяжения 344° , оси сжатия – 173° , что не вполне соответствует средним значениям для данного региона.

На рисунке 6 приводится соответствующее поле напряжений в параметрах коэффициента Лодэ-Надаи. Эпицентр землетрясения расположен в области растяжения и значительных градиентов напряжений между двумя нулевыми линиями. На северо-западе и юго-востоке от него выделяются области сжатия, что характерно для горных областей. Следует заметить, что эпицентр достаточно удален от нулевых линий. Пунктиром выделены области одноосного горизонтального растяжения и сжатия на уровне $\mu = \pm 0,25$. Территории восточной Турции соответствует состояние сдвиговой неустойчивости.

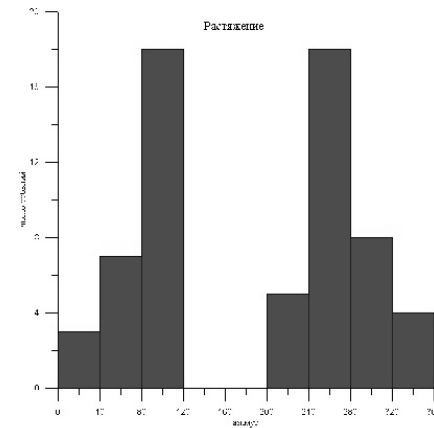


Рис. 7.

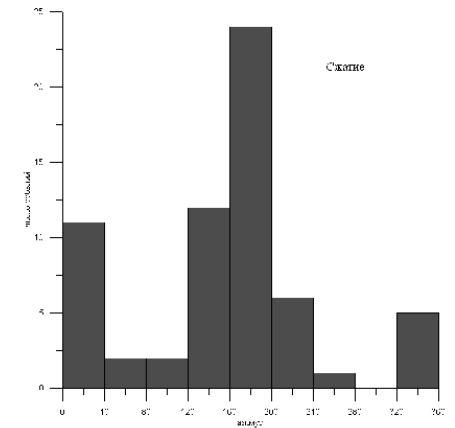


Рис. 8.

Распределение ориентации главных осей растяжения и сжатия, показанные на рисунках 7 и 8, свидетельствуют о неоднородности поля. Так на рис.7 выделяются два доминирующих направления ориентации оси растяжения T в азимутах 100 и 260 градусов. Ось сжатия более четко ориентирована в азимуте 180° .

3. Землетрясение 18 января 2011 года на юго-западе Пакистана.

Землетрясение с магнитудой 7,2 произошло в области подвига Аравийской плиты и Индостана под Евразию на глубине 68 км. Средняя скорость подвига 35–40 мм/год. Очаг землетрясения типа нормального сброса. Азимут оси растяжения 326° , оси сжатия – 100° .

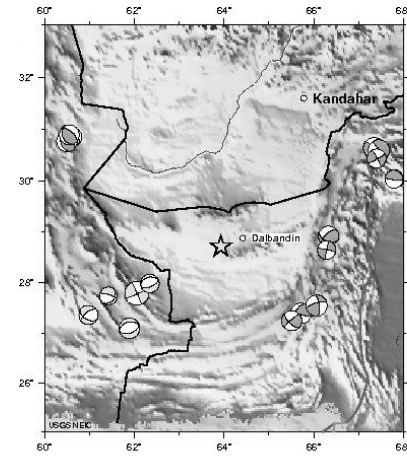


Рис.9.

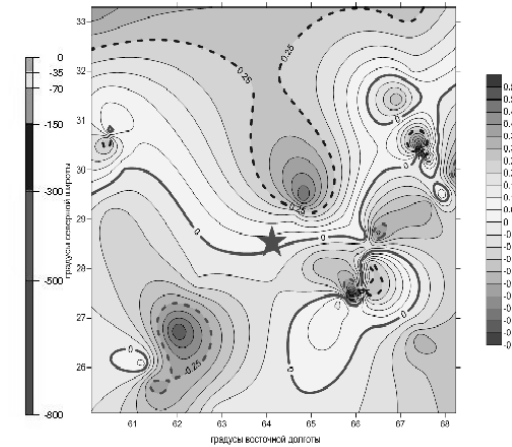


Рис.10.

На рисунке 9 приводятся механизмы очага землетрясений в рассматриваемом районе и эпицентр исследуемого землетрясения. На рисунке 10 показано поле снимаемых напряжений для землетрясений с магнитудой более 5. Эпицентр землетрясения 18 января 2011 года лежит в области растяжения почти на линии нулевых снимаемых напряжений в области высоких градиентов поля. Этот случай демонстрирует наиболее полное соответствие теории разрушения нагруженной неоднородной среды. Азимут оси растяжения 326^0 , оси сжатия -100^0 .

Распределение региональных напряжений, полученное по механизмам очага землетрясений, показано на рисунках 11 и 12. Поле напряжений еще более неоднородно и анализируемое землетрясение ему не соответствует.

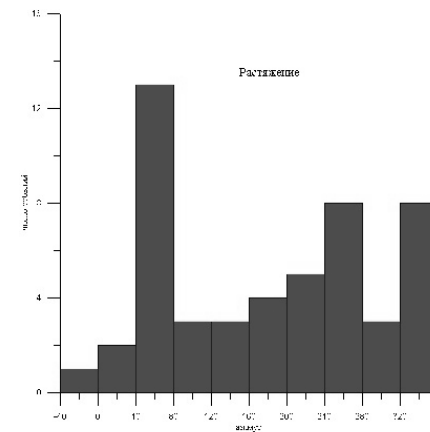


Рис.11.

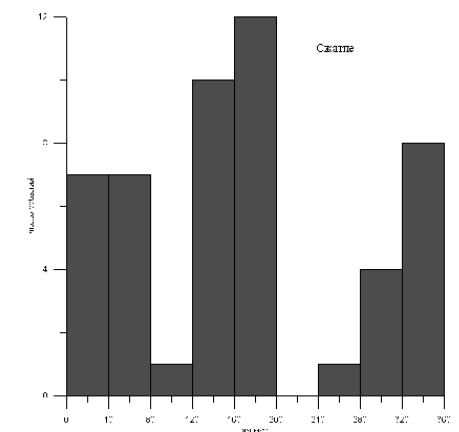


Рис.12.

4. Землетрясение 11 августа 2012 года на северо-западе Ирана.

Землетрясение магнитудой 6,4 произошло на глубине 10км на границе Аравийской плиты с Евразией. Эпицентр землетрясения, и механизмы очагов показаны на рисунке 13. Скорость движения Аравийской плиты в этой части региона по данным GPS наблюдений составляет 26мм/год. За последние 40 лет в этом регионе произошло семь землетрясений с магнитудой более 6,0.

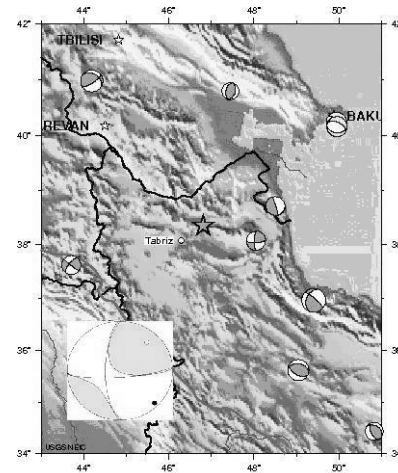


Рис.13.

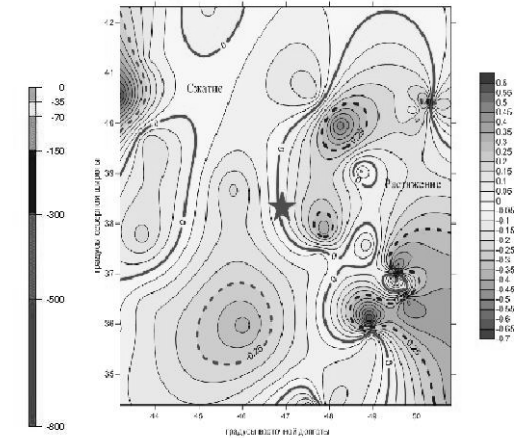


Рис.14.

Очаг землетрясения представляет собой сдвиг с элементами взброса. Азимут оси растяжения 48° , оси сжатия -308° . Поле вида напряженного состояния среды, представленное на рисунке 14, имеет вид, характерный для горных областей, т.е. – чередование полос сжатия и растяжения. Эпицентр землетрясения расположен вблизи нулевой линии в области растяжения.

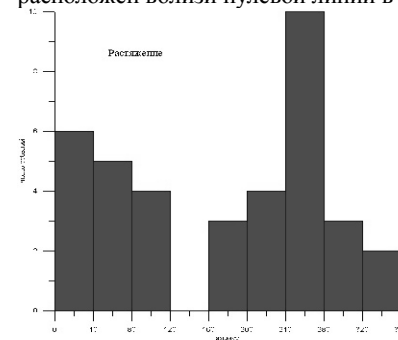


Рис. 15.

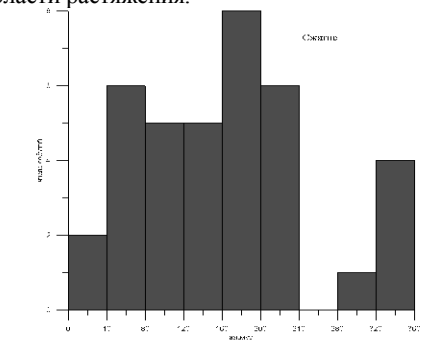


Рис.16.

Заключение.

Рассмотренные нами примеры показывают разнообразие напряженно-деформированного состояния неоднородной сейсмически активной среды в областях сильных землетрясений. Это, прежде всего, проявляется в вариациях наблюдаемых полей напряжений. Поля снимаемых сейсмотектонических напряжений не описывают полного поля региональных напряжений, но они позволяют делать некоторые выводы о динамических процессах в области очага землетрясения и моделях разрушения. Из наблюдений мы имеем:

1. Эпицентры землетрясений, в большинстве случаев, расположены в районе условной границы между положительными и отрицательными значениями снимаемых напряжений или в области контакта напряжений растяжения и напряжений сжатия;
2. Как правило, эпицентры смещены от нулевой нейтральной линии в область напряжений растяжения;
3. Очаги последующих событий наблюдаются вблизи зоны высоких градиентов.

Интерпретация полученных результатов может быть проведена с позиций теории мезомеханики разрушений [3]. Согласно этой теории, моменту макроразрушения среды предшествует образование на концах разлома деформации изгиба. Изгибные деформации инициируют возникновение трещин отрыва в локализованной полосе, что вызывает сдвиговую неустойчивость по всему разлому. Начало вспарывания в очаге землетрясения приурочено к месту пересечения нейтральной плоскости изгиба с плоскостью существующего разлома. Изгибные деформации вызывают упрочнение горной породы с одной стороны разлома и ее ослабление (в виде пор) – с другой стороны. Возникающее на трещинах отрыва напряжение растяжения снижает нормальное напряжение сжатия на разломе и ускоряет вспарывание в рамках теории Кулона-Мора.

Литература.

1. Воронина Е.В. Возможность прогноза сильного землетрясения по данным механизма очагов землетрясений. Сб. «Физические проблемы экологии (экологическая физика)» №16, стр.66-75, 2010г.
2. С.В.Гольдин, О.А.Кучай. Сейсмотектонические деформации в окрестности ильных землетрясений Алтая. «Физическая мезомеханика» том 11, №1, стр. 5-13, 2008г.
3. О.А.Кучай. Особенности проявления сильных землетрясений в поле сейсмотектонической деформации. «Геодинамика и тектонофизика» том 1, №3, стр.285-296, 2010г.
4. Лукк А.А., Юнга С.Л. Волновые возмущения сейсмотектонических деформаций и напряжений, реконструируемые по механизмам очага землетрясений. Сб. «Динамические процессы в геофизической среде», М., «Наука», стр. 21-39, 1994г.
5. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики. «Физическая мезомеханика» том 1, №1, стр.5-22, 1998г.

ВОЗМУЩЕНИЕ ЗОНАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ТРОПОСФЕРЕ
И НИЖНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ АТМОСФЕРНЫМИ ЛУННЫМИ
ПРИЛИВАМИ

А.А. Гаврилов

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

На основании анализа результатов численных экспериментов, на разработанной автором модели, выявлен и теоретически обоснован механизм инициирования атмосферными лунными приливами синоптических процессов, обусловленный возникновением растущих возмущений в неустойчивой вращающейся атмосфере Земли. С помощью теоретических расчетов показано, что атмосферные лунные приливы должны учитываться в численных моделях среднесрочного прогноза погоды в среднеширотной и полярной тропосфере обоих полушарий.

В нашей работе, которая была опубликована в предыдущем сборнике “Физическая экология” №18 [1], было показано, что незначительные по величине атмосферные приливы, как термические, так и гравитационные (солнечные и лунные), инициируют зарождение значительных, превышающих их по амплитуде на 2-3 порядка, крупномасштабных возмущений температуры, давления, плотности и скорости ветра в земной тропосфере обоих полушарий. Эти результаты были получены с помощью численной линеаризованной термогидродинамической модели возмущения зональной циркуляции атмосферными приливами, которая также была описана в этой работе.

В данной работе представлены результаты новых численных экспериментов, полученных на разработанной модели.

1. На первом этапе выполнения численных экспериментов выбиралась модель зонального ветра в тропосфере, возмущение которого атмосферными приливами в дальнейшем исследовалось. Для расчетов была выбрана, одна из типичных многочисленных моделей зональной циркуляции в тропосфере [2], с максимальными западными (≈ 34 м/сек на высоте ≈ 10 км) ветрами в средних широтах зимнего полушария и, примерно, в полтора раза меньшими западными ветрами в летнем полушарии. Широтно-высотные изолинии модели зональной циркуляции из [2] приведены на рис. 1.

В качестве постоянных возмущений зональной циркуляции рассчитывались атмосферные лунные приливы.

Численная линеаризованная термогидродинамическая модель возмущения зональной циркуляции в тропосфере атмосферными приливами, которую мы подробно описали в [1], позволяет рассчитать неустойчивые возмущения давления, плотности, температуры и скорости ветра в узлах координатной сетки численной модели по высоте, широте, а также и по времени, поскольку модель является также и нестационарной. Как показали численные эксперименты, получаемые численные неустойчивые решения являются экспоненциально растущими по времени, что обусловлено неустойчивой вращающейся зональной циркуляцией, которая была заложена во входных параметрах модели. О физических механизмах, приводящих к такой эволюции решений, будет сказано в специальном разделе данной работы.

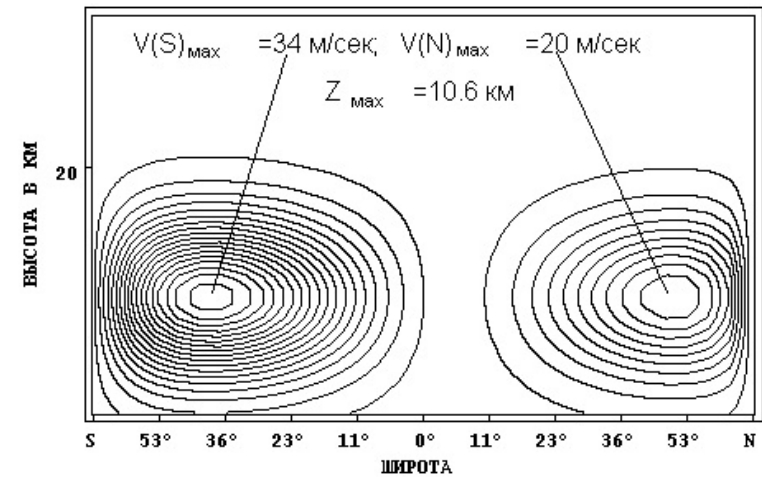


Рис. 1. Широтно-высотные изолинии зональной скорости ветра [2] для условий зимнего солнцестояния в Северном полушарии (повсюду западный перенос - положительное направление на восток).

Неустойчивые численные решения, экспоненциально растущие по времени, с учетом долготной зависимости $\exp(-is\varphi)$ (где s -долготное волновое число; φ -долгота), для метеорологических параметров представлялись в следующем виде:

$$u, v, w, p, \rho, T \approx f(z, \theta) \cdot \exp - i(\omega_s \cdot t + s \cdot \varphi + \beta_0), \quad (1)$$

В выражении (1) $f(z, \theta)$ - некоторая комплексная функция координат: высоты z и кошироты θ , $\omega_s = \Omega_s + i\zeta_s$ - комплексная частота возникающего возмущения; $t_s = 1/\zeta_s$ - характерное время нарастания неустойчивого возмущения; $T_s = 2 \cdot \pi / \Omega_s$ - период возникающего нестационарного возмущения; β_0 - некоторая начальная фаза. Поскольку в численных экспериментах была выбрана конкретная модель зонального ветра в тропосфере, постольку комплексная частота ω_s , а также t_s и T_s будут жестко определяться долготным волновым числом s , значение которого также задавалось для каждого численного эксперимента. Что касается начальной фазы неустойчивого возмущения β_0 , то она является по существу неопределенной и зависит от случайных начальных условий. В зависимости от этих условий, начальная фаза β_0 может иметь любое значение, и в этом мы сможем убедиться в дальнейшем.

2. Некоторые результаты численных расчетов.

На рис. 2 приведен, полученный в численном эксперименте, широтно-высотный рельеф амплитуды неустойчивого возмущения температуры $\Delta T(i)$. Оно инициируется в численной модели 8 часовым атмосферным лунным приливом. Время роста амплитуды неустойчивого возмущения t_s в е раз составило ≈ 45 часов. Период возмущения T_s составил 14.6 суток. Для этого численного эксперимента

значение долгого волнового числа неустойчивых возмущений s принималось равным 3. Как видно из рисунка, рельеф возмущения расположен в средних и высоких широтах обоих полушарий. Разумеется, меняя модель зональной циркуляции в численных экспериментах, можно изменять вид профиля амплитуды возмущения температуры $\Delta T(i)$ и параметры T_s и t_s .

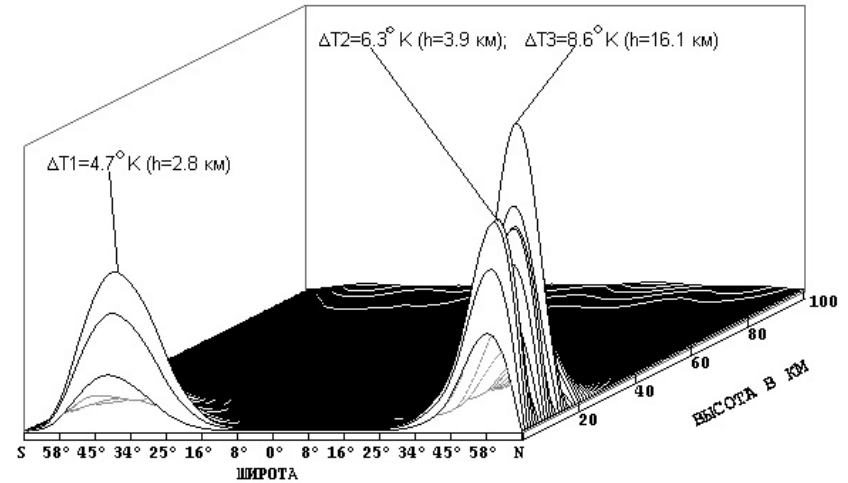


Рис 2. Широтно-высотный рельеф амплитуды неустойчивого возмущения температуры $\Delta T(i)$. Решение с источником постоянных возмущений в виде третьесуточного лунного прилива ($s=3$) при использовании модели зональной циркуляции в тропосфере для лета в Северном полушарии.

Значения профиля $\Delta T(i)$ на рис. 2 получены на 20 сутки интегрирования система уравнений численной модели, описанной в [1]. Как видно из рисунка, амплитуда возмущения температуры $\Delta T(i)$ может достигать значения 9.5°K . Поскольку расчеты проводились на линеаризованной модели, нестационарные уравнения геофизической гидродинамики для определения возмущений первого порядка малости численно интегрировались по времени до тех пор, пока амплитуда возмущений оставалась много меньше значений основного состояния, относительно которого проводилась линеаризация. Т.е. отношения ρ_1/ρ_0 , p_1/p_0 , T_1/T_0 при численном интегрировании должны были быть $\ll 1$. Мы ограничивали численные решения для значений этих отношений равными ≈ 0.05 . Как видно из рис. 2, широтный рельеф амплитуды возмущений температуры имеет ассиметричный характер. В Южном полушарии максимум амплитуд приходится на средние широты ($\varphi \approx 45^{\circ}\text{S}$), в Северном максимум рельефа смещается к полярным широтам ($\varphi \approx 60^{\circ}\text{N}$). Рельеф амплитуд возмущений температуры в Северном полушарии имеет 2 разновеликих максимума по высоте, с наибольшим значением 9.5°K на высоте $\approx 16\text{ км}$.

В этом и в последующих численных экспериментах строились широтно-высотные изолинии меридиональной функции тока ψ неустойчивых возмущений, которые наглядно демонстрируют меридионально - высотное расположение

ячеек циркуляции, обусловленных эволюцией неустойчивых возмущений. Меридиональные функции тока ψ_u для сферической вращающейся системы координат определялись интегрированием известной зависимости меридиональной скорости ветра U от производной $\partial\psi_u / \partial z$ [1];

$$U = e^{\frac{z}{H}} \cdot \frac{1}{\sin \theta} \cdot \frac{\partial\psi_u}{\partial z}, \quad (2)$$

На рис. 3 приведены рассчитанные широтно-высотные изолинии меридиональной функции тока неустойчивых возмущений для уже описываемого выше численного эксперимента.

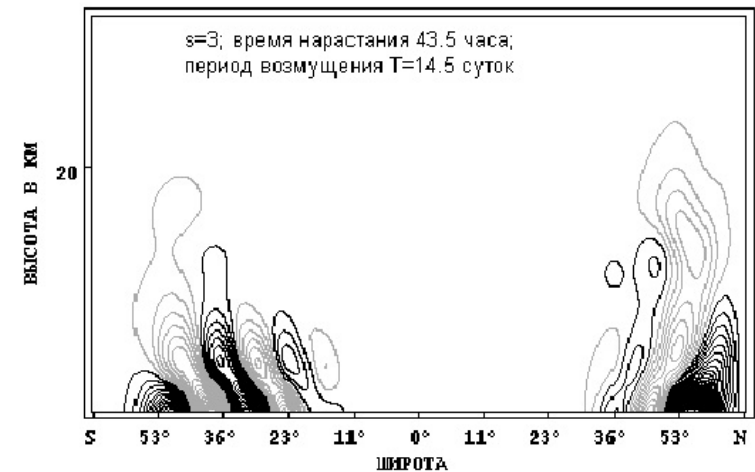


Рис. 3. Широтно-высотные изолинии меридиональной функции тока неустойчивых возмущений, инициируемых лунным 8 часовым атмосферным приливом. Темные линии- вращение по часовой стрелке, серые-против часовой

Расположение изолиний меридиональной функции тока наглядно иллюстрируют, что возникающие метеорологические крупномасштабные возмущения представляют собой цепочку тороидальных (тэйлоровских) вихрей, расположенных по направлению меридиана от одного полюса до другого. На рис. 3 достаточно четко видны в Северном полушарии и ячейки Ферреля, и полярные ячейки, которые, как считается [3], формируют меридиональную циркуляцию и вариации в зональной циркуляции, т.е. долгосрочную погоду.

Вычисленное значение периода неустойчивого возмущения $T_s = 14.5$ суток показывает, что эти возмущения можно отнести к классу синоптических. А значение характерного времени нарастания $t_s = 43.5$ часа одного порядка с экспериментально

наблюдаемым временем нарастания синоптических процессов таких же периодов в тропосфере

Фаза атмосферного лунного прилива имеет специфику, характерную и для океанского прилива и обусловленную, так называемым лунным запаздыванием. Лунное запаздывание заключается в том, что фаза лунного прилива (время наступления его максимального значения) изменяется ото дня ко дню, поскольку Луна обращается вокруг Земли. Как было отмечено выше, начальные фазы неустойчивых возмущений β_0 неопределенны и зависят от случайных начальных условий. Поэтому, можно предположить, что β_0 будет также зависеть и от фазы лунного прилива, т.е., будет связана с оборотным движением Луны вокруг Земли. Для проверки этого предположения был проведен численный эксперимент. На рис. 4 приведены широтно-высотные изолинии меридиональных функций тока неустойчивых возмущений, которые инициируются 8 часовым лунным приливом с $s=3$, но с смещенной начальной фазой приливообразующего потенциала Луны на 180° относительно ее значения из предыдущего эксперимента.

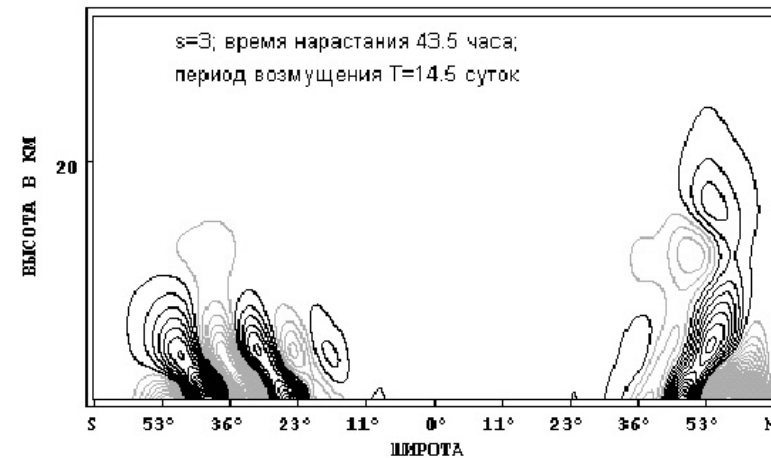


Рис. 4. То же самое, что и на рис. 3, но для фазы лунного приливообразующего потенциала сдвинутого на π относительно его значения из предыдущего численного эксперимента.

Такой сдвиг соответствует временному сдвигу фазы на 4 часа для 8 часового лунного приливообразующего потенциала. 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 циркуляционные системы неустойчивых возмущений имеют противоположное направление вращения по сравнению с циркуляционными системами, приведенными на рис. 3.

Из анализа рис.3 и рис.4 следует очевидный вывод: атмосферные лунные приливы инициируют неустойчивые синоптические процессы в среднеширотной и

полярной тропосфере обоих полушарий, начальная фаза зарождения которых жестко связана с, непрерывно меняющимся, положением на небесной сфере лунного приливообразующего источника. При этом важно подчеркнуть, что основные характеристики инициируемых синоптических процессов - характерное время роста возмущений и их период - зависят от долгого волнового числа s начальных возмущений (атмосферных лунных приливов, которые являются их инициаторами), широтной зависимости существующего зонального ветра в тропосфере (которую возмущают атмосферные лунные приливы) и вертикальных градиентов зонального ветра в тропосфере.

Анализ полученных результатов позволил классифицировать нарастающие решения в терминах геофизической гидродинамики. Эти решения можно отнести или к классу решений для инерционно-гироскопических волн (аналог двумерных волн Россби), или к классу внутренних (трехмерных) инерционно-гироскопических волн.

3. Механизм инициирования синоптических процессов атмосферными приливами.

Как было отмечено выше, неустойчивые возмущения возникают в численной модели только при наличии вертикальных градиентов зонального ветра в модели зональной циркуляции. Разработанная нами модель, является одной из моделей геофизической гидродинамики, поскольку в ней учтены сферичность и вращение Земли. В моделях атмосферы геофизической гидродинамики атмосфера вращается вместе с Землей и на нее действуют центробежная сила. А применительно к такому случаю, можно вспомнить классическую работу *G.I. Taylor* [4] о возникновении неустойчивых возмущений при вращении жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами. Очень качественный анализ возникновения неустойчивости вращающейся жидкости проделали Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшиц [5].

По аналогии с [5] нами был определен параметр центробежной неустойчивости $(\text{ПЦН})_{ij}$ для каждого узла координатной сетки (по кошироте θ_i и высоте z_i) нашей модели. Его расчет производился по следующей формуле:

$$\text{ПЦН}_{i,j} = \left(\frac{g_a - r_{j+1} \cdot \sin \theta_i \cdot \Omega_{i,(j+1)}^2}{g_a - r_j \cdot \sin \theta_i \cdot \Omega_{i,j}^2} \right) \cdot \frac{\rho_{j+1}}{\rho_j}, \quad (3)$$

где: g_a - ускорение силы гравитационного притяжения Земли; $r_{i+1} = a + z_{i+1}$, $r_i = a + z_i$; a - радиус Земли; ρ_{j+1} , ρ_j - плотность атмосферы для двух последовательных слоев атмосферы на высоте z_{j+1} и z_j соответственно; $\Omega_{i,(j+1)}$, $\Omega_{i,j}$ - абсолютная угловая скорость вращающегося элемента атмосферы (с учетом собственной циркуляции атмосферы) в узлах координатной сетки (θ_i, r_{j+1}) и (θ_i, r_j) . Для условий первого численного эксперимента, результаты которого показаны на рис. 2 и рис. 3 были рассчитаны широтно-высотные изолинии ПЦН, которые показаны на рис. 5.

Согласно качественному анализу, неустойчивость зонального потока в атмосфере возможна для тех областей атмосферы, для которых значение $\text{ПЦН} > 0$. Как видно из рис. 5, для используемой при расчетах модели циркуляции значения ПЦН всюду отрицательно. Но, есть области атмосферы, в которых значение $\text{ПЦН}_{\text{крит}}$ близко к 0. Эти области, по две в каждом полушарии, расположены на широтах $\approx 45^\circ \text{ S}$ и 60° N . При определении областей неустойчивости зональной циркуляции был применен качественный анализ, т.е. некоторые геофизические процессы, на-

пример, турбулентная вязкость при этом не были учтены. А при проведении численных расчетов на нашей модели эти процессы были учтены. Анализ поведения изолиний ПЦН, приведенных на рис. 5, показывает существование областей атмосферы, с критическими значениями ПЦН. При численном моделировании для этих областей могут существовать неустойчивые решения. Анализ результатов численного эксперимента, приведенных на рис. 2, подтверждает эти качественные выводы. Как видно из рис. 2, как раз для этих областей, расположенных в Южном полушарии на широте $\varphi \approx 45^\circ\text{S}$ и в Северном для $\varphi \approx 60^\circ\text{N}$, появляются мощные нестационарные возмущения синоптических масштабов. Причем для Северного полушария имеется два максимума амплитуды синоптических возмущений в нижней тропосфере, на высоте $z \approx 2$ км и в нижней стратосфере, соответствующие высотам существования наиболее неустойчивым западным течениям. В Южном полушарии в распределении амплитуд синоптического возмущения присутствует только один максимум на высотах нижней тропосферы. Отсутствие второго максимума синоптических возмущений на высотах нижней стратосферы, аналогичного его существованию в Северном полушарии, можно объяснить более высоким по абсолютной величине значением ПЦН для зональных течений на этих высотах, а значит отсутствию условий для возникновения неустойчивых решений, растущих экспоненциально по времени.

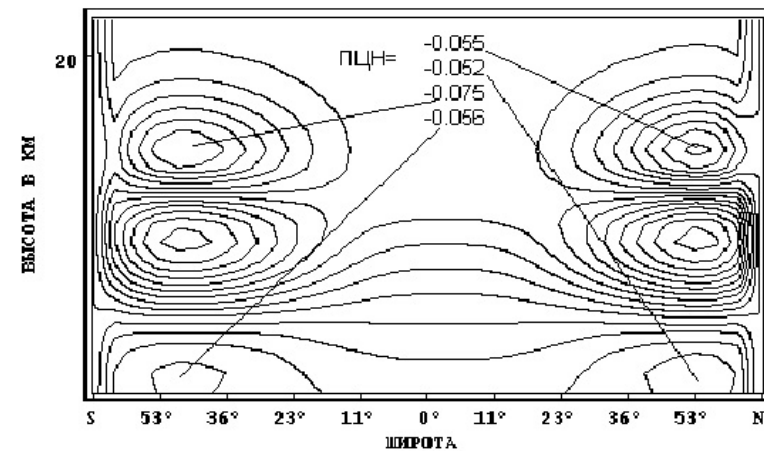


Рис. 5. Широтно-высотные изолинии параметра центробежной неустойчивости (ПЦН) зональной циркуляции атмосферы в момент летнего солнцестояния в Северном полушарии.

Таким образом, с помощью эвристического подхода к выводу формулы для параметра центробежной неустойчивости атмосферы и численных экспериментов, на разработанной автором модели, удалось выявить механизм инициирования синоптических возмущений в среднеширотной и полярной тропосфере и нижней стратосфере обоих полушарий.

4. Некоторые комментарии к современной идеологии прогноза погоды.

Прежде всего, приведем традиционное определение погоды [6]: “Погода есть совокупность непрерывно меняющихся значений метеорологических элементов и атмосферных явлений, наблюдаемых в данный момент времени в той или иной точке пространства. Понятие “погода” относится к текущему состоянию атмосферы, в противоположность понятию “климат”, которое относится к среднему состоянию атмосферы за длительный период времени“. Этот термин можно перефразировать и так: “погода – это текущее термогидродинамическое состояние атмосферы”.

На XLVI научных чтениях памяти К.Э. Циолковского нами был представлен на пленарном заседании доклад «Хаотичность современной погоды. Анализ возможного выхода из “тупика”» [7]. Поскольку научные чтения им. К.Э. Циолковского имеют специфический уклон в сторону космонавтики, то при написании доклада пришлось почерпнуть много интересных фактов из истории космических исследований на службе погоды.

С самого начала космической эры изучение земной погоды стало одной из основных задач космонавтики. Впервые метеорологические наблюдения из космоса в Советском Союзе проводились с борта искусственного спутника Земли “Космос-144”, запущенного 28 февраля 1967 года. С 1969 года метеорологические спутники стали называться так же, как и система в целом, - “Метеор”. В сентябре 2009 г. для этих целей в России запущен метеорологический спутник “Метеор-М” №1. В январе 2011 года на геостационарную орбиту на 76 градусе восточной долготы над Индийским океаном был запущен спутник «Электро-Л». Сейчас есть зарубежные аналогичные спутники — европейский Meteosat, японский GMS, американские спутники, которые эксплуатируются много лет.

В мире тратятся огромные средства на изучение Земли и земной погоды. Это и наземные станции, и орбитальные аппараты. По мониторингу Земли с орбиты пальму первенства держат США и Западная Европа. Европейское космическое агентство, ESA, оперирует целым комплексом инструментов различного назначения, и каждый из них в той или иной степени может работать на предсказание изменений климата и прогнозы погоды. Группировка орбитальных аппаратов передает на Землю более 100 терабайт данных в год, 3 тыс. проектов используют эти данные на Земле. Бюджет ESA составляет ≈ 3 млрд € [8] Бюджет НАСА в 2012г. составляет ≈ 18 млрд \$ [9], бюджет Роскосмоса -117 млрд руб. [10].

Нет даже необходимости приводить примеры из нашей повседневной жизни, характеризующие впечатляющее применение достижений космической индустрии - они многочисленны и общеизвестны.

Но, трагические события лета 2010 года на Евразийском континенте: потоп в Пакистане, наводнение в Центральной Европе, аномально высокая жара в центральной части Европейского региона РФ показали, насколько мизерны наши знания о гидродинамических процессах в небесах на земле и на воде, и насколько уязвимыми мы являемся перед природными катаклизмами из-за их (знаний) отсутствия, или из-за их неудовлетворительного качества.

Это касается и прогнозов погоды. И это признала недавно самый авторитетный орган по прогнозу погоды -ВМО. В своем Заявлении о научной основе и об ограничениях для прогнозирования погоды и перспективных оценках климата она продекларировало свои достижения [11]: “..., прогнозы на трое суток для призем-

ного давления настолько же хороши, как прогнозы на сутки, которые выдавались 20 лет назад, что является величайшим научным достижением”.

Службы погоды РФ, естественно, не отстают в рекламе своих достижениях от своих старших по рангу коллег.

В связи с такими заявлениями, у многих специалистов, из отраслей знаний не связанных непосредственно с изучением погоды, да и у огромного количества простых налогоплательщиков, все эти впечатляющие технические и финансовые возможности вызывают лишь раздражающее недоумение, вынуждая задать резонный вопрос: как при таких объемах информации и задействованных ресурсах ученые только разводят руками, когда требуется точное прогнозирование даже на небольшой период времени?

Почему возникла такая тупиковая ситуация в прогнозах погоды? Т.е. дальнейшее накопление экспериментальных данных с помощью больших затрат, в том числе и с использованием очень дорогостоящей космической техники не дает значимого улучшения прогноза.

Специалисты многих стран, причем, авторитетнейшие специалисты, занимающиеся прогнозированием погоды, концептуально обосновали возникшую ситуацию, введя термин «детерминированная непредсказуемость прогноза» (горизонт поведения атмосферы устанавливает фундаментальное ограничение порядка 2-3 недель [11-12] для детерминистских предсказаний, связанных с быстрым возрастанием ошибок исходных условий, возникающих из несовершенных и неполных наблюдений).

Все эти обоснования базировались, в основном на исследованиях для задачи о конвекции морской воды в плоском слое, которые проводил Эдвард Лоренц [13] и, который, проинтегрировав существенно упрощенные, но все-таки нелинейные уравнения Навье-Стокса, показал, что решение таких нелинейных уравнений чрезвычайно чувствительно к возмущениям начальных данных. И каждый раз, меняя точность представления начальных данных, на выходе системы получают совершенно другое решение, т.е. другой прогноз. Лоренц произвольно перенес свои выводы на численное моделирование прогнозов погоды.

Правда, уже вскоре появились работы, например [14], в которых утверждалось, что “обрезание” Э. Лоренцом исходных уравнений конвективного движения, методику решения которых до этого разработал Б. Зальцман [15], несколько некорректны, поскольку при таком подходе “вырезаются” решения для турбулентных пульсаций из исходных уравнений, а значит, исключается участие стохастических процессов в формировании неустойчивых решений.

Тезис Э. Лоренца, который подхватили сотни специалистов и миллионы дилетантов, звучал красиво и очаровательно: “Если земная атмосфера устроена так, как он себе это представлял, то взмах крыльев бабочки в нужном месте и в нужное время может изменить погоду, скажем через две-три недели, в громадном регионе. Отклонения от исходной траектории, вызванные взмахом крыльев бабочки, постепенно приведут к смене погодных условий на большой территории, т.е. малые причины вызывают большие последствия”.

На основании результатов своих исследований и своих предположений Эдвард Лоренц в 1972 году опубликовал работу “Предсказуемость: может ли взмах крыль-

ев бабочки в Бразилии вызвать торнадо в Техасе” [16]. Так родился знаменитый термин “эффект бабочки”.

Математики Д. Рюэль (Франция) и Ф. Такенс (Нидерланды) показали, что Э. Лоренц в своих исследованиях обнаружил так называемый “странный аттрактор”, (от англ. attract - притягивать), названный ими “аттрактором Лоренца” в его честь [17]. Эти аттракторы возникают в нелинейных системах, которым присуща неустойчивость.

Д. Рюэль и Ф. Такенс с помощью теории странных аттракторов попытались объяснить возникновение загадочной турбулентности, как ранее это пытались сделать Л. Ландау [5] и Е. Хопф [18], но тоже не смогли этого сделать.

Последующие исследования, в течение нескольких десятилетий, с помощью теории “странных аттракторов” ничего конкретного для целей численных прогнозов погоды не дали. В то же время, манипулирование терминами “странный аттрактор”, “эффект бабочки” в околонаучной среде привело к тому, что в настоящее время специалисты среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды получили как бы индульгенцию, а идеология численных прогнозов погоды на эти сроки просто зашла в “тупик”.

5. Анализ возможного выхода из “тупика”.

На основании полученных результатов можно предложить следующую, логически безупречную, с геофизической точки зрения, цепочку событий формирования 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 неравномерное поглощение солнечной радиации по широте, возникают горизонтальные градиенты температуры, а значит и давления. Под влиянием вращения Земли возникает западный перенос воздушных масс в среднеширотной тропосфере обоих полушарий и менее мощный восточный перенос в приэкваториальной тропосфере. Эволюция переноса (циркуляции) и формируют климат на Земле. Целый спектр геофизических и астрономических факторов приводит к появлению возмущений, которые из-за термогидродинамической неустойчивости атмосферы инициируют крупномасштабные метеорологические 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 синоптических процессов, а значит и в формировании среднесрочной и долгосрочной погоды.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сформулировать следующие практические рекомендации по изменению идеологии прогноза погоды в тропосфере и нижней стратосфере.

1. Необходимо построить ежедневные широтно-высотные распределения атмосферных термических (обусловленных поглощением солнечной радиации озоном и водяным паром) и гравитационных (солнечных и лунных) приливообразующих источников.

2. Численные термогидродинамические прогнозы погоды необходимо делать с учетом рассчитанных распределений атмосферных приливообразующих источников

В заключение следует отметить, что полученные результаты не имеют отечественных и зарубежных аналогов.

Литература

1. А.А. Гаврилов. Численная гидродинамическая модель метеорологических крупномасштабных процессов, инициируемых атмосферными приливами// Физические проблемы экологии (экологическая физика). Москва-2012. Московский государственный университет. Макс-Пресс. С. 81-92.
2. *Tapio Schneider*. The General Circulation of the Atmosphere// *Annu.Rev.Earth.Planet.Sci.* - 2006. - P. 655-688.
3. Лоренц Э. Природа и теория общей циркуляции атмосферы// Л., Гидрометеиздат. 1970г. 260 с
4. *G. I. Taylor*, *Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 223 (1923), 289—343.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика// Москва «Наука», Главная редакция физико-математической литературы. 1986. С. 736.
6. Хромов С.П., Мамонтова Л.И.// Метеорологический словарь. Л., Гидрометеиздат. 1974. - 568 с.
7. А.П. Капица, А.А. Гаврилов. Хаотичность современной погоды. Анализ возможного выхода из “тупика”// Материалы XLVI научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга. 2011. Издательство “Эйдос”. С. 12-13.
8. <http://www.securitylab.ru/news/tags/ESA/>
9. <http://www.gisa.ru/81036.html>
10. <http://vz.ru/economy/2012/4/6/573255.html#>
11. http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/chy/documents/underdisc/statement2_ru.pdf
12. Г.Г. Малинецкий, С.П. Курдюмов. Нелинейная динамика и проблемы прогноза// Вестник РАН, 2001г., том 71, № 3, с. 210-232.
13. *E. Lorenz*. Deterministic nonperiodic flows// *J. Atmos. Sci.* **20** (1963), 130-141.
14. *J. Marsden*. Attempts to relate the Navier-Stokes equations to turbulence// *Lecture Notes in Mathematics*, 615, Springer-Verlag, New York-Berlin_Heidelberg, 1977.
15. *Saltzman B*. Finite amplitude free convection as initial value problem-I// *J.Atmos.Sci.*, 1962, **19**, pp.329-341.
16. *Lorenz, Edward Norton* "Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas?" Address at the 139th Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science, Sheraton Park Hotel, Boston, Mass., December 29, 1972.
17. *D. Ruelle and F. Takens* On the nature of turbulence// *Communications of Mathematical Physics*. 1971. **20** (3): 167–192.
18. *Hopf E*. Abzweigung einer periodischen Lösung von einer stationären Lösung eines Differentialsystems (bifurcation of a periodic solution from stationary solution of a system of differential equations)// *Ber. Math-phys. Kl. Sachs. Akad. Wiss. Leipzig*. 1942, **94**, 3-22.

ПРЕОДОЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КРИЗИСА
И ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИРОВОЗЗРЕНИЯ
НОВОГО ТИПА

В.А. Гордиенко^а, К.В. Показеев^а, М.В. Старкова^б,

^аМосковский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет.

^бФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами
„РосРАО“».

...С каменного века в человеческом мозгу ничего не изменилось, и теперь получается страшный раздраз: людям с интеллектом каменного века дают в руки невероятную энергию.

Человечество – это множество людей, а у множества людей есть «выбросы» и вверх, и вниз. Люди все глубже и глубже изучают природу разрушения, ставят все большие физических опытов... А теперь представьте себе, что физики в процессе экспериментов сделали шаг, после которого стала гореть вся материя. И сгорела Земля, сгорели люди – сгорело все! Дорасцеплялись...

А где-то в нашей Галактике мечтательно скажут: Вон вспыхнула новая звезда....

Б. Раушенбах. Постскриптум

Стоит заметить, что антропогенное «разрушение биосферы» – не результат работы безразличных людей. Скорее, это продукт деятельности людей со степенями бакалавров, магистров бизнес-администрирования и докторов наук.

Дэвид Орр, профессор факультета экологии колледжа, Оберлин, Огайо.

1. Введение

Предлагаемая статья носит, на наш взгляд, дискуссионный характер, поскольку некоторые высказанные в ней утверждения являются спорными, хотя и опираются на целую серию результатов экспериментальных исследований. Вместе с тем, не говорить о них, наверное, будет не совсем правильно. Сколько раз Природа доказывала нам несостоятельность целого ряда, казалось бы, твердо установленных научных прогнозов вопреки неким «ненаучным» или даже «псевдонаучным» знаниям. Это, например, и проблема изменения уровня каспийского моря, и озоновых дыр, и эволюция по Ч. Дарвину, и т.п.

Экологические кризисы неоднократно возникали в истории Земли. Глобальные кризисы являлись следствием или развития самой биосферы (например, возникновение кислородной атмосферы, изменения климата, перемещения магнитных полюсов Земли и т.п.) или в результате космических влияний (падение крупных метеоритов, изменение положения земной оси). Во всех случаях они вели к радикальной перестройке биосферы, гибели многих ранее существовавших форм жизни, изменению «траектории» эволюции. В настоящее время возникла еще одна причина глобального экологического кризиса – *антропогенное воздействие на биосферу*. Гибель мира в различных вариантах, в том числе, в результате деятельности человека, предсказывалась с древнейших времен. Но вот наступил момент, когда перед цивилизацией встала реальная угроза глобального антропогенного экологического кризиса (апокалипсиса). Здесь следует отметить, что жизнь в целом (как постулировал В.И. Вернадский) – геологически вечна, и она приспособится к новым условиям среды. Этому есть многочисленные подтверждения в палеоистории Земли. Так, например, до сих пор, несмотря на всевозможные катаклизмы и исчезновение многих видов биоразнообразия, на Земле существуют цианобактерии. Относительно недавно в глубинах Тихого океана обнаружены более древние представители жизни, возникшие еще до формирования кислородной атмосферы Земли, и не нуждающиеся в кислородном «дыхании» (рис. 1). **Судьба человека более проблематична.** Избежать «геологических» катаклизмов вряд ли удастся. К ним можно будет лишь подготовиться, чтобы пережить, например, новый ледниковый период, или нарушение озонового слоя, как правило, происходящее при инверсии магнитных полюсов Земли.

Немного легче рассуждать о возможности предотвращения экологических кризисов, вызванных антропогенным воздействием. Большинство специалистов, исследовавших экологические проблемы, считают, что у человечества есть еще время

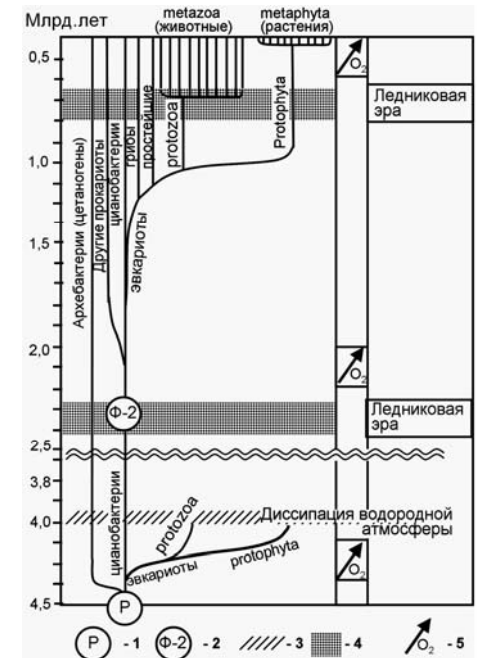


Рис.1. Эволюция жизни в докембрии: 1 – возникновение жизни; 2 – появление механизма фотосинтеза кислорода (фотосистемы – 2); 3 – приблизительное время диссипации первичной водородной атмосферы; 4 – ледниковые эры, состоящие из нескольких ледниковых периодов; 5 – эпохи ускоренного накопления биогенного кислорода в гидросфере и атмосфере.

для решения вопросов собственного выживания [1]. Но этот период достаточно короток. Анализируя экологическую и социально-экономическую обстановку экологии склонны выделять 5 основных направлений выхода из глобального экологического кризиса:

- эколого-просветительное, включающее формирование «нового типа» мировоззрения (существует мнение, что пока не удастся серьезно реализовать эколого-просветительное направление, единственный путь выхода из экологического кризиса может заключаться в использовании государственных и международных механизмов, опирающихся на «экологизацию» технологий и совершенствование механизмов охраны окружающей среды);
- «экологизация» технологий (промышленная экология);
- совершенствование механизмов охраны окружающей среды;
- административно-правовое направление;
- международно-правовое.

При этом все компоненты биосферы охранять надо не по отдельности, и не в отдельно взятой стране, а в целом как единую природную систему.

2. Возможности формирования мировоззрения нового типа

2.1. Некоторые проблемы социальной экологии, связанные с преодолением экологических кризисов

Первое направление из упомянутых выше (эколого-просветительное) связано, прежде всего, с *формированием нового эколого-правового мировоззрения*. Считается, что для преодоления экологического кризиса и последовательного решения проблем окружающей среды России и человечеству необходимо совершенно новое и ценностное юридическое мировоззрение, например, основанное на учении о ноосфере. Признавая свою жизнь высшей ценностью, человек должен учиться ценить все живое на Земле для того, чтобы решительно перестроить условия совместного бытия человечества и природы. Сюда же относится *экологическое воспитание и подготовка специалистов-экологов*. «Только переворот в умах людей принесет желанные перемены. Если мы хотим спасти себя и биосферу, от которой зависит наше существование, все... – и стар и млад – должны стать настоящими, активными и даже агрессивными борцами за охрану окружающей среды» – такими словами завершает свою книгу Уильям О. Дуглас¹.

Вместе с тем, всегда надо отдавать отчет, что существование любого типа общества обусловлено исторически. Существует исторический процесс, приводящий общество к тому состоянию, в котором мы его находим. С другой стороны, столь же несомненным представляется тезис, что существование общества обусловлено окружающей средой, обусловлено экологически. Внимательный исследователь обнаруживает сложную систему отношений и связей с окружающей природной средой, позволяющую человеку и обществу в целом сохранять жизнеспособное состояние, не деградировать.

¹ Уильям Орвилл Дуглас (1898-1980) – член Верховного суда США в течение 36 лет и 209 дней. Считается самым справедливым в истории Верховного суда США.

Есть все основания полагать, что историческая обусловленность общественного бытия в сознании людей почти всегда доминировала над его экологической обусловленностью, что находило отражение в принятых системах ценностей. На первый план всегда выдвигались экономические и политические интересы. Общество стремилось сохранить и преумножить накопленные богатства. Всегда казалось, что это важнее, чем сохранение и воспроизводство природной среды. Более того, ради этого природа подвергалась непрерывному преобразованию, замещалась искусственной, техногенной средой. Никто не догадывался, что тем самым систематически подрывалась экологическая основа бытия.

В принципе общество способно заниматься корректированием своего исторического генотипа (чего не может делать биологическая система), и в ходе эволюции не однажды пользовалось этой своей способностью – меняло тип своего устройства. Но происходило это опять-таки под давлением экономических и политических интересов, а не под влиянием экологического фактора. Роль экологического фактора, как правило, недооценивалась общественным сознанием. Лишь в XVIII – XIX вв. в работах Ш. Монтескье, Г.Т. Бокля и их последователей, образовавших известную школу географического детерминизма в социологии, была предпринята массивная попытка привлечь внимание исследователей к анализу природных условий общественного бытия. Взгляды представителей этой школы подвергались решительной критике со всех сторон, в том числе со стороны марксизма. Лишь сегодня мы стали понемногу понимать, что, создав общество определенного типа, мы можем заложить основы для будущих экологических потрясений.

Если формирование общественных укладов происходит стихийно под влиянием каких-то иных факторов, не связанных с экологией, то возникновение экологических противоречий становится практически неизбежным, причем они возникают тем скорее, чем выше техническая оснащенность общества.

2.2. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ВОСПИТАНИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ КУЛЬТУРА

Экологическое воспитание есть составная часть общей системы воспитания, но как педагогический процесс должен опираться не только на экологические знания человека, но и осуществляться через его чувства – эмоциональную сферу, его душевную подготовку к восприятию экологических ценностей. Основные направления в области экологического воспитания могут быть выявлены только на основе учета современности в целом, выявлении основных целей, сущности и противоречий в нем.

Самая трудная проблема экологического воспитания и образования сегодняшнего дня – образование взрослого населения. В специальных статьях на тему экологического образования населения очень часто прибегают к шаблонным, возможно и формально правильным утверждениям типа: «...*Экологическое образование основывается на общих принципах свободного развития личности в демократическом ответственном государстве, признающем приоритет гуманистических ценностей, свое единство с мировым сообществом, ответственность перед другими государствами и всем человечеством за сохранение природных богатств, устойчивости биосферы и здоровья людей...*

Необходимые условия развития экологической культуры населения включают: 1) сознательную консолидацию с прогрессивными международными решениями и планами действий в области решения проблем природопользования и предотвра-

щения экологического кризиса; 2) опору на социальные институты, отражающие долгосрочные интересы общества: государственные стратегические программы, науку, образование, религию, искусство и пр.; 3) государственную ответственность за полномасштабную реализацию, организационную и материальную государственной программы экологического образования и просвещения населения; ...». «Существует некий образ мышления и поведения личности, называемый “экологической культурой”. Если все граждане станут “экологически культурными”, большая часть экологических проблем постепенно будет снята. Следовательно, развитие этой культуры должно стать главной задачей экологического образования» [2], и т.п.

К сожалению, практика показывает, что даже общественный контроль за принятыми решениями в виде круглых столов, специальных слушаний, массовых акций по контролю за качеством окружающей среды, организуемый непрофессионалами, в большинстве случаев не только не приводит к правильным результатам, но уводит массы населения далеко от истинного пути решения той или иной проблемы.

Развитие экологической культуры сейчас провозглашается главной задачей экологического образования во многих серьезных документах. Если народ – экологически культурный, там и мусора на улицах меньше, и ручки чище, и бизнес ответственнее, вот как в Голландии (Финляндии, Англии, и пр.). Да и рядовой американец скорее выкинет окурок ... себе в карман, чем на тротуар. Но удивительно другое: именно на эти страны приходится львиная доля выброса парниковых газов, именно туда экспортируется большая часть вырубаемых в мире лесов! Чего же мы все-таки хотим – *более чистых улиц, или устойчивой биосферы?*

Экологически культурный человек может оказывать на биосферу не меньшую нагрузку, чем любой другой человек. Также, к примеру, как хорошо образованный человек не обязательно оказывается порядочным.

Абсолютная вера в слова присуща только малышам. По мере взросления, дети учатся осознанно и неосознанно сопоставлять наши слова с делами и делать выводы о том, что на самом деле важно, а что нет. Когда на уроках экологии дети посвятят 90 % времени изучению закономерностей динамики популяций, сукцессии экосистем, пищевых взаимосвязей, они сделают вывод: *«Природа живет по своим законам, а мы – по своим»*. И будут продолжать жить по этим самым «своим» законам. Возможно, потом самые послушные из них не выбросят фантик во время прогулки в лесу, но и не подвергнут осмыслению свой (и не только) образ жизни в городе, который влияет на природу значительно больше.

Проблема заключается не в том, чтобы создать модели биосферного равновесия и понять на их основе экологические законы, управляющие биосферными процессами. Вся сложность в том, чтобы научить человечество жить в соответствии с такими. Как выработать «экологический императив»? Человечеству давно известны заповеди – *«не убий», «не укради»*..., но оно не живет по ним. Как и в случае морального императива Канта, экологический императив – это, прежде всего, проблема психологии (на уровне индивида) и метафизики (на уровне общества).

Поэтому следует рассеять миф о том, что *главным фактором, определяющим поведение человека по отношению к окружающей среде, являются знания, и чем глубже эти знания, тем выше вероятность, что человек будет действовать ответственно.*

Важность экологических знаний является рефреном многих обсуждений экологического образования. Но насколько знания влияют на поведение человека? Почему, в конце концов, подростки, которые в деталях знают о вреде курения, курить все-таки не бросают? Можно возразить: «Ну, здесь ведь еще есть аспект зависимости от табака и социального окружения, это сравнивать нельзя!». Однако для изменения своего стиля жизни так, чтобы он лишь минимально воздействовал на окружающую среду, людям придется преодолеть еще более сильный социальный прессинг. Есть в этом и физиологические аспекты.

Экологические знания, скорее всего, будут накапливаться в отдельном уголке сознания, и проявляться скорее в эрудиции, чем в поведении. Это подтверждается и многочисленными зарубежными исследованиями и некоторыми российскими.

Таким образом, существует несколько проблемных вопросов-задач. Прежде всего, на каком этапе «образовательный процесс» может дать наиболее хорошие результаты? Каким должен быть при этом образовательный фон, и сумеем ли мы его обеспечить? Ну и конечно, можно ли сформировать экологическую ответственность к окружающей среде без наличия некоего «карающего» механизма, который одинаково хорошо работал бы и для рядовых граждан, и для «правлящего сословия» общества?

2.3. Возможно ли формирование мировоззрения на подсознательном уровне?

Мир являет собой совокупность наших ощущений, восприятий, воспоминаний. Существование мира удобно считать объективно независимым. Но само его существование определенно не делает мир очевидным. Мир становится очевидным благодаря весьма специфическим действиям, происходящим в весьма специфических местах этого самого мира, а именно, *определенным событиям, происходящим в мозге*. Это чрезмерно своеобразный намек, влекущий за собой вопрос: какие именно свойства отличают мозговые процессы – свойства, позволяющие последним «проявлять» мир? Можем ли мы сказать, какие материальные процессы обладают этой способностью, а какие – нет? Или проще: какие материальные процессы напрямую связаны с сознанием?



Рис.2. С. Дали «Геополитическое дитя, наблюдающее рождение Нового Человека».

Название картины сформировалось как пародия на существовавшие в годы Второй мировой войны оптимистические предсказания геополитиков о «новом мире», который возникнет после поражения фашизма. Подобно цыпленку, «Человек Новой формации» вылупливается из земного шара, который похож скорее на мягкую оболочку, а не скорлупу.

В классификации и терминологии *Ричарда Семона*² онтогенез не только мозга, но и индивидуальной сомы в целом есть «хорошо запомненное» повторение цепочки событий, которая повторилась похожим образом множество раз. Его *первые стадии*, как нам известно из нашего собственного опыта, *бессознательны* – все начинается с размещения в матке матери, но даже последующие недели и месяцы жизни большей частью проходят во сне. В течение этого времени младенец развивается в мало изменяющихся условиях. Последующее органическое развитие начинает сопровождаться сознанием лишь постольку, поскольку имеются органы, которые постепенно начинают взаимодействовать с окружающей средой, адаптируют свои функции к изменениям ситуации, подвергаются влиянию, проходят практику, модифицируются особым образом окружающей средой. У нас, высших позвоночных, такой орган находится обычно в нервной системе. Поэтому сознание связано с теми ее функциями, которые самонастраиваются посредством того, что мы называем опытом нахождения в изменяющейся среде. Нервная система – это то место, где наш вид до сих пор подвержен филогенетическим преобразованиям. Таким образом, сознание связано с *обучением* живой субстанции – *её ноу-хау бессознательно*.

Уже в 2000-х годах в лаборатории нейропсихологии НИИ Мозга им. В.М. Бехтерева проводились опыты с записью у человека биотоков мозга (электроэнцефалограмма – ЭЭГ, рис. 3). Оказалось, что ЭЭГ меняется у людей с возрастом. С изменением ритмов мозга меняется и поведение человека. У младенца *наиболее интенсивная частота колебаний* биотоков мозга – 2-3 в секунду, он еще не имеет развитой коры больших полушарий, не знает языка, но уже реагирует на обращение матери, уже имеет свой особый чувственный уровень сознания. Это уровень *первичного сознания*. Первичное сознание – это наша интуиция, наша подсознательная оценка людей и ситуации, это мысль без слов, *то, что*

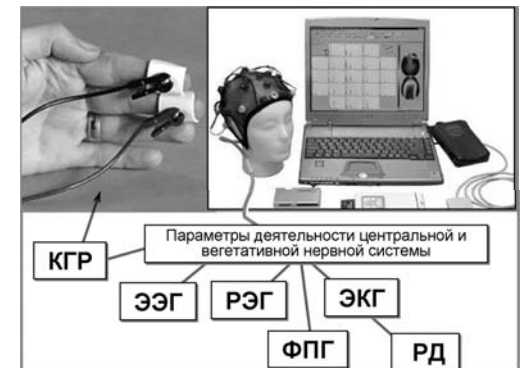


Рис. 3. Вариант снятия информации с головного мозга для определения типа реакции организма на внешнее воздействие: ЭЭГ – электроэнцефалограмма; РЭГ – реоэнцефалография; ЭКГ – электрокардиография; КГР – кожно-гальваническая реакция; ФПГ – фотоплетизмограмма; РД – сигнала рекурсии дыхания.

² *Ричард Вольфганг Семон* (1859-1918) – немецкий зоолог и биолог-эволюционист, который верили в наследование приобретенных признаков, и применил это к социальной эволюции. В этой сфере знаний он намного опередил время. Считал, что каждое психологическое состояние соответствует изменениям в нервах. Покончил с собой, завернувшись в немецкий флаг, якобы потому, что был подавлен поражением Германии в Первой мировой войне.

фактически заложено вместе с генами. У ребенка 3-5 лет частота биоритмов увеличивается до 7 колебаний в секунду. В это время он живет в семье под опекой взрослых людей, сам не ориентируется за пределами места обитания, его «водят за руку», он полноценно общается с окружающими его близкими людьми. Это, так называемый *семейный уровень сознания.* Постепенно частота наиболее интенсивных колебаний биотоков мозга увеличивается и достигает своего максимального значения (до 12 и выше) во взрослом возрасте, когда человек перестает нуждаться в опеке со стороны. Это *социальный уровень сознания.*

Гипотеза о трех уровнях сознания в последнее время обрела статус теории, т.к. удалось экспериментально установить факт сохранности у взрослого человека всех трех уровней сознания: первичного, семейного и социального с периодическим доминированием одного из них в зависимости от ситуации, в которой оказывается человек.

Чтобы испытывать полноценные положительные эмоции, надо иметь полноценную структуру сознания. У младенца она формируется при счастливой матери, у ребенка – при полной семье, а у взрослого – при социальном благополучии, позволяющем создать счастливую семью и самосовершенствоваться. Ущербность же структуры сознания приводит к потере правильных социальных ориентиров, основанных на биологическом законе сохранения вида. Человек с ущербной структурой сознания как будто бы движется к цели всю жизнь, но так и не достигает ее, например, не заводит семьи, но собирает материальные блага, которые могли бы облегчить ее существование. Возможно, именно это и приводит к вымиранию «сытых и цивилизованных» народов Европы и замене их социально более полноценными, хотя и менее «цивилизованными» нациями.

Когда-то миллионы европейцев захватывали и осваивали колонии на других материках. Процент европейского населения рос практически во всех неевропейских странах. Так, незначительная по территории Англия завоевала почти треть земного шара. Даже после того, как Америка получила независимость от английской короны, Британская империя включала в себя четверть всей территории Земли. Практически всю остальную часть планеты, за исключением территории Российской империи, поделили между собой Франция, Испания, Португалия, Голландия. Однако в настоящее время европейское население практически исчезло в Азии и Африке, а в самой Европе с каждым годом растет процент афро-азиатского населения. Более того, мусульмане – выходцы из Азии – начали создавать на территории Англии поселения, куда вход самим англичанам запрещен. И все это происходит тогда, когда уровень жизни, промышленное и военное могущество европейцев достигли небывалых высот. Сейчас мы можем говорить не только о вымирании европейского населения, но и о его деградации: растет число психических заболеваний, венерических болезней, распавшихся семей. Один из шведских психофизиологов, как-то сказал, что по его данным среди шведских детей чрезвычайно высок процент невротиков (до 50 %), между тем как среди полугодовалых детей Судана их практически нет. Из этого он сделал вывод, что для психического здоровья бытовое благополучие не является самым главным, а скорее, наоборот.

Отсюда вытекает, что настоящее серьезное воспитание возможно лишь начиная с детского возраста, причем, с учетом накопленного нейрофизиологами опыта. Как это ни банально звучит, но *«наше будущее – это наши дети».* И самое главное при воспитании подрастающего поколения следует учитывать возрастные особен-

ности восприятия тех или иных социальных ценностей. На каждом шаге, каждый день нашей жизни определенные части той формы, которой мы обладали до этого, должны изменяться, должны удаляться и заменяться чем-то новым.

Более того, *сознательными становятся лишь те модификации, которые находятся в процессе обучения*, пока (гораздо позже) они не станут наследственно зафиксированной, натренированной и бессознательной собственностью вида.

Современные биологи могут назвать такой процесс *микроэволюцией*, хотя, возможно, применительно к формированию сознания это не совсем точный термин.

Термин *микроэволюция* был впервые предложен выпускником Гарварда, ботаником Р.Г. Ливиттом в 1909 г. Так он обозначил загадку того, как отсутствие формы дает начало форме. В настоящее время считается, что *микроэволюция* – это распространение в популяции малых изменений в частотах аллелей на протяжении нескольких поколений; эволюционные изменения на внутривидовом уровне. Такие изменения происходят из-за следующих процессов: мутации, естественный отбор, искусственный отбор, перенос генов и дрейф генов. Эти изменения приводят к дивергенции популяций внутри вида, и, в конечном итоге, к видообразованию.

Термин микроэволюция стал популярен в недавнее время среди движения против эволюции, в частности среди креационистов, придерживающихся теории Ранней Земли. Предположение, что микроэволюция количественно отличается от макроэволюции, вводит в заблуждение. Так, креационисты утверждают, что главное отличие между этими процессами состоит в том, что микроэволюция происходит на уровне нескольких поколений, в то время как макроэволюция – в течение тысяч лет. На самом деле микро- и макроэволюция описывают один и тот же процесс. Многие ведущие мировые научные организации, в том числе и AAAS³, считают попытки найти отличие между макро- и микроэволюцией не имеющими научной основы. Однако нельзя считать этот вопрос окончательно решённым. Так, в авторитетной среди биологов монографии «Эволюционный процесс» В. Гранта⁴ говорится следующее: «Огромное различие в масштабах времени между микро- и макроэволюцией в их крайних формах заставляет остерегаться сверхупрощенных экстраполяций от одного уровня к другому. Многие микроэволюционные изменения повторимы и предсказуемы. В отличие от этого макроэволюция – процесс исторический».

Вместе с тем, отсутствие в палеоистории каких-либо находок промежуточных эволюционных форм существования видов на протяжении фактически всего исследованного исторического периода, заставляет ряд эволюционистов утверждать, что микроэволюция в том смысле, что она «...приводят к дивергенции популяций внутри вида, и, в конечном итоге, к видообразованию», вообще не может существовать с позиций современной генетики.

Тем не менее, это вовсе не означает отрицание факта того, что человек в процессе «общения» с окружающим миром после своего рождения приобретает новое

³ AAAS – Американская ассоциация содействия развитию науки – международная некоммерческая организация, издатель известного научного журнала *Science*.

⁴ *Верн Грант* – известный американский ученый в области эволюционной ботаники.

состояние своего сознания, не записанное ранее в генах, и не переданное по наследству. Именно это открывает возможности формирования сознания «нового типа» в процессе обучения человека.

Однако никто пока не умеет изменять структуру восприятия окружающего мира, хотя определенные успехи уже есть. Так, нейрофизиологи из США и Японии сделали первый шаг на пути реализации фантастического метода записи новых знаний в мозг человека: воздействуя на зрительную кору головного мозга добровольцев, они улучшили их способность выполнять то или иное задание.

Специалисты Бостонского университета и лаборатории вычислительной неврологии института передовых телекоммуникационных исследований пошли дальше и решили проверить, можно ли внедрить в мозг человека чужую «картинку» и будет ли принята другим мозгом, к примеру, запись тренировки какого-нибудь выдающегося атлета. Пресс-релиз Национального научного фонда США поясняет, как производилась «запись» новых знаний. Сначала специалисты собрали образцы активности мозга человека, который выполнял то или иное простое визуальное задание. Затем при помощи магниторезонансного томографа учёные заставили первичную зрительную кору добровольцев работать по записанному ранее образцу. Как будто человек в томографе выполнял обучение сам. В конце эксперимента проверялось, смогли ли добровольцы улучшить свои показатели в выполнении тех или иных заданий. В статье, вышедшей в журнале «*Science*», пишут, что стимулирование коры привело к тому, что добровольцы стали лучше выполнять данные им визуальные задания.

Впрочем, применение таких способов может быть и более приземленным. Многие солдаты и жертвы несчастных случаев страдают от так называемого посттравматического стрессового расстройства. Заполучив новую технологию, медики уже сейчас научились частично снимать стрессы, удалив, например, какие-то неприятные воспоминания и восстановив ему «начальные настройки». В нашей стране это направление реализовано в рамках психофизиологических подходов и получило название БОС-технологий [3,4].

Но даже при реализации таких «фантастических» программ обучения, все равно, человечество вынуждено будет сначала определить, какие цели стоят перед ним, какие задачи необходимо решить, какими должны быть результаты его усилий.

В соответствии с определенными целями, задачами и ожидаемыми, запланированными результатами человечество вырабатывает средства их достижения. С учетом комплексности проблем окружающей среды эти средства имеют специфику в технической, экономической, образовательной, правовой и иных сферах.

3. Современные пути преодоления глобального экологического кризиса

3.1. «Устойчивость» развития и выживание человечества

Технологическая культура закономерно ведет к такому положению, которое можно именовать не иначе как современный глобальный кризис. На ранних стадиях развития цивилизации вмешательство в природу носило локальный характер, было обратимым. Современные технологии разительно изменили характер и масштабы взаимодействия человека со средой обитания. Антропогенные воздействия приняли глобальный характер. Под вопросом и существование природного равновесия и человека вообще.

Одна из причин этого – чрезмерное потребление, не согласующееся с законами Природы и правилами трофических цепей, в частности. Технологическая культура негуманна. Рост духовности не совпадает с ростом материального благосостояния. Экологический кризис – это напряженное состояние взаимоотношения человечества с природой, характеризуемое несоответствием между развитием производительных сил в обществе и ресурсно-экологическими возможностями природы. Поэтому в последнее время и экологи, и политики все чаще возвращаются к проблеме «устойчивого» развития. Проблематика устойчивого развития активно обсуждается в научной прессе, в публицистических изданиях, на всевозможных национальных и международных конференциях. Устойчивому развитию был посвящен крупнейший форум начала века – Всемирный саммит в Йоханнесбурге (август 2002 г.). Однако общепринятое определение понятия «устойчивое развитие» до сих пор отсутствует. Отчасти по этой причине диспуты по устойчивому развитию напоминают иногда диалог глухих.

Часто дискуссии об устойчивом развитии вырождаются в споры о словах. Критикуют, например, русский перевод английского *sustainable development*. Но дело не в переводе, а в том, как мы договоримся понимать термин. Критики утверждают, что слова *устойчивое* и *развитие* противоречат одно другому, что развитие, в принципе, не может быть устойчивым. Однако даже в математике, самой логичной из наук, эти слова могут сосуществовать вместе. В математике *развитие* обычно отождествляется с изменением (эволюцией), а *устойчивость* – с инвариантностью, т.е. сохранением какого-либо свойства, отношения.⁵

Договоримся, что развитие (цивилизации, страны, региона, социальной группы, экономической системы и т.д.) в сколько-нибудь обозримый период времени является устойчивым, если оно *сохраняет* некий *инвариант*, т.е. не меняет, не подвергает угрозе какое-либо свойство, объект, отношение, ограничение. Важнейшая проблема состоит именно в выявлении *главного* для данной системы, того, что при любых изменениях ситуации должно быть сохранено.

Даже если сказать, что главное – выживание системы, то не всегда просто понять, что это такое. Для нашей цивилизации в целом, устойчивость – почти синоним выживания человечества. Глобальная неустойчивость цивилизации обусловлена действиями ее *подсистем* (т.е. внутренних элементов), игнорирующих необходимость выполнения условий выживания (устойчивости) целого (законов *надсистем*).

При таком подходе *устойчивым следует признать такое развитие, которое обеспечивает выживание будущих поколений, т.е. рода человеческого*. Исходя из этого, В.И. Данилов-Данильян предложил конкретизировать определение *устойчивого развития* следующим образом: «*устойчивое развитие* – такое общественное развитие, при котором не разрушается его природная основа, создаваемые условия жизни не влекут деградации человека и социально-деструктивные процессы не развиваются до масштабов, угрожающих безопасности общества».

Приведенное определение построено на отрицаниях. Это не удивительно, поскольку дело касается защиты от угроз. Такие угрозы обычно классифицируются в

⁵ Более строго: устойчивость означает, что некоторые высказывания о системе остаются истинными при всех ее изменениях, принадлежащих заданному множеству

три группы: *экологические* (1), *медико-социальные* (2) и *социально-политические* (3). Среди них выделяют:

1. **Разрушение среды обитания.** Генетически человек как биологический вид приспособлен к жизни во вполне определенном коридоре изменений внешних условий. Наделенный разумом человек постепенно научился жить в среде, характеризующейся более широким разбросом характеристик, чем его зона оптимума. Но, *во-первых*, этот процесс расширения все равно имеет свои границы. *Во-вторых*, неудобная для жизни людей периферия освоенного ими «пространства» (имеются в виду, конечно, не географические, а системные границы) в соответствии с законом Ле Шателье–Брауна (противодействие действиям человека) жестоко мстит за свое освоение тем, кто в ней пытается постоянно обитать – стрессами, физиологическими расстройствами, ослаблением иммунитета и т.д.

2. **Ослабление популяционного здоровья, в частности нарушения генома человека.** Здоровье страдает не только у обитателей периферии освоенного пространства, но и его «центральных областей», не только в бедных странах, но и в богатых. Заболеваемость многими болезнями растет не только там, где нищее, не обеспеченное медицинской техникой и квалифицированными врачами здравоохранение, но и там, где есть все – деньги, самое совершенное медицинское оборудование, лучшая фармакопея и лучшие кадры, собранные со всего мира. Самое характерное – доля новорожденных с генетическими отклонениями: этот показатель растет везде. Непрерывно растет число стрессирующих факторов. Успехи в борьбе с каким-либо одним из них обязательно сопровождаются появлением двух-трех новых.

3. **Разрушение отлаженных в течение тысячелетий механизмов социальной стабилизации.** Упомянутые социальные недуги, крайне негативно сказывающиеся на популяционном здоровье, распространяются ускоренными темпами именно из-за ослабления механизмов социального контроля. Материальные условия жизни меняются быстрее, чем общество успевает соответствующим образом модифицировать стабилизационные механизмы. В свое время демографический взрыв в третьем мире возник потому, что был разрушен традиционный тип воспроизводства населения, а для замещающего его нового типа воспроизводства не было сформировано надлежащих условий. Аналогичная ситуация складывается и сейчас по целому ряду аспектов. В частности, терроризм возникает в социуме, где разрушаются традиционные механизмы стабилизации и при этом не возникают, запаздывают или терпят фиаско новые, нагнетается социальное напряжение, прежде всего из-за роста дифференциации населения по уровню благосостояния, а общественные силы не находят легитимного выхода, жизненные ценности утрачиваются – и для формирования террористических организаций все условия налицо. Бюрократизация управления, судебной системы, расцвет коррупции и т.п. – однозначные свидетельства именно разрушения стабилизирующих социальных структур, независимо от того, умеем мы их описать или хотя бы назвать или нет.

При таком взгляде на современную цивилизацию неизбежно возникает вопрос: можно ли указать некие пределы, дальше которых ни в коем случае не должны заходить процессы разрушения окружающей среды, популяционного здоровья и стабилизирующих социальных структур. Д. и Д. Медоузы [5] с сотрудниками в своем знаменитом докладе Римскому клубу рассматривали существование *пределов роста* – населения и экономики. Однако понятно, что можно разрушить все,

что угодно, и без всякого роста. Поэтому важно знать *пределы разрушения*. Критически важно не допустить перехода именно за эти пределы, т.к. такой переход означает старт необратимых процессов. Само существование пределов разрушения тривиально следует из теории регулирования: всякая регулятивная система допускает лишь ограниченные внешние воздействия, выход за такие ограничения делает регулирование невозможным.

Подобную задачу пытались решать экологи, введя понятие *несущей емкости биосферы*, т.е. пределов антропогенного воздействия, за которым (если превышающие воздействия приобретают постоянный характер) в биосфере начинаются необратимые деградационные изменения, утрачивается способность так воспроизводить окружающую среду, чтобы ее характеристики оставались в приемлемых для биоты границах.

Конечно, понятие несущей емкости не может служить образцом научной строгости, и не одно поколение экологов будет уточнять его, причем в различных аспектах. Здесь важным аспектом является то, что наши знания о человеческом обществе крайне недостаточны.

Поэтому можно рассчитывать только на одну сторону этой проблемы.

В центре внимания должны быть, не экономические, военные и прочие возможные «отраслевые» оценки, а всесторонний анализ последствий осуществления тех или иных действий.

Прообразом этого анализа служит *экологическая экспертиза*, но она привлекает во внимание лишь один из необходимых аспектов, да и то далеко не полно, не совершенно, ориентируясь, как правило, на слишком близкий временной горизонт. По своей сути такая работа – *прогностическая*, вести ее должны научные работники, ибо ни при каких обстоятельствах она не превратится в рутинную, формализуемую. Именно научному прогнозу последствий осуществления инновации должно принадлежать решающее слово, и *не изобретатель, а прогност* должен быть центральной фигурой в техническом развитии устойчивого глобального социума. Вместе с тем, очевидно, что возможности современной науки для реализации подобного прогностического анализа совершенно недостаточны. Более того, они никогда не станут достаточными. Поэтому главенствующим в принятии решений относительно инноваций должна быть презумпция опасности – в экологическом, медико-социальном и социально-политическом аспектах.

Второй момент состоит в утверждении необходимости радикального *изменения отношения к инновациям*, в сторону безусловного приоритета научного прогноза последствий осуществления инновации над всеми действительными и мнимыми преимуществами, которые следуют из частных показателей ее результативности.

На существующем этапе научно-технического развития общества пристальное внимание должно быть уделено следующим основным направлениям:

- нормирование загрязнений;
- экологический (включая физико-химический) мониторинг, в том числе, глобальный мониторинг биосферы;
- экологическая экспертиза;
- разработка технологий, по-возможности, минимизирующих нагрузку на окружающую среду;

- создание систем предупреждения/оповещения стихийных бедствий. Примером специализированной глобальной системы мониторинга может служить *Глобальная наблюдательная сеть сейсмомониторинга Земли*, действующая в рамках Международной программы контроля очагов землетрясений. Разновидностью другой специализированной системы мониторинга могут служить национальные и международные *службы предупреждения цунами*.
- профилактически-воспитательная работа по формированию нового типа мировоззрения.

Охрана природы в современном понимании включает в себя комплекс мероприятий, связанных с собственно охраной природы, и разработкой и внедрением концепции национальных парков и заповедников. Речь обычно идет о практических мерах по предотвращению загрязнения почвы, воды и атмосферы промышленными и бытовыми отходами.

Обычно считается, что стратегическое соотношение территорий, благоприятное для существования человека, на глобальном, региональном и локальном уровнях должно быть следующим: треть – заповедной дикой природы (ЗТ); треть – ограниченной хозяйственной деятельности (ОТ) с сохранением естественного ландшафта; треть – полностью «окультуренной» (агрэкосистемы, дороги, города, карьеры и пр. – РТ), т.е. ЗТ:ОТ:РТ = 1:1:1. А.Д.Сахаров считал оптимальным для равновесного состояния Земли соотношение ЗТ:РТ=8:3; Д.Л. Арманд предлагал противоположный вариант – ЗТ:ОТ:РТ = 1: 9:9.

Вместе с тем, следует отметить, что даже для известных типов загрязнения в ряде случаев возникают проблемы однозначной трактовки уровней ПДК и ПДУ. Например, при радиоактивном облучении возможно проявление характерных признаков электромагнитного воздействия («мягкое» облучение γ -квантами или рентгеновскими лучами). В свою очередь, ионизирующим может быть не только излучение, связанное с радиоактивностью.

Кроме того, являясь частью Вселенной, биообъекты сосуществуют с окружающими физическими полями химическими элементами. Поэтому при рассмотрении воздействия «загрязнителей» на биообъекты, следует иметь в виду, что в большинстве практических случаев имеет место, скорее комплексное взаимодействие биообъектов и окружающей среды, чем просто воздействие загрязнителей на биообъекты. Эта ситуация существенно затрудняет трактовку *последствий воздействия окружающей среды, особенно физических полей*, на биообъекты.

Проблема установления норм ПДУ и ПДК, связана именно с такой особенностью «сосуществования» объектов Природы. Обычно исходят из принципа, что любое воздействие, в конечном итоге, негативно. Важно установить предел такого воздействия, при котором организм еще достаточно эффективно сопротивляется, а в ряде случаев даже приобретает дополнительный иммунитет, как это, например, происходит при прививках. Поэтому говорят о верхней границе уровней и концентраций, а нормы устанавливаются, исходя из очевидных *макропроявлений результатов воздействия*, когда существование прямой корреляции между типом и результатом воздействия достаточно очевидно.

Например, касание человеком высоковольтных (тысячи вольт) проводов приводит к обугливанию тканей и, как правило, к смертельному исходу. Более низкие напряжения (сотни вольт) также считаются смертельно опасными из-за возможных

местных ожогов, фибрилляции сердца и пр. Внешние проявления воздействия, как правило, не наблюдаются лишь при напряжении ниже 12 В. Этот пороговый уровень и включен в качестве одной из норм ПДУ при работе с электрическим напряжением.

Приведем еще один пример – обычной питьевой воды. Перед употреблением, как известно, вода должна пройти специальную очистку. Существуют специальные нормы на допустимые концентрации (ПДК) веществ в воде, при превышении которых она переходит в категорию негодной для пищевых нужд. *Но почему же в таком случае мы не употребляем в пищу дистиллированную воду, содержание примесей в которой сведено к минимуму?* Оказывается, человек должен получать с водой достаточное количество микроорганизмов. Их отсутствие в воде не менее вредно для организма, чем превышение норм ПДК. Однако в последнем случае реакция проявляется достаточно быстро, а в первом – организм будет выходить на режим ненормального функционирования (нарушения ионного обмена, в частности) достаточно медленно.

Нормально функционирующему организму одинаково вредно как превышение уровней полей или концентраций веществ, так и их недостаток. Существует коридор уровней и концентраций, внутри которого организм ощущает себя комфортно. Любой выход за пределы коридора, как в меньшую, так и в большую сторону, может привести к необратимым последствиям.

Нормы ПДУ и ПДК определяют только одну границу этого коридора (рис.4). Вторая граница, к сожалению, изучена крайне слабо.

Одним из путей преодоления экологических катастроф может быть развитие **промышленной экологии** как раздела экологии призванного рассматривать на базе основных понятий экологической безопасности, стандартизации и права вопросы экологической безопасности функционирования различных отраслей промышленности, используя приоритетные принципы формирования и синтеза экологически безопасных и энергосберегающих технологий, обезвреживания отходов (газообразных, жидких и твердых).

3.2. О безотходных и экологически чистых технологиях

В последнее время часто при обсуждении экологических проблем стал использоваться термин «безотходные», или «экологически чистые» технологии которые считаются одной из самых радикальных мер защиты окружающей среды от загрязнений. Однако эти термины нуждаются в более четком определении. Дело в том, что согласно законам физики (второму началу термодинамики, в частности), полностью безотходную технологию нельзя создать ни практически, ни даже теоретически. Прежде всего, не существует устройств и механизмов, имеющих КПД = 1. Это означает, что какая-то часть затраченной энергии обязательно должна быть отдана окружающей среде, как минимум, в виде тепла. Но, как правило, к этому добав-



Рис. 4. К вопросу о методике определения ПДУ.

ляются и всевозможные выбросы химических веществ.

Более правильно говорить о «химически» или «биологически безотходных» технологиях, когда вследствие использования замкнутых циклов, в принципе, появляется некоторая возможность избежать выбросов остатков сырья в окружающую среду. Однако в любом случае в окружающую среду будет излучаться, в соответствии с первым началом термодинамики тепловая энергия. Тем не менее, даже в случае «идеального» замкнутого цикла производства, внутри устройств и механизмов, обеспечивающих такой замкнутый цикл, будут накапливаться вещества, которые не могут быть полностью израсходованы. Как энергию нельзя полностью перевести в полезную работу, так и сырье невозможно полностью перевести в полезный экологически безопасный продукт. Так при, казалось бы, полностью замкнутом цикле получения электроэнергии на АЭС, со временем встает вопрос избавления от радиоактивных отходов (РАО).

По официально признанному на сегодня определению, *безотходная технология* – это такой способ производства продукции, при котором наиболее рационально и комплексно сырье и энергия используются в цикле «сырьевые ресурсы – производство – потребление – вторичные сырьевые ресурсы» таким образом, что любые воздействия на окружающую среду не нарушают ее нормального функционирования. Однако нетрудно сообразить, что увеличение мощности такого производства, в силу указанных выше причин, рано или поздно, все равно вступит в конфликт с окружающей средой.

4. Заключение

*Когда срывают травинку, вздрагивает вся Вселенная ...
Из древних Упанишад⁶*

Обсуждая основные принципы и законы взаимодействий в треугольнике **Человек–Природа–Общество**, мы должны исходить из важного утверждения, что экология – более чем научная дисциплина: она представляет собой проблемно ориентированную систему знаний, опирающихся на широкий круг проблем и вопросов, изучаемых совокупностью, как многих естественных наук, так и гуманитарных. Вопросы решения проблем, именуемых экологическими, на самом деле выходят далеко за рамки экологии в ее традиционной формулировке. Их решение требует дополнительных новых знаний, нового образа мышления [1, 6].

Опираясь на полученные знания, мы должны усвоить достаточно простую истину. *Даже знание основных законов, установленных современной наукой может не позволить нам в полном объеме предсказать наше будущее. Поэтому и пути решения многих проблем, именуемых экологическими, довольно часто оказываются неоднозначными, и требуют весьма детального, всестороннего и кропотливого анализа.*

Поэтому здесь существуют довольно серьезные проблемы.

Любой природный процесс, будучи сам весьма сложной системой, представляет собой лишь некоторую составляющую другой, более сложной системы. Если к

⁶ *Упанишад*ы – древнеиндийские трактаты религиозно-философского характера. Являются частью *Вед* и относятся к священным писаниям индуизма. В Упанишадах главным образом описывается безличный аспект Абсолютной Истины.

этому добавить неизбежно присутствующую стохастичность, то проблема корректного выделения интересующего нас процесса всегда представляется нетривиальной проблемой. Бывают ситуации, когда «память системы» исчезает или почти исчезает, когда система становится крайне неустойчивой. Как известно, Пуанкаре назвал подобные состояния бифуркационными, Рене Том – катастрофами. Развитие биосферы – это цепь бифуркаций (наиболее значительные из которых теперь принято называть катастрофами) с непредсказуемыми исходами. Одной из таких катастроф было уничтожение прокариотической биосферы и замена ее биосферой, в которой главенствуют эукариоты. Полная перестройка биосферы произошла и тогда, когда живое существо вышло из океана. Наконец, появление человека – это тоже катастрофа, внесшая в число механизмов биосферы разум, тоже с непредсказуемым исходом.

Таким образом, развитие биосферы в глобальном масштабе характеризуется крайней неустойчивостью. Максимум, что удавалось обеспечить существующей системе отрицательных обратных связей, это удерживать параметры биосферы в пределах, позволяющих сохраняться живому веществу. По-видимому, как всякая существенно нелинейная динамическая система, биосфера способна развиваться в целом ряде аттракторов, образом которых может служить странный аттрактор Лоренца, а не классические аттракторы. Эволюция биосферы – цепь постоянных переходов из одного аттрактора в другой.

Причины смены аттракторов могут быть самыми различными. Это могут быть внешние причины космического характера – падение астероида, например, изменение светимости Солнца, появление или ослабление озонового слоя и многое другое. Могут быть и внутренние причины, как, например, накопление кислорода, губительного для прокариотов, который создавали сами прокариоты в процессе своей жизнедеятельности, то есть реакции фотосинтеза.

Такое представление о характере развития биосферы может иметь и чисто практическое значение для выработки стратегии развития человечества.

Само начало антропогенеза – это тоже катастрофа. Похолодание климата в начале четвертичного периода, сокращение площади тропических лесов, ужесточение борьбы за ресурс и как результат – наименее приспособленные (ими оказались – австралопитеки) были изгнаны из леса более приспособленными обезьянами. Результат катастрофы был непредсказуем. Они с большой вероятностью должны были погибнуть, но, как оказалось, именно они сделали властителями мира.

Эта цепочка катастроф продолжалась. И каждый раз качественно менялся образ жизни наших предков и характер их развития. Так, однажды они не по своей воле отказались от биологического совершенствования, и дальнейшее развитие наших предков определило развитие организационных форм общества – произошла качественная смена аттрактора. И все эти катастрофы носили глобальный характер. Последним общепланетарным кризисом была *неолитическая революция*. Его причины носили внутренний характер: был исчерпан потенциал развития, связанный с совершенствованием каменного оружия и образом жизни охотника. Борьба за ресурс сократила население планеты, вероятно, во много раз. Именно в это время исчезли другие претенденты на право называться предками человека,

например создатели *мустьерской культуры*⁷. Остались только кроманьонцы. Может быть, даже не самые сильные, не самые умные, но обладавшие более совершенной нравственностью, то есть системой нравов, а значит, и более дисциплинированные, более приспособленные для создания более совершенной общественной организации.

Однако пройдя через страшный кризис, наши предки полностью перестроили свой образ жизни. Человечество создало земледелие, а позднее, через пару тысяч лет, и скотоводство. Человек начал формировать искусственные биогеохимические циклы – *начала возникать вторая Природа*. Именно неолитическая революция породила собственность и положила начало всем современным цивилизациям. Развитие человечества пошло по совершенно новому пути. Обретя невиданное могущество, оно, однако, сохранило свое представление о биосфере, которое имело в доцивилизационный период, как о неограниченном резервуаре присвоения. И все современные цивилизации мы вправе называть присваивающими. Предсказать результаты биофункций невозможно, как и понять, какие из составляющих потенциала развития окажутся наиболее важными и как люди сумеют ими воспользоваться в постбифуркационный период.

Существует множество индикаторов, показывающих, что потенциал присваивающих цивилизаций, возникших в начале голоцена, почти исчерпан. Люди не отдают себе отчета в том, что речь сегодня идет не об отдельных трудностях, а о цивилизационном кризисе, о переходе биосферы в состояние бифуркации.

Можно быть почти уверенным, что очередная бифуркация, вызванная деятельностью человека, не приведет к уничтожению биоты. Механизмы биотической регуляции, как показывает история биосферы, справлялись и с большими трудностями. Но ее эволюция перейдет в новый аттрактор. А будет ли в нем место для человека, сможет ли он обеспечить развитие цивилизации в новом состоянии биосферы – на этот вопрос ответа нет и быть не может, ибо постбифуркационное состояние любой системы непредсказуемо.

Основная задача нашей цивилизации – не допустить перехода биосферы в состояние бифуркации. Выход из этого состояния неоднозначен. Он может дать и

⁷ *Мустьерская культура* – культурно-технологический комплекс, ассоциируемый с *поздними неандертальцами*, и соответствующая ему доисторическая эпоха. Геологически приходится на верхний плейстоцен, конец рисс-вюрмского межледникового периода и первую половину последнего (вюрмского) оледенения Европы. Впервые определена Г. Мортилье в конце 1860-х гг. и названа по пещере Ле-Мустье на юго-западе Франции. Возникновение мустьерской культуры датируется примерно как 300 тыс. лет назад, закат культуры связывают с похолоданием и исчезновением неандертальцев около 30 тыс. лет назад. Сменяется культурами позднего (верхнего) палеолита: гибридной неандертало-кроманьонской, шатльперонской и чисто кроманьонской ориньякской.

новые стимулы развития, как это случилось с *кроманьонцами*⁸ в результате неолитической катастрофы, а может привести и к полному исчезновению, как это случилось с людьми *мустьерской культуры*. Риск столь высок, что человечество допустить его не может. Отсюда и столь категоричная формулировка основной стратегической цели современной цивилизации.

Представление о развитии биосферы как о динамическом процессе приводит к представлению о неизбежной смене спокойного развития периодами катастрофических перестроек. Оно дает основание для формирования фундамента стратегии планетарного разума. Без подобных исследований все рассуждения типа *sustainable development* или попытки написать *Хартию Земли*, столь модные не только на Западе, оказываются стоящими на песке. Вопрос чересчур серьезен, чтобы относиться легкомысленно к подобным соображениям [6].

Литература

1. Гордиенко В.А., Старкова М.В. Экология – synopsis XXI века// Физические проблемы экологии (Экологическая физика)// Сб. научн. трудов/ Под ред. В.И. Трухина и К.В. Показеева.– М.: МАКС Пресс, 2008. № 15. С.125-138
2. Марфенин Н.Н. Необходимые условия развития экологической культуры населения// Тез. докл. 4-й Междун. конф. по экологическому образованию. Экологическое образование и просвещение населения. Пущино, 1998.– М.: Изд. МНЭПУ, 1998.– С. 30-32.
3. Исaiчев С.А. Использование бос-технологии в практической психологии// XX съезд Физиологического Общества имени И.П. Павлова.– Москва, 2007.
4. Черноризов А.М., Девшвили В.М., Исaiчев С.А. Методы биоуправления: теория и практика, применение в спортивной психофизиологии. МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет психологии. 2010. – 37 с.
5. Медоуз Д.Х., Медоуз Д.Л., Рандерс Й. За пределами роста. – М., Мир, 1991.
6. Н.Н. Моисеев. Современный рационализм.– М.: изд-во МГВП КОКС, 1995. – 376 с.

⁸ Кроманьонцы (фр. *Homme de Cro-Magnon* – кроманьонский человек) – считаются ранними представителями современного человека в Европе и отчасти за её пределами, жившие 40-12 тысяч лет назад. Название происходит от грота Кро-Маньон во Франции, где в 1868 году было обнаружено несколько скелетов людей вместе с орудиями позднего палеолита. Жили общинами по 15-30 человек и, по современным данным, впервые в истории создали поселения. Жилищем были пещеры, шатры из шкур, в Восточной Европе встречаются землянки. У кроманьонцев существовали погребальные обряды. В могилу клали предметы быта, еду, украшения. Мертвых посыпали кроваво-красной охрой, надевали сетку на волосы, браслеты на руки, на лицо клали плоские камни и хоронили в согнутом положении (колени касались подбородка). В Дольни-Вестонице в Моравии найдена древнейшая в мире печь для обжига керамики, которая использовалась кроманьонцем.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА
УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА И ЖИДКОГО СЛОЯ
ПРИ НАЛИЧИИ ТЕЧЕНИЯ

В.А. Гусев

Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

Изучение свойств поверхностных волн, распространяющихся вдоль границ раздела сред, в первую очередь, упругой и жидкой, важно для многих прикладных задач. Главное место среди них занимают различные геофизические задачи, связанные с исследованием сейсмических процессов, решением обратных задач восстановления структуры среды и ее параметров, создание глубинных разрезов, поиска залежей полезных ископаемых, например, нефти. Если при подобных исследованиях на суше может применяться широкий спектр методов и подходов, то возможности подводных измерений значительно ограничены. Поэтому необходимо развитие дистанционных методов исследования, среди которых применение поверхностных волн является одним из самых перспективным.

При анализе акустического поля поверхностной волны как для решения обратных задач, так и исключения мешающих факторов необходимо исследовать влияние различных неоднородностей среды. Одним из таких факторов являются течения. Известно, что течения меняют скорость акустических волн, а при наличии градиента приводят к рефракции и фокусировке волны [1].

Рассмотрим следующую задачу в двумерной постановке. Пусть вдоль границы упругое полупространство—жидкий слой распространяется гармоническая плоская волна. Плоскость (x, y) декартовых координат совпадает с границей $z=0$ твердое тело – жидкий слой. Ось z направлена вертикально вниз. Верхняя граница жидкого слоя – это плоскость $z=-h$. Акустические поля в такой системе без течений рассматривались ранее и описаны И.А.Викторовым [2], а также ряд уточнений внесен в статье [3]. Координата x направлена вдоль направления распространения волны. Пусть в жидком слое существует направленное течение \vec{U}_0 , вектор скорости которого коллинеарен оси x . Соответственно, положительное значение скорости течения означает, что волна распространяется по течению, отрицательное – против течения. Будем считать, что скорость течения не зависит от x , а зависимость скорости течения от вертикальной координаты z ограничивать пока не будем.

Для описания поля в жидком слое исходим из системы уравнений гидродинамики, записанной с учетом течения. Представляя полную скорость частиц среды в виде суммы течения и колебательной скорости $\vec{v} = U_0(z)\vec{i} + \vec{u}$, где \vec{i} – единичный вектор вдоль оси x , плотность $\rho = \rho_0 + \rho'$ и используя линеаризованное уравнение состояния $p' = \rho'c_0^2$, c_0 – скорость звука в жидком слое, после линеаризации получим следующую систему уравнений:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + U_0 \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + u_z \frac{\partial U_0}{\partial z} \bar{i} \right) = -\nabla p, \quad (1)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + c_0^2 \rho_0 \operatorname{div} \bar{u} + U_0 \frac{\partial p'}{\partial x} = 0. \quad (2)$$

Применяя к первому уравнению операцию div , а ко второму $\partial/\partial t$, получим:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + U_0 \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 p' - c_0^2 \rho_0 \frac{\partial U_0}{\partial z} \frac{\partial u_z}{\partial x} = c_0^2 \Delta p'. \quad (3)$$

Для исключения из последнего уравнения скорости используем z -компоненту уравнения (1), после чего получим:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + U_0 \frac{\partial}{\partial x} \right) \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} + U_0 \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 - c_0^2 \Delta \right] p' = -c_0^2 \frac{\partial U_0}{\partial z} \frac{\partial p'}{\partial x \partial z}. \quad (4)$$

Уравнение (4) описывает акустическое поле в среде с течением. В отсутствие течения $U_0 = 0$ уравнение (3) превращается в обычное волновое уравнение.

Рассмотрим плоскую гармоническую поверхностную волну, тогда решение уравнения (4) будем искать в виде $p' = D(z)e^{-i\omega t + ikx}$, $k = \omega/c$, где c - пока неизвестная скорость поверхностной волны. Тогда, учитывая, что $\frac{\partial}{\partial t} + U_0 \frac{\partial}{\partial x} \rightarrow -i(\omega - kU_0)$, из (4) получим

$$\frac{d^2 D}{dz^2} + \frac{k}{\omega - kU_0} \frac{dU_0}{dz} \frac{dD}{dz} + \left(\frac{(\omega - kU_0)^2}{c_0^2} - k^2 \right) D = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет исследовать поле в слое с любой пространственной зависимостью течения. Отдельно нужно исследовать резонансный случай совпадения скоростей течения и поверхностной волны. Однако для простоты расчетов ограничимся исследованием постоянного течения, для которого решение уравнения (5) представляется аналитически в простом виде. А именно, при $U_0 = \text{const}$ общее решение (5) имеет вид

$$D = D_1 e^{irz} + D_2 e^{-irz}, \quad r^2 = \frac{(\omega - kU_0)^2}{c_0^2} - k^2 = \frac{\omega^2}{c_0^2} \left[\left(1 - \frac{U_0}{c_0} \right)^2 - \frac{c_0^2}{c^2} \right], \quad (6)$$

$D_{1,2}$ - постоянные, определяемые из граничных условий.

Поле в упругом полупространстве описывается стандартным образом [2,3] двумя потенциалами – скалярным и векторным. Смещение \vec{U} элемента твердой среды выражается через скалярный Φ и векторный $\vec{\Psi}$ потенциалы. При этом для двумерной задачи (в которой смещение вдоль координаты y отсутствует, а потенциалы от y не зависят) смещения по осям x и z имеют вид:

$$\vec{U} = (U, V = 0, W) = \nabla \Phi + \operatorname{rot} \vec{\Psi}, \quad U = \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial z}, \quad W = \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \Psi}{\partial x}.$$

Потенциалы удовлетворяют волновым уравнениям, а для монохроматических волн – уравнениям Гельмгольца:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \begin{pmatrix} \Phi \\ \Psi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_l^2 \Phi \\ k_t^2 \Psi \end{pmatrix} = 0. \quad (7)$$

В уравнениях (7) введены волновые числа: $k_l = \omega/c_l$ – для продольных волн и $k_t = \omega/c_t$ – для поперечных волн. Скорости волн выражаются через параметры Ламэ λ и μ : $c_l = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$, $c_t = \sqrt{\mu/\rho}$.

Решения уравнений (7) отыскиваются в виде плоских волн, бегущих вдоль горизонтальной оси x и убывающих с координатой z :

$$\begin{pmatrix} \Phi \\ \Psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \exp(-qz) \\ B \exp(-sz) \end{pmatrix} \exp(-i\omega t + ikx). \quad (8)$$

Здесь $q = \sqrt{k^2 - k_l^2}$, $s = \sqrt{k^2 - k_t^2}$ – масштабы убывания продольной и поперечной компонент поля вглубь упругого полупространства. Согласно (8), ищется волна с частотой ω и горизонтальным волновым числом k , которое должно быть найдено из дисперсионного уравнения.

Акустические поля в жидком слое и упругом полупространстве связаны следующими граничными условиями.

1. На границе раздела $z = 0$ равны смещения по вертикали, то есть

$$\begin{aligned} W|_{z=0} &= \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right)_{z=0} = (-qA + ikB) \exp(-i\omega t + ikx) = \\ &= -\frac{u_z}{i\omega} \Big|_{z=0} = -\frac{1}{i\omega} \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{ir}{\rho_0 \omega (\omega - kU_0)} (D_1 - D_2) \exp(-i\omega t + ikx) \end{aligned}$$

Это соотношение должно быть выполнено при любых x, t . Следовательно, получаем связь между константами A, B, D_1, D_2 :

$$\frac{ir}{\rho_0 \omega (\omega - kU_0)} (D_1 - D_2) = -qA + ikB.$$

В дальнейшем экспоненциальный множитель, отмечающий распространение волны вдоль границы раздела, будем опускать.

2. На границе $z = 0$ равны нормальные напряжения: $\sigma_{zz} = -p$. Нормальное напряжение в твердом теле:

$$\sigma_{zz} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial z} \right), \quad \sigma_{zz}|_{z=0} = \lambda(-k^2 + q^2)A + 2\mu(q^2 A - iksB).$$

Давление в жидкости на границе: $p'|_{z=0} = D_1 + D_2$.

Приравнявая два последних выражения, получаем вторую связь между константами:

$$(-\lambda k^2 + \lambda q^2 + 2\mu q^2)A - 2i\mu ksB = -(D_1 + D_2).$$

3. На границе $z = 0$ касательные напряжения в твердом теле равны нулю, поскольку жидкость считается идеальной. Касательное напряжение:

$$\sigma_{xz}|_{z=0} = \mu \left(2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right)_{z=0} = -2ikqA - k^2 B - s^2 B = 0.$$

Отсюда получаем третью связь:

$$B = -2i \frac{kq}{k^2 + s^2} A.$$

4. На свободной поверхности жидкости – верхней границе жидкого слоя $z = -h$ – акустическое давление p' равно нулю:

$$p'|_{z=-h} = D_1 e^{-irh} + D_2 e^{irh} = 0.$$

Отсюда получается последняя – четвертая – связь:

$$D_2 = -D_1 \exp(-2irh).$$

Итак, есть четыре однородных уравнения для определения неизвестных амплитуд A , B , D_1 , D_2 и волнового числа k . Дисперсионное уравнение находится из условия равенства нулю детерминанта этой системы:

$$4k^2 qs - (k^2 + s^2)^2 = \frac{\rho_0}{\rho} q k_t^4 \left(1 - \frac{k}{\omega} U_0 \right) \left\{ r^{-1} \tan(rh) \right. \\ \left. r_*^{-1} \tanh(r_* h) \right\}. \quad (9)$$

Верхняя строка в правой части (9) соответствует такому решению этого уравнения, при котором относительная скорость волны в системе больше скорости звука в жидкости, но меньше скоростей продольной и поперечной волн в твердом теле: $c > c_0 + U_0$, $c < c_t < c_l$. Нижняя строка в правой части (9) соответствует относительной скорости волны, меньшей скорости звука в жидкости: $c < c_0 + U_0$. При

$$\text{этом } r = i r_*, \quad r_* = \sqrt{k^2 - (\omega - kU_0)^2 / c_0^2}.$$

Подставляя выражения $k = \omega/c$, $k_l = \omega/c_l$, $k_t = \omega/c_t$, $q = \omega \sqrt{c^{-2} - c_l^{-2}}$, $s = \omega \sqrt{c^{-2} - c_t^{-2}}$, $r = \omega \sqrt{c_0^{-2} - c^{-2}}$, запишем дисперсионное уравнение (9) в виде:

$$\sqrt{1 - \frac{c^2}{c_l^2}} \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_t^2}} - \left(1 - \frac{c^2}{2c_t^2} \right)^2 = \frac{1}{4} \frac{\rho_0}{\rho} \left(\frac{c}{c_t} \right)^4 \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_l^2}} \left(1 - \frac{U_0}{c} \right) \times \\ \times \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{c^2}{c_0^2} \left(1 - \frac{U_0}{c} \right)^2 - 1 \right)^{-1/2} \tan \left(H \frac{c_0}{c} \sqrt{\frac{c^2}{c_0^2} \left(1 - \frac{U_0}{c} \right)^2 - 1} \right), \quad c > c_0, \\ & \left(1 - \frac{c^2}{c_0^2} \left(1 - \frac{U_0}{c} \right)^2 \right)^{-1/2} \tanh \left(H \frac{c_0}{c} \sqrt{1 - \frac{c^2}{c_0^2} \left(1 - \frac{U_0}{c} \right)^2} \right), \quad c < c_0. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Здесь $H = \omega h / c_0$ – волновая толщина жидкого слоя. Поскольку переменная H содержит частоту, возникает дисперсия для этого типа волн.

Дисперсионные кривые (9)-(10) отличаются от соответствующих кривых для покоящейся жидкости множителями $(1-U_0/c)$ в правой части. При $U_0 = 0$ (9) переходит в известное дисперсионное уравнение для волн в системе жидкий слой—упругое полупространство [2].

Выражение для давления в жидкости получим, выражая $D_{1,2}$ через A :

$$p' = -A \frac{qk_t^2}{k^2 + s^2} \frac{\rho_0 \omega^2}{r \cosh rh} \left(1 - \frac{U_0}{c}\right) \sin r(z+h) e^{-i\omega t + ikx + 2irh}. \quad (11)$$

Из (1) при постоянном течении $U_0 = \text{const}$ находим смещения в жидком слое:

$$u_x = \frac{1}{i\rho_0\omega(1-U_0/c)} \frac{\partial p}{\partial x} = -A \frac{qk_t^2}{k^2 + s^2} \frac{k\omega}{r \cosh rh} \sin r(z+h) e^{-i\omega t + ikx + 2irh}, \quad (12)$$

$$u_z = \frac{1}{i\rho_0\omega(1-U_0/c)} \frac{\partial p}{\partial z} = iA \frac{qk_t^2}{k^2 + s^2} \frac{\omega}{\cosh rh} \cos r(z+h) e^{-i\omega t + ikx + 2irh}. \quad (13)$$

Перейдем к анализу полученных решений. Из дисперсионных кривых (9)-(10) видно, что при увеличении скорости попутного течения и ее приближении к скорости звука уменьшается влияние слоя на скорость поверхностной волны. В резонансном случае волна распространяется точно со скоростью рэлеевской волны. Также при увеличении скорости попутного течения уменьшается акустическое давление в жидком слое, в резонансном случае становясь равным нулю. При этом обе компоненты смещения оказываются конечными. При встречном течении, наоборот, акустическое давление возрастает. Это означает, что течение может исказить результаты измерения параметров поверхностной волны, полученные с помощью гидрофонов. В этом случае предпочтительными оказываются измерения акустических смещений или скоростей.

На рис. 1 представлены дисперсионные кривые – зависимости скорости поверхностной волны от толщины жидкого слоя в отсутствие течения (сплошные кривые) и при сонаправленном течении (штриховые кривые). По оси ординат отложено относительное изменение скорости волны по сравнению со скоростью рэлеевской волны c_R (волны на границе упругого полупространства и вакуума). При построении были заданы следующие параметры, близкие к характерным для горных пород: $c_l = 3000$ м/с, $c_t = 1800$ м/с, $\rho = 1,7$ кг/м³, и параметры воды $c_0 = 1500$ м/с, $\rho = 1$ кг/м³. При этих параметрах $c_R \approx 1645$ м/с. При малых толщинах существует только основная мода, по мере увеличения толщины появляются высшие моды. При построении задана скорость течения $U_0 = 50$ м/с. При такой скорости течения наблюдается заметный сдвиг дисперсионных кривых. В то же время необходимо отметить, что характерные скорости океанских течений на порядок меньше, поэтому в обычных условиях эффект будет не столь существен.

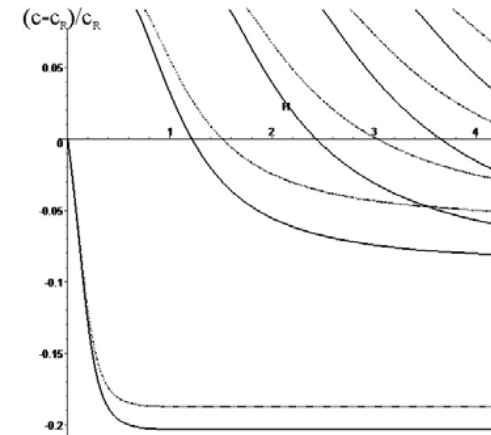


Рис.1. Дисперсионные кривые – зависимость скорости поверхностной волны от толщины жидкого слоя в отсутствие течения (сплошные кривые) и при сонаправленном течении (штриховые кривые)

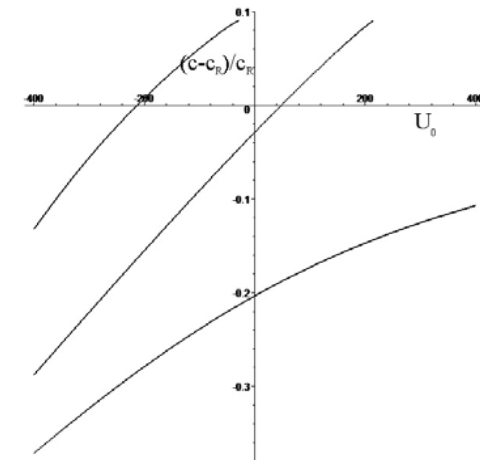


Рис.2. Зависимость скорости поверхностной волны от скорости течения на глубине $H = 0.5$

На рис. 2 представлены зависимости скорости поверхностной волны от скорости течения на глубине $H = 0.5$. Как видно, сонаправленное течение приводит к увеличению скорости волны. В отсутствие течения и при сонаправленном течении в слое существуют только две моды, при противоположно же направленном течении появляется третья мода. Таким образом, течение может изменить число существующих в слое мод и усложнить анализ экспериментальных данных.

Особый интерес представляет структура акустического поля в жидком слое. Согласно выражениям (11)-(13) зависимость поля от вертикальной компо-

ненты определяется волновым числом r . Для анализа удобно ввести нормированное волновое число $r_1 = c_0 r / \omega$, зависимость которого от скорости течения для двух толщин слоя представлена на рис.3. На рисунке представлены две моды – основная и первая. Как видно, при увеличении скорости течения число r_1 быстро убывает и при определенной скорости, существенно меньшей скорости рэлеевской волны, стремится к нулю. При противоположно направленном течении волновое число r_1 возрастает, при определенном значении скорости течения волновые числа соседних мод оказываются близкими, что при наличии значимых нелинейных эффектов и различных неоднородностей может привести к взаимодействию этих мод. При относительно малых толщинах слоя (рис.3, а) волновое число r_1 сильно возрастает, при больших толщинах оно выходит на насыщение (рис.3,б). Тем не менее, в пределе глубокого моря, когда $r \rightarrow r_* = ir$, это позволяет говорить о дополнительной локализации акустического поля в жидком слое вблизи границы. В слое конечной толщины акустическое поле в общем случае представляется в виде суммы двух бегущих волн, поэтому под локализацией можно понимать поле с монотонной зависимостью, максимальное значение которого достигается вблизи границы раздела.

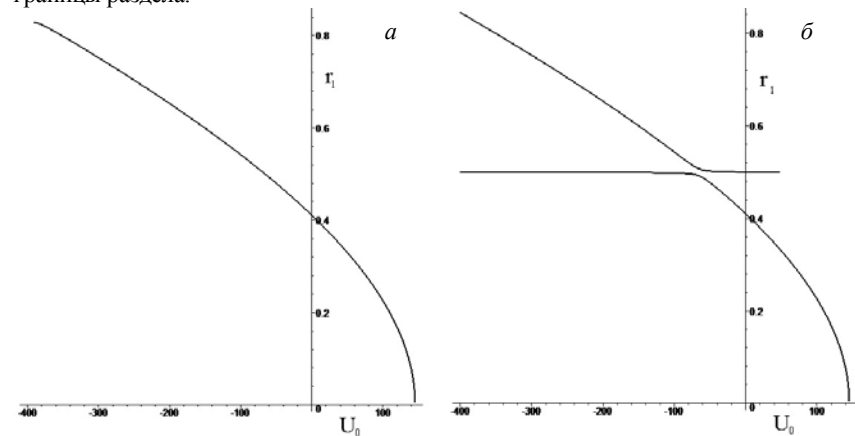


Рис.3. Зависимость нормированного волнового числа $r_1 = c_0 r / \omega$ волны в жидком слое от скорости течения для толщин слоя (а) $H = 0.3$ и (б) $H = 0.5$

Согласно выражениям (12)-(13) отношение амплитуд горизонтальной и вертикальной компонент смещения равно

$$\left| \frac{u_x}{u_z} \right| = \frac{k}{r} \operatorname{tg} r(z+h).$$

В приближении мелкой воды $rh \ll 1$ амплитуда горизонтального смещения много меньше амплитуды вертикального смещения, т.е. волну можно назвать квазипоперечной. В то же время при наличии сонаправленного течения волновое число r может стать малым, так что вертикальные профили горизонтального смещения и

давления становятся практически линейными $u_x \sim (z + h)$. Такую ситуацию также можно в определенном смысле назвать локализацией – вертикальный профиль не содержит осцилляций и максимум поля находится вблизи границы раздела. Отношение амплитуд в этом случае $|u_x/u_z| \approx kh$, как и для мелкого моря, однако сама величина kh может быть и не мала.

Отдельно нужно рассмотреть ситуацию, когда скорость поверхностной волны оказывается меньше скорости звука в жидкости. В этом случае тригонометрические функции в выражениях (11)-(13) заменяются на гиперболические, вертикальная структура оказывается монотонной. При этом при увеличении волнового числа r , которое наблюдается при встречном течении, происходит локализация поля вблизи границы.

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Течения вызывают изменения скорости волны и поперечной структуры акустического поля. Среди важных эффектов необходимо выделить появление новых мод и сближение дисперсионных кривых для соседних мод, что может привести к эффективному взаимодействию между ними. Попутное течение приводит к уменьшению волнового числа в жидком слое, причем при скорости, заметно меньшей скорости рэлевской волны, оно стремится к нулю. Это приводит к формированию монотонного, близкого к линейному вертикального профиля амплитуды акустического поля. Максимум поля наблюдается вблизи границы раздела и в определенном смысле можно такую ситуацию назвать локализацией. При больших скоростях попутного течения волновое число, по-видимому, становится мнимым. Аналогичные ситуации имеют место при а) встречном течении, б) в пределе глубокого моря и в) при скорости поверхностной волны, меньшей скорости звука в жидкости. Во всех этих случаях вертикальный профиль описывается гиперболическими функциями, и увеличение волнового числа приводит к локализации поля вблизи границы раздела.

В заключение рассмотрим особенности физической реализации полученных результатов. Как следует из полученных формул, эффект влияния течения имеет порядок U_0/c и, как уже говорилось выше, для характерных значений скоростей течений и поверхностных волн достаточно мал. Однако этот вывод справедлив для однородных сред. Для структурно-неоднородных сред ситуация может кардинально измениться. Например, в жидкости с пузырьками (см. например, [4]) скорость звука может уменьшиться на несколько порядков до величины порядка $c_0 \sim 25$ м/с. Аналогичная ситуация может сложиться, если донный грунт образован смесью осадков, содержащих пузырьки газа [5]. Наиболее полной моделью грунта может служить структурно-неоднородный вязко-упругий материал, обладающий небольшой скоростью продольных волн за счет включений большой сжимаемости (газовые пузырьки, поры и др) и малым сдвиговым модулем упругости. Можно ожидать, что именно эта модель будет адекватной для широкого класса осадочных донных грунтов. В этом случае величина U_0/c окажется большой и течения могут оказывать существенное воздействия на акустические поля. Нужно отметить, что в этом случае скорости звука в грунте и скорость поверхностной волны оказываются значительно меньше скорости звука в жидком слое, так что будет реализовываться одномодовая ситуация с сильной локализацией акустического поля вблизи границы раздела.

Работа поддержана грантами программы Президента РФ поддержки ведущих научных школ (грант НШ-2631.2012.2) и РФФИ (грант 12-02-01149-а).

Литература

1. *Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды. Изд. второе. М.: Наука, 1981.
2. *Викторов И.А.* Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981.
3. *Gusev V.A., Rudenko O.V.* The field of radiative forces and the acoustics streaming in a liquid layer on a solid half-space // *Acoustical Physics*, 2010. V. 56. No 6. P. 861-870.
4. *Руденко О.В., Гурбатов С.Н., Хедберг К.М.* Нелинейная акустика в задачах и примерах. М.: Физматлит, 2007.
5. *Руденко О.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Хедберг К.М., Шамаев Н.В.* Нелинейная модель гранулированной среды, содержащей слой вязкой жидкости и газовые полости // *Акустический журнал*, 2012. Т. 58. № 1. С. 112-120.