

МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКИЕ И ФИЛОСОФСКИЕ АСПЕКТЫ  
БАЗОВОГО КУРСА ЭКОЛОГИИ ДЛЯ «НЕЭКОЛОГОВ»

Гордиенко В.А.\*, Старкова М.В.\*\*

\*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.

\*\* Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии (ВНИИХТ), Отраслевой отдел защиты окружающей среды, Москва.

*«Особенно важно, что бы самые широкие круги общественности получили возможность ясно и отчетливо познать движущие силы и результаты научного исследования. Ведь совершенно недостаточно, чтобы каждый результат воспринимался, разрабатывался и применялся узким кругом специалистов в некоторой конкретной области. Сужение круга людей, которым доступно знание, до небольшой группы посвященных означало бы умерщвление философского духа народа и наступление духовной нищеты».*

А.Эйнштейн

*Обостренный интерес к новому циклу знания привел к тому, что все стали «экологами», науку захлестнул поток непрофессионализма, началась удручающая профанация экологического просвещения и образования. Околоэкологическое бурление порождает массу информационных шумов. Литературу наводнили пышущие эмоциями материалы с нулевым «сухим остатком» позитивного знания. В экологию хлынули люди с неустойчивой, а то и больной психикой. Общественное бурление вынесло на поверхность гору псевдонаучного мусора...*

**Николай Федорович Реймерс**

Ранее мы уже неоднократно затрагивали вопросы методологии подходов к изучению экологии на современном этапе [1,2]. Мы надеемся, что развиваемая нами концепция курса «введение в экологию» рассчитанная, прежде всего, на студентов вузов неэкологического профиля будет востребована, и возможно будет интересна и для профессиональных экологов.

Среди широкого круга специалистов, ученых-естественников (прежде всего, биологов и геофизиков) и философов сегодня считается общепризнанным фактом, не требующим доказательства, что быстрый рост человечества в XX веке и научно-технический прогресс породили беспрецедентное антропогенное воздействие на биосферу, и как следствие привели к глобальному экологическому кризису, что в свою очередь поставило человечество перед необходимостью решать ряд проблем, по сути дела поставивших человечество на грань возможности выживания как вида. А экологические проблемы, которые предстоит решать человечеству в наступившем XXI веке по значимости, по-видимому, станут одними из главнейших.

Вместе с тем, осознание этого факта еще не достигло основной массы жителей планеты. Более того, существуют вполне определенные группы людей, считающих, что это всего лишь алармистские<sup>1</sup> выходы ученых-экологов, призванные направить часть финансовых потоков на оправдание собственного существования.

На самом деле не секрет, что современная потребительская, присваивающая цивилизация, сделавшая своим фетишем<sup>2</sup> прибыль во имя еще большей прибыли, провозгласившая основным принципом существования неравенство распределения взятого у Природы богатства между людьми и народами, не решила практически ни одной социально значимой задачи разумного человеческого общества. Эта идеология не сделала человечество в целом ни богатым, ни счастливым, ни более разумным. По утверждению академика Н.Н. Моисеева, без «смены вех» в своем развитии такая цивилизация в III тысячелетии обречена.

Скорее всего, человечество найдет в себе силы изменить траекторию своего развития и построить новую цивилизацию «разумного потребления» и приоритета духовных ценностей. Однако, несмотря на активные и многочисленные дискуссии, пути выхода из создавшейся ситуации далеко не очевидны.

В определенной мере это связано с отсутствием достаточно четко сформулированных правил и законов, отвечающих за формирование свойств биосферы. В результате ошибочного истолкования причин ряда природных явлений, за последнее столетие уже неоднократно предлагались те или иные экологические меры для «стабилизации» этих свойств, как правило, требующие колоссальных финансовых затрат, но которые, на самом деле, как выяснялось впоследствии, не могли принципиально изменить ситуацию.

Из наиболее нашумевших, достаточно вспомнить проект переброса вод северных рек и даже Черного моря в Каспийское море, или проблему озоновых дыр.

<sup>1</sup> От английск. *alarm* – тревога, сигнал тревоги

<sup>2</sup> **Фети́ш** (фр. *fetich*, от порт. *feitico* колдовство, амулет) – амулет, оберег, талисман. В переносном смысле – то, что является предметом безусловного признания, слепого поклонения. У большинства людей в современном обществе это всевозможные вещи, где цена за имя фетиша растёт не сопоставимо росту качества этой вещи, но эта вещь является предметом безусловного признания в кругу общения данного индивида.

Как впоследствии выяснилось, понижение уровня Каспийского моря было связано с некоторым автоколебательным геологическим процессом. Проблема же озоновых дыр была инспирирована одним из концернов при попытке (достаточно удачной) монополизировать производство хладагентов путем разработки якобы более безвредного для озона «заменителя» широко использовавшимся в мире фреонам.

И в том и другом случае существенную роль сыграла определенная, имевшая место недостаточная компетентность соответствующих специалистов в своих областях знаний.

Поэтому встает естественный вопрос, а может ли экология, которая с момента своего появления в 1866 практически на протяжении целого века вплоть до 1970-х годов развивалась как раздел биологии, решить возникшие задачи. Дело в том, что и сама экология, и биология, из недр которой экология выросла, остаются пока самыми описательными из всех естественных наук. Основная масса законов, установленных в биологии и экологии, до сих пор является лишь небольшим обобщением наблюдений над живой Природой, и поэтому, как правило, остается во многом на уровне гипотез.

Одна из наиболее известных серьезных попыток создания теоретической биологии принадлежит Э.С.Бауэру. Э.Бауэр одним из первых в биологии признал факт, что биология находится пока на таком уровне познания, когда определяющим методом является метод индукции, позволяющий предвидеть или предсказывать явления Природы и общественной жизни лишь с некоторой (хотя нередко и достаточной) степенью правдоподобия. В своих изысканиях Э.Бауэр отказывает эволюционной теории в возможности делать заключения относительно причин эволюции, отмечая, что ее историчность не есть причинность (как говорят, «*после не значит вследствие*»), а утверждает, что эволюционная теория является «*теоретическим завершением, величайшим научным достижением первого, описательного периода биологии*».

Естественный ход развития науки – создание синтетической теории, объединяющей подходы на основе общности предмета, которая пользуется достижениями не только описательных, но и экспериментальных наук. Таким своим утверждением Э.Бауэр перекидывает мостик общности интересов между биологией, как пока еще описательной наукой, и такими фундаментальными науками, как физика, биофизика и химия, показывая, что имеющая место вплоть до настоящего времени жесткая дифференциация наук, может только помешать решению фундаментальных задач современной экологии.

В одной из предыдущих статей мы уже отмечали, что узконаправленный подход зачастую приводит к тому, что блестящее решение, найденное в одной области, оборачивается катастрофой в другой. Дело в том, что дифференциация дисциплин приводит к дисциплинарному взгляду на мир, не давая возможности охватить большой круг проблем и воспринимать природу как целое.

Возможно, поэтому в последнее время к попыткам разрешить их обратились и многие философы. Появилось новое направление в философии, называемое, чаще *экологической философией*, иногда – *философией Природной среды*.

Что же на самом деле может дать экологическая философия в решении экологических проблем?

*Экологическая философия* сегодня, как ее определяют сами философы – это комплекс социально-философских исследований взаимодействия общества и Природы. Экологическая философия исходит из того, что ресурсы планеты ограничены, поэтому необходим переход к созданию принципиально новых видов техники и технологий, альтернативных наук и культуры.

Большинство философов считает, что в современном познании именно философия призвана соединить все множество разноплановых подходов к экологической проблеме, всю совокупность ее аспектов и оснований. Философия осуществляет этот теоретический синтез, решая в то же время традиционную задачу методологического поиска. Философское осмысление экологической ситуации могло бы помочь формированию общеметодологических принципов анализа и решения проблем.

Это, безусловно, разумные мысли. Но существует достаточно принципиальная проблема.

Философия вообще и философия экологии (экологическая философия) призывают построить логически непротиворечивое здание «экологии», которое только и сможет уберечь нас от надвигающейся экологической катастрофы.

Трагикомизм положения состоит в том, что сами естествоиспытатели, пытающиеся познать Законы Природы, часто не вполне понимают логику, как самой науки познания, так и законов Природы. *Великие открытия всегда нелогичны!* И люди лишь с трудом к ним привыкают. Да и сами открытия (особенно великие) совсем не вытекают из логического анализа известных результатов исследований в той или иной области, а возникают стихийно и тоже нелогично.

Выражаясь языком современной синергетики, великие или гениальные открытия – это некая точка бифуркации в мыслях естествоиспытателя, часто не коррелирующая с обычными знаниями в данной области у самого естествоиспытателя, а скорее с общим интеллектуальным его уровнем и особенностями его мировоззренческой культуры. Возможно поэтому, известный физик Р. Фейнман, отвечая на вопрос о месте философии в познании законов Природы, сказал, что угадывание, по-видимому, очень хороший способ открывать законы, а всякая попытка выразить Природу, опираясь на философские принципы или интуитивные механические аналогии, не приводят к серьезным результатам: *в Природе философские предчувствия не оправдываются.*

Ведь уже сколько раз Природа нам доказывала несостоятельность наших самых радужных логических умозаключений. Это неоднократно случалось как в физике – основной науке, которая занимается изучением законов Природы, так и в экологии.

Из исторически известных нам натурфилософов, возможно, лишь древние греки смогли по достоинству оценить этот «характер» Природы (см., например, [3]) Нам же еще только предстоит, по-видимому, поднять до их уровня истинно философское понимание Природы.

Разделение науки на различные направления было сделано, в какой-то мере, искусственно и к концу прошлого века стало ясно, что границы различных областей науки стали вновь пересекаться. Однако еще в начале XX века В.И.Вернадский предостерегал от чрезмерного увлечения абстрагированным знанием, оторванным от понимания природы, как единого целого.

Считается, что философский подход может дать необходимую целостность взглядов на Мир и место в нем человека, создав цельное мировоззрение. Тем не менее, вплоть до настоящего времени не прекращаются споры о месте философии в познании окружающего Мира. По мнению Э. Шредингера, например, философия не является частью самого знания науки, но подобна строительным лесам, без которых нельзя обойтись при постройке здания. Однако после завершения строительства леса больше не нужны и должны быть убраны. Ибо иначе (добавляет Эрнст Мах) философские системы становятся не только бесполезными в науке, но и создающими вредные бесплодные мнимые проблемы.

В одной из своих публичных лекций Р. Фейнман в шутку, в определенной мере, перефразируя высказывание Б. Рассела по поводу места астрологии, определил место философии в познании Мира примерно следующим образом. Есть *Наука*, и есть *Религия*. Между ними лежит ничейная земля, которая и называется *Философией*. Когда Религия уже не может, а Наука еще не может дать ответы на некоторые вопросы, за дело берутся философы, начинают говорить много... И это называется «...решать фундаментальные научные проблемы».

С позиций большинства философов философия выступает как это теоретический уровень мировоззрения, система общих теоретических взглядов на Мир в целом, место в нем человека. Такой подход в целом понятен, если обратиться к истории общения Человека и Природы.

Потребность в понимании окружающего Мира в объяснении протекающих в нем процессов очень велика. Люди используют полученные знания об устройстве окружающего мира, чтобы выжить, использовать различные предметы и явления Природы для облегчения труда, улучшения условий жизни. Огонь, одежда, мореплавание, колесо вместо полозьев, и далее – радио, телефон, телевизор, автомобиль, ракета... Мы познаем определенные правила, которым следуют отдельные составляющие Природы, и используем их.

Этот набор сведений мы получаем из наблюдения за окружающим нас Миром. Многие вещи мы познаем с детства неосознанно (огонь обжигает, дерево плавает в воде, а железо тонет, примерно через 365 восходов и заходов солнца повторяются времена года...). Это «стихийное» естественное знание, т.е. знание о Природе окружающих вещей.

Не удивительно, что на первых порах развития человечества, когда познания об окружающем Мире были весьма скудны, важную роль во взаимоотношениях не только между людьми, но и между человеком и Природой играли правила поведения человека, диктуемые религией или культовыми обрядами и пр.

Специфика религии обуславливается тем, что основным элементом религии является культовая система, т.е. система обрядовых действий, направленных на установление определенных отношений со *сверхъестественным* (т.е. непонятным, не объяснимым с позиций накопленных на данный момент времени знаний). В основе такой культовой системы, как правило, лежит определенный опыт обобщения наблюдений за возможными правилами взаимоотношений между людьми и человеком и природой, исходящего из основного правила: «Не навреди...». Поэтому всякий миф становится религиозным в той мере, в какой он включается в культовую систему, выступает в



качестве ее содержательной стороны. Мировоззренческие конструкции, включаясь в культовую систему, приобретают характер вероучения и становятся основой формальной регуляции и регламентации, упорядочения и сохранения нравов, обычаев, традиций. С помощью обрядности религия культивирует человеческие чувства любви, доброты, терпимости, сострадания, милосердия, долга, справедливости и т. д., придавая им особую ценность, связывая их присутствие со священным, сверхъестественным.

Не вдаваясь в подробный анализ деталей, укажем лишь, что, исходя из сегодняшнего понимания законов Природы в фундаментальной физике, по-видимому, религию целесообразно трактовать (следуя В. Владимирову [4]) следующим образом: «*Религия есть та часть целостной системы представлений о сущности, о движущих началах и закономерностях всего мироздания, которая дополняет познанное человеком до целого и определяет его ориентацию и действие в непознанной совокупности мировых проблем и обстоятельств*».

В религиях Природа обожествлялась, человек первоначально осознавал свою зависимость от нее. Чувство единства с Природой – самый сильный импульс мифологического мышления – писал Э. Кассирер. В древнегреческой философии появилась идея о Космосе, как высшей гармонии устройства Вселенной (см., напр., [5]). Жизнь в соответствии с разумом – это жизнь в согласии с Природой. Ограничение потребностей считалось мудростью.

Философия зародилась, как попытка решить основные мировоззренческие проблемы средствами Разума, т.е. мышления, опирающегося на понятия и суждения, связывающиеся друг с другом по определенным логическим законам.

Споры о том, нужна ли такая философия, и что же такое философия сама по себе, ведутся уже более 2500 лет. В современной литературе довольно часто философию трактуют как науку о наиболее общих законах развития Природы и общества. Мы же все-таки склонны, присоединяясь, например, к Н.А. Бердяеву, трактовать философию скорее как искусство. Искусство мыслить, искусство грамотно и логично сопоставлять различные факты, искусство делать правильные выводы из такого сопоставления. *Философия это искусство познания*. Искусство – потому что в философии личность творца запечатлевается не менее чем в поэзии и живописи.

Поэтому кое-что полезное в попытках приблизиться к пониманию законов Природы мы, конечно, можем позаимствовать и у философов.

Прежде всего, это попытка решения вопросов отношения человека к Природе на основании исторического анализа философских взглядов.

Еще И.Кант (см. [6]) сформулировал основные вопросы, на которые должна ответить философия, и которые не только не потеряли актуальности сейчас, но и, наверное, должны доминировать в рамках рассмотрения экологических вопросов:

- Что я могу знать?
- Что я должен делать?
- На что я могу надеяться?
- Что такое человек?

«*Что я могу знать?*», – Кант, считал, что ответ на этот вопрос должна дать метафизика – систематическое знание, выведенное из чистого разума. Вопрос «*что я должен делать?*» – подводит к проблемам этического характера, ответом на которые служит мораль, «*на что я могу надеяться?*» – исследует феномен веры.

Проблема же, связанная с «человеком» и его местом в современной картине Мира занимает сегодня особое, ключевое, место.

На настоящий момент времени все еще отсутствует единая точка зрения на многие проблемы, связанные с эволюционными процессами. В то же время, в физике показано, что принципиальное значение при рассмотрении закономерностей и направленности эволюционных процессов играет принцип дополненности, сформулированный Н. Бором. Кроме того, наряду с действием всегда необходимо учитывать противодействие. Отсюда с неизбежностью следует однозначный вывод о невозможности описывать направленность эволюционных процессов, опираясь только на понятие энтропии и свойства энтропии, устанавливаемые вторым началом термодинамики. В рамках такого подхода удается показать, что самоорганизация возможна не только в открытых, но, при определенных условиях, и в закрытых системах. В результате феномен «жизни» приобретает новый оттенок, в том числе и в свете известных и широко цитируемых утверждений В.И.Вернадского, что «...жизнь это космическое явление», и Л.Пастера – «все живое от живого».

Поэтому можно утверждать следующее: *экологию следует понимать не только как отрасль науки, но гораздо шире – как метод мышления*. Философия всегда проявляла внимание к отношению человека с Природой. Возникновение жизни, разума, их развитие – предмет не только конкретных наук, они, как космические феномены требуют философского осмысления.

Современному миру для решения его сложнейших проблем нужны наука и техника, но не в меньшей мере он нуждается в философии для решения и таких «вечных вопросов», как вопрос о единстве человека и Природы, который уже встает как вопрос о разрыве единства в ситуации угрозы глобального экологического кризиса.

На протяжении всей истории человечества люди, в зависимости от своеобразия и уровня своего социального развития, нуждались в Природе, но видели ее по-разному, создавая различные (мифологические, религиозные, философские и т.д.) образы Природы, в которых они, так или иначе, соотносили себя с Природой, познавая себя через Природу и Природу через себя. Однако противопоставление человека и общества природному окружению, космосу – характерная черта многих мировоззренческих систем, особенно если иметь в виду западную философско-мировоззренческую традицию последнего тысячелетия. Даже мелькавшая у многих философов идея всеобщей одушевленности природы (*гилозоизм*) уже была бессильной приблизить человека к первобытному синкретическому состоянию. Более того, можно думать, что даже *античный гилозоизм* – это уже своего рода попытка человека (возможно, подсознательная) навязать Природе те или иные особенности своей физиологической организации, отдельные черты своей психики и чувственного аппарата.

В *пантеизме* мы видим пример возвышения Природы до божественной сущности. В рамках этого философского учения Природа пронизана высшим Разумом, но она по-прежнему, и даже в еще большей степени, остается сферой бытия, противостоящей человеку.

Идея непрерывного прогресса, венцом которой явилась *философия Гегеля* с его верой в диалектическое восхождение от низшего к высшему (и которая стала одной

из трех основных составляющих философии марксизма-ленинизма), отражала стихийное развитие индустриального общества.

*Позитивизм* призывает уничтожить всю бесполезную для промышленности жизнь, не регулировать рост цивилизации. Об этом, например, писал А. Смит, считавший общество целесообразным и способным к саморегуляции.

Рынок и либеральная экономика являются естественным идеалом для развивающегося общества, при котором Природа становится всего лишь полезной вещью, а *теоретическое познание ее собственных законов выступает лишь как хитрость, имеющая целью подчинить Природу человеческим потребностям*.

Такое фрагментированное воззрение на мир зачастую доминирует и в культуре.

Современное миропонимание базируется на таком же потребительском отношении к Природе. Это техногенная культура, в ней доминирует ориентация на непрерывный рост технологического потенциала, она исходит из постоянного совершенствования техники и технологии на основе роста научного знания. Но вооруженная мощными техническими средствами, она обнаруживает ограниченность ассимиляционных возможностей среды и адаптационных возможностей человека. Возникает опасность, что человек задохнется в своей второй Природе.

Ф. Энгельс отмечал, что человек, в отличие от животных, не приспособливается к среде, а с помощью труда приспособливает Природу к своим потребностям, внося сознательные изменения в Природу, используя ее Законы против нее самой, придавая Природным процессам направления, которые требуются человеку.

Способности трудовой деятельности развиваются, человек охватывает все новые области и подчиняет своей организационной деятельности всю Природу.

Но труд может превратиться из созидательного фактора в разрушительный, если человек не учитывает его последствия.

Орудия труда сделали человека универсальным фактором на планете, но его деятельность идет вразрез с порядком и направленностью Природных процессов.

Еще К. Маркс отмечал опасность такого подхода: «*Культура, которая развивается стихийно, а не направляется сознательно, оставляет после себя пустыню*». Не нужно обольщаться победами над Природой. Это свойство цивилизации, – заключительной фазы погибающей культуры.

Если приглядеться к победам человека над Природой взглядом философа-аналитика, то можно обнаружить, что каждая победа кроме тех последствий, на которые мы рассчитываем, имеет непредвиденные последствия. Мы принадлежим Природе, находимся внутри нее и **господство человечества над Природой заключается лишь в том, что мы умеем познавать ее законы и правильно их применять**.

Человек взаимодействует с Природой через труд, который поставил человека в качественно новое положение по отношению к Природе. Но важно осознавать, что *труд не биологическое явление, так как противостоит Природе, но в то же время он происходит из Природных факторов и с этой точки зрения может быть согласован с ней при полном контроле ближайших и отдаленных последствий своей деятельности, при переходе к сознательному управляемому развитию*.

Человек – в первую очередь, порождение Природы, результат длительного ее развития. В реализации этого эволюционного процесса возник удивительнейший

феномен – Разум. Но Разум оказался совсем не всемогущим. Ему доступно только то, что «доступно», благодаря тем возможностям, которые возникли в результате длительной эволюции и продолжают открываться в процессе его развития. Поэтому абсолютизация возможностей Разума крайне опасна, как и всякая переоценка своих, достаточно скромных сил.

Современная физика со всей очевидностью показала, что в окружающем Мире есть некоторая граница познания, за которой лежит то, что принципиально недоступно тому Инструменту, который нам дан законами развития Природы. И существуют вопросы, на которые, человек не имеет и, вероятнее всего, никогда не будет иметь ответа. Поэтому человечеству важно понять следующее: *«абсолютная Истина»* – это мираж, который всегда отдалается по мере того, как человек обретает новые знания, формирует новые, необходимые для жизни «эмпирические обобщения»!

Наилучшим образом это иллюстрирует известная буддистская притча о том, как пять слепцов встретили слона. Первый прикоснулся к бивню и принял его за гигантскую морковку, второй коснулся уха и подумал, что это большой веер, третий потрогал ногу и решил, что это столб, четвертый взялся за хобот и заявил, что это мотира, а пятый, притронувшись к хвосту, стал утверждать, что это веревка.

Вот почему мировоззрение никогда не сможет быть сведено к чисто научному, рационалистическому миропредставлению.

И главный философский вопрос: *что еще необходимо сделать сегодня, чтобы не было катастрофы завтра?* Каков должен быть новый антропоцентризм? А он, по мнению Н.Н. Моисеева все-таки должен быть, ибо нас волнует, прежде всего, судьба Человека. Но новый антропоцентризм должен не просто ставить человека в центр мироздания, как в былые времена, а стремиться изменить себя и Природу и, прежде всего, свое поведение так, чтобы сохранить себя на планете. Но как этого достичь? И здесь философия, выполняя свою методологическую функцию, позволяет сформулировать правила познания тех законов и путей, которые действительно могут привести к решению стоящих перед человечеством экологических проблем и задач.

Очевидно, не случайно И.Кант, пытаясь осмыслить возможные подходы к поиску ответов на поставленные им выше вопросы, рассматривал два типа культуры: *умения и воспитания*. **Культура умения** необходима для достижения целей, но ее недостаточно для их выбора. **Культура воспитания** относится к сфере морали [6].

Интересным является тот факт, что слово *культура* стало использоваться во второй половине XVIII века в качестве обозначения, во-первых, целенаправленного воздействия человека на природу, и, только, во-вторых, воспитания и обучения человека. Таким образом, культура человека непосредственно связана с окружающим нас миром, включающим **Природу** и **Общество**. Человек, с позиций философии рассматривается как субъект познания и носитель знания и мышления, а также как объект философского познания и объект самосознания. А для формирования мировоззрения человеку необходимо, прежде всего, стремление к познанию. Ведь как говорил еще в «Метафизике» Аристотель: «Удивление – вот что побуждает к философскому размышлению как прежде, так и теперь».

Современная экология призвана изучать закономерности взаимодействия в треугольнике **Человек–Природа–Общество**, опираясь на огромный накопленный

(в том числе и экспериментальный) материал, знаний человека о законах Природы и среды, в которой он живет, а также механизмах, которые формируют и сохраняют среду. В этом, на наш взгляд, и состоит понимание экологии не только как отрасли науки, но как метода мышления.

Базовый курс экологии для неэкологов должен помочь осознать взаимосвязь человека и Природы. На первый план, по нашему мнению, должны выходить не сами знания законов Природы как таковые, а логический анализ этих данных.

Биологи, например, считают, что относительно длительная стабильность биосферы основана на замкнутости регулируемых биотой круговоротов биохимических веществ, когда внешние воздействия вызывают внутренние возмущения круговоротов, которые компенсируют эти внешние воздействия.

Появление человечества, несомненно, внесло свой вклад в эволюцию биосферы. Нельзя не согласиться с мнением В.И. Вернадского, что благодаря научно-техническому прогрессу воздействие человека на окружающую среду стало сравнимым с геологическими процессами, что, безусловно, не могло не сказаться на скорости эволюционных процессов. Соотношение действия и противодействия вошли в новую стадию. Это в свою очередь, согласно законам синергетики, если противодействие при определенных условиях превысит некоторое критическое значение, может привести к бифуркации. Последствия же такого сценария могут оказаться не предсказуемыми или даже привести к гибели популяции человека как вида в целом, как уже случалось раньше по тем или иным причинам с другими популяциями или видами живых организмов. Поэтому в настоящее время проблема выживания человечества (т.е. длительности во времени существования нашей цивилизации в целом) стоит весьма серьезно.

Но, вместе с тем, нельзя забывать, что *эволюция биосферы – это естественный процесс, который мы вряд ли сможем отменить*, и что даже полный отказ от всех техногенных достижений человечества, не сможет остановить эту эволюцию (а, следовательно, и изменение физико-химических характеристик биосферы). Этот процесс будет продолжаться всегда (возможно с иной скоростью), причем, даже в том случае если человечество, как популяция, вообще исчезнет с лица Земли и антропогенное воздействие на окружающую среду прекратится. Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что вопросы решения проблем, именуемых экологическими, на самом деле выходят далеко за рамки экологии и ее традиционной формулировке. Не случайно многие предложения, как экологов, так и представителей «зеленых» в настоящее время, начинают вызывать критическое отношение не только к возможностям экологии. Уже очевидно, что решение этих проблем требует и дополнительных новых знаний, и нового менталитета.

В процессе изучения взаимоотношений между человеком и Миром возникают вопросы о сущности Мира и его происхождении, соотношении живого и неживого в природе, происхождении человека и многие другие. Причем часто простейшие вопросы могут поставить в тупик любого человека. Например, если задуматься, то, оказывается, что до сих пор никто не знает, ни что такое электрон, ни что такое электрический заряд, и почему для непонятого слова «электрический заряд» нужно вводить понятия «положительный» и «отрицательный», а у еще более непонятных «барионного» и «лептонного» зарядов такого разделения пока не существует. Таким образом, мы сами того не замечая, понятия «электрон», «плюс» и «минус» принимаем как должное на веру!

Более того, несколько лет назад было выявлено, что за все время существования науки ученые изучали свойства только 10% материи. Остальные 90% материи (которую «договорились» назвать «*dark matter*» – тёмная материя) оказались пока недоступны современным средствам наблюдения.

Такие «проблемы» существуют не только у физиков, но и у биологов и медиков. Так, до сих пор учёные, изучающие живую материю, не могут объяснить природу жизни, каким, образом те же самые атомы, соединяясь между собой формально в одни и те же молекулы, представляют собой в одном случае «мёртвую» материю, а в другом – «живую».

Очевидно также, что неполное знание даже о десяти процентах материи Вселенной не даёт никому никакого права требовать абсолютного признания тех или иных гипотез и теорий как истинно научного представления о природе Вселенной и выступать обвинителями и экспертами по критике других теорий, даже если кажется, что эти теории не соответствуют истине. В качестве примера достаточно вспомнить о гонениях на генетику в СССР, когда на протяжении многих лет в качестве лозунга взаимоотношений человека и природы выступало известное утверждение, обычно приписываемое обычно Мичурину: «*Нам нельзя ждать милостей от Природы. Все, что нам необходимо, мы должны взять у неё сами!*...».

К сожалению, очень часто определенные научно-философские представления о законах, управляющих Природой, как это ни странно, имеют политико-финансовые корни. Навязывание ложных представлений той или иной группе людей или даже человечеству в целом позволяет отдельным группам людей процветать, паразитируя на теле земной цивилизации.

Именно поэтому, чтобы относительно грамотно оценить возможности принятия того или иного решения, особенно серьезного (будь то экономическая программа развития общества, военная доктрина, юридическое законодательство и т.п.), любой специалист помимо конкретных профессиональных знаний, должен иметь соответствующий мировоззренческий потенциал, ориентирующий по возможности на широкий круг знаний. И от того, каковы эти мировоззренческие представления, зависит не только формальный ответ на вопрос, кто прав, а кто не прав, но само будущее цивилизации.

Нужно искать новые пути не только решения экологических проблем, но и их обоснования. Для этого необходима экологическая грамотность специалистов самых разных направлений современной техники, технологии, управления, экономики, промышленности и сельского хозяйства.

Очевидно, что в основе познания мира (в том числе, и научного) лежат, прежде всего, наблюдения за явлениями Природы. Современная наука накопила огромное число наблюдений за происходящим в окружающем нас мире. Однако как показала современная физика, несмотря на огромное число созданных научных приборов и установок, мы, скорее всего, не столько приблизились к пониманию самих законов Природы, сколько к пониманию того, что большинство сформулированных человечеством законов Природы являются всего лишь грубым приближением их проявления в окружающем нас Мире.

Как это не выглядит странным, современная наука во многом опирается на веру. Сформулированные нами законы природы – это всего лишь постулаты, как правило, формально не противоречащие некоторым наблюдениям и (или)

небольшой серии экспериментов, поставленных в ограниченных условиях лабораторий и полигонов.

В современной науке о природе Вселенной постулатов во много раз больше, чем было, например, в XIX веке. И число постулатов продолжает расти как снежный ком. Все настолько привыкли к ним, что не обращают внимания на присутствие постулатов практически в каждом так называемом научном утверждении.

В процессе обретения новых знаний человек не только познает мир, но и остается его частью. И наряду с радостями существования, сталкивается с невозможностью абсолютного познания мира, отсутствием абсолютных критериев добра и зла, красоты и истины и пр. Ориентиром в таких ситуациях может стать система ценностных представлений, которая является одной из главных назначений мировоззрения. И состоит не только в том, чтобы человек опирался на какие-то общественные знания, но и в том, чтобы он мог руководствоваться определенными общественными регуляторами. Для этого существует ценностно-нормативный компонент мировоззрения, который включает в себя ценности, идеалы, убеждения, верования, нормы, директивные действия и т. д.

Отметим, что каждой эпохе присущ свой тип мировоззрения. Помимо этого существуют еще национальные менталитеты, религиозные и т.д. В процессе жизни идет непрерывная трансформация наших взглядов на окружающий мир. Это вполне нормальный процесс.

Представления о том, что хорошо и плохо, например, будут существенно различаться, для европейца и китайца. Академик Б. Раушенбах приводит следующий пример: «Полководец, который должен начать завтра решающее сражение, накануне боя получает письмо о том, что его отец тяжело заболел. Полководец, конечно, герой в лучшем смысле этого слова. Как он поступит, будучи европейцем? Он скажет: родина превыше всего, и – пусть со слезами на глазах, – возглавит армию и выполнит свой долг. Китаец скажет: родина – это хорошо, завтрашнее сражение очень важно, но заболел мой отец, я все бросаю и еду к нему».

Выше уже отмечалось, что связующим звеном между природой и обществом выступает культура. Она охватывает духовную и материальную сферу существования общества и выступает как форма проявления свободы и творчества, как средство самореализации и основных ценностей человека.

По мнению Ю. Лотмана культура представляет собой коллективный разум или сверхиндивидуальный интеллект, «механизм, восполняющий недостатки индивидуального сознания и, в этом отношении, представляющий неизбежное ему дополнение» [7]. Таким образом, можно говорить, что культура – это индивидуальность второго порядка, включающая в себя личные индивидуальности, сохраняя при этом их отдельность и самостоятельность. Коллективное сознание неразрывно связано с коллективной памятью. А память представляет собой способность длительного хранения информации о событиях и возможность воспроизведения прошлого опыта.

Уже на рубеже XIX-XX веков стали появляться работы о взаимном влиянии материальных, духовных и объективных процессов в обществе. Произведения искусства создают вокруг себя атмосферу общения, зачастую давая возможность

воспринимать другой народ, без «языкового барьера». Они становятся окном в мир. И в этом общении культуры различных народов обогащаются.

И. Пригожин показал, что активнейшим фактором исторической и космической жизни является интеллект, а, следовательно, огромную роль играет уровень развития человеческой культуры. Не разобравшись в художественных и религиозных представлениях народа невозможно понять его философию. Возможность творчески использовать полученные знания, позволят человеку активно воздействовать на окружающую среду. Представления о природе Вселенной могут стать как ключом к прогрессу цивилизации, так и привести к ее гибели. Как уже упоминалось выше, за последнее столетие уже неоднократно предлагались те или иные экологические меры для «стабилизации» природных явлений, как правило, требующие колоссальных финансовых затрат, но которые, на самом деле, как выяснялось впоследствии, не могли принципиально изменить ситуацию.

Очевидно, что деятельность человека не может быть противопоставлена функционированию биосферы, поскольку она является одной из форм, принадлежащих глобальному круговороту вещества и энергии в природе и не может существовать вне его.

С другой стороны, мы не представляем себе развитие общества без развития и усовершенствования производства, а, следовательно, без увеличения воздействия со стороны общества на Природу.

Последствия воздействий, конечно, бывают различные. Вырубив одно дерево в лесу, мы мало что изменим по-существу. Однако массовые вырубки леса могут привести к необратимым процессам (смывание верхних плодородных слоев почв с холмов в низины, пересыхание ручьев и рек и т.п.).

Экономист в классическом смысле этого слова, как правило, решает вопрос о количестве необходимого для вырубки леса (или добычи какой-либо руды), прежде всего, исходя из «сегодняшних» прибылей или убытков даже при долгосрочном планировании. Тем не менее, очевидно, что на самом деле следует искать пути такого планирования общественного развития, при котором достигалась бы оптимизация всего процесса развития, как общества, так и неразрывно связанной с ним Природы.

Лишь при такой постановке задачи становится достижимой цель относительно неограниченного во времени прогрессивного развития общества. Это, в свою очередь, предполагает, что планирование социально-экономического развития должно осуществляться людьми, хорошо представляющими не только социальные и экономические законы, но и законы развития окружающего нас Мира.

Последнее касается не только вопросов государственного планирования, но и государственного законодательства, которое обязательно должно учитывать последствия взаимоотношений между обществом и Природой. Знание законов Природы – основа разумного подхода к планированию взаимоотношений Природы и общества. Безусловно, многие из перечисленных проблем должны были бы быть решены в рамках экологии.

#### Литература

1. Гордиенко В.А., Старкова М.В. Экология – synopsis XXI века// Физические проблемы экологии (Экологическая физика)// Сб. научн. трудов. – М.: МАКС

- Пресс, 2008. №15. С.81-102
2. Гордиенко В.А., Старкова М.В. Особенности системного подхода в экологии// Ломоносовские чтения – 2009. Секц. Физика. Сб.тез. М.: МГУ, 2009.
  3. Шредингер Э. Природа и греки. – Ижевск.: Ижевск. респ. типография. 1999 (Cambridge, University Press, 1944).
  4. Владимиров Ю.С. Фундаментальная физика, философия и религия. Кострома: Изд-во МИИЦАОСТ, 1996. 226 с.
  5. Гордиенко В.А. Микромир// «Хорошо информированный источник» – информационно-аналитический журн. – М.: Колос, 2007. С.32-42
  6. Гулыга А. Кант. –М.: Молодая гвардия. 1977.– 304 с.
  7. Лотман Ю.М. Избранные статьи в трех томах.– Таллинн: Александра, 1992. Т.1, стр.44.

#### ФИТОПЛАНКТОН КАК ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ БИОСЕНСОР ЭКОТОКСИКАНТОВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

Т. С. Гостев<sup>1</sup>, Ф. И. Кузьминов<sup>1</sup>, Е.Г. Максимов<sup>2</sup>, В. З. Пашенко<sup>2</sup>, В. В. Фадеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова.

<sup>2</sup>Биологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова.

#### ВВЕДЕНИЕ

Использование естественных компонентов экосистемы в качестве индикаторов ее состояния является наиболее современной стратегией экологического мониторинга. Большие возможности для биоиндикации [1] предоставляют фотосинтезирующие организмы, благодаря высокой чувствительности их физиологического состояния к изменениям в окружающей среде — присутствию загрязнителей, климатическим изменениям, изменению светового режима и т. д. Об изменении состояния клеток фитопланктона как биоиндикатора качества природных вод можно судить по результатам биологических тестов, например, по изменению скорости деления клеток. Однако эти тесты инерционны и малопродуктивны, не позволяют получать оперативную информацию в режиме реального времени и контролировать большие акватории. Поэтому все большее внимание привлекает возможность использования флуоресценции в качестве средства получения экспресс-информации об изменении состояния фитопланктона под действием факторов среды.

Классические методы флуоресцентной спектроскопии фотосинтезирующих организмов (такие, как Pump and Probe, PAM, FRR, FIRE [2, 3, 4]) позволяют определять фотофизические характеристики фотосистемы в целом и, следовательно, контролировать их изменение под действием факторов среды. Методы лазерной флуориметрии (нелинейная [5, 6], кинетическая флуориметрия, их синтез – матричный метод [7]) позволяют получать информацию об объекте на молекулярном уровне — на уровне фотофизических параметров молекул пигментов-флуорофоров. До сих пор эти два подхода развиваются независимо, хотя, по-видимому, они могли бы давать дополняющую друг друга информацию и тем самым в комплексе значительно увеличить возможности флуоресцентной

спектроскопии применительно, в частности, к диагностике состояния фитопланктона и его использованию в качестве флуоресцентного биоиндикатора присутствия экотоксикантов в природных водах.

В качестве одного из первых шагов в реализации этой идеи должно быть сравнение чувствительности биосенсоров на основе фитопланктона при использовании классических (линейных) и лазерных методов флуориметрии. В данной работе основное внимание уделено определению предельно низких концентраций двух экотоксикантов — меди как представителя группы тяжелых металлов и диурона как представителя группы гербицидов — с использованием метода нелинейной лазерной флуориметрии в последней, наиболее информативной его версии, предложенной нами в работе [8]. Полученные результаты сопоставлены с результатами применения метода FIRE — представителя семейства методов, основанных на измерении индукции и релаксации флуоресценции фотосинтетического аппарата в процессе облучения микросекундными световыми импульсами [3].

## МЕТОДЫ

Использованный в данной работе вариант метода нелинейной флуориметрии подробно описан в работе [8] и в кратком изложении состоит в следующем.

Регистрируется нелинейная зависимость числа фотонов флуоресценции  $N_{fl}$  от плотности потока фотонов в возбуждающем излучении  $F$ . Основными эффектами, ответственными за насыщение флуоресценции, являются синглет-синглетная аннигиляция возбужденных состояний молекул хлорофилла  $a$  и динамическое обеднение их основного состояния [5]. Эти процессы проявляются только при достаточно большой плотности потока фотонов возбуждающего излучения ( $F > 10^{21} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) и определяются значениями молекулярных фотофизических параметров флуорофоров и их локального окружения. В клетках фотосинтезирующих организмов скорости указанных процессов в большой мере зависят от состояния фотосинтетического аппарата. Таким образом, фотофизические параметры определяют вид экспериментальной кривой насыщения и могут быть определены из нее в результате решения обратной задачи.

Предложенная в работе [9] малопараметрическая модель флуоресцентного отклика фитопланктона на импульсное лазерное возбуждение включает четыре обобщенных фотофизических параметра:  $\sigma$  — сечение возбуждения молекул хлорофилла  $a$ , учитывающее как прямое поглощение света, так и перенос энергии со вспомогательных пигментов;  $\tau$  — время жизни возбужденного состояния молекул хлорофилла  $a$ , учитывающее все каналы дезактивации, за исключением синглет-синглетной аннигиляции;  $\mathcal{M}_0$  — максимальная скорость синглет-синглетной аннигиляции возбужденных состояний молекул хлорофилла  $a$  (здесь  $n_0$  — локальная концентрация молекул хлорофилла  $a$ ) и  $\Phi_0$  — нормированная интенсивность флуоресценции в отсутствие эффекта насыщения.

Первая реализация метода нелинейной флуориметрии, использующая эту модель [10], позволяла определять из экспериментальных данных только два параметра:  $\Phi_0$  (ненасыщенный флуоресцентный параметр, пропорциональный концентрации хлорофилла  $a$ ) и  $A = \sigma\tau^2\mathcal{M}_0$  — параметр насыщения, свертку фотофизических параметров используемой модели. Было показано [10], что параметр насыщения обладает высокой чувствительностью к состоянию фотосинтетического аппарата и таксономической принадлежности исследуемой водоросли. Вместе с тем, раздельное определение входящих в него параметров модели оказалось невозможным из-за неустойчивости решения четырехпараметрической обратной задачи в условиях зашумления входных данных, что сокращало информативные возможности метода.

В работе [8] предложен алгоритм раздельного определения указанных выше фотофизических параметров молекул хлорофилла  $a$ . Он основан на том, что вклад различных процессов, отвечающих за насыщение флуоресценции, меняется в зависимости от выбранного участка кривой насыщения (диапазона плотностей потока фотонов лазерного возбуждения  $F$ ). Это позволяет при решении обратной задачи не учитывать вклады одних процессов в эффект насыщения по сравнению с другими для заданного участка кривой насыщения. При этом появляется возможность разделить четырехпараметрическую обратную задачу на две двухпараметрические, решаемые на более широком по сравнению с предыдущими реализациями диапазоне изменений  $F$  ( $F \approx 10^{21} \sim 10^{25} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

Поскольку измерение абсолютного числа фотонов флуоресценции  $N_{fl}$  затруднительно, используется нормировка флуоресцентного отклика на сигнал в реперном канале  $N_r$ , который линейно зависит от мощности возбуждающего излучения, например, сигнал комбинационного рассеяния воды. Таким образом, экспериментальные результаты представляются в форме  $N_r(F)/N_{fl}(F)$ .

Чувствительность метода биоиндикации с использованием указанных четырех фотофизических параметров фитопланктона исследована в лабораторных экспериментах с микроводорослью *Chlorella pyrenoidosa* в различных функциональных состояниях: для нативного образца, в присутствии гербицида диурона (DCMU) и в присутствии ионов меди  $\text{Cu}^{2+}$ . Перед экспериментом образцы проходили темновую адаптацию в течение 30 минут, использовались концентрации каждого из экотоксикантов на порядок ниже предельно допустимых.

Схема экспериментальной установки представлена на Рисунке 1. Параметры установки следующие: длительность импульсов лазерного излучения — 20 нс, максимальная энергия в импульсе — 12 мДж, длина волны излучения — 532 нм. Плотность потока фотонов может варьироваться в пределах  $F \approx 5 \cdot 10^{21} \sim 2 \cdot 10^{25} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . В качестве реперного канала используется сигнал с фотодиода, на который пластинкой отводится часть излучения. Сигнал флуоресценции измеряется фотоэлектронным умножителем, селекция спектральной полосы регистрируемого сигнала осуществляется



интерференционным фильтром с центром полосы пропускания на длине волны 690 нм.

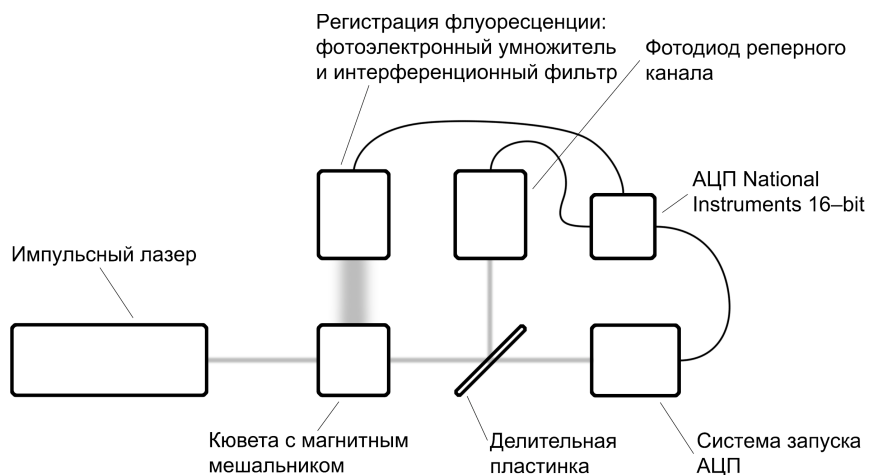


Рис. 1: Экспериментальная установка

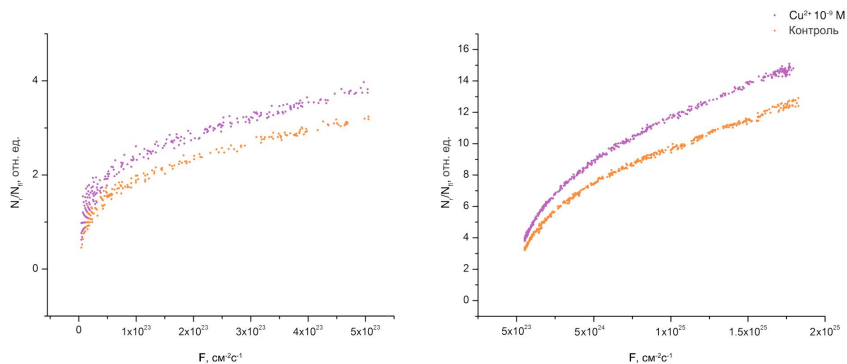


Рис. 2. Экспериментальные кривые для двух образцов, разделенные на два диапазона плотностей потока фотонов:  $F \approx 5 \cdot 10^{21} \sim 5 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  и  $F \approx 5 \cdot 10^{23} \sim 2 \cdot 10^{25} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Характерные экспериментальные кривые насыщения флуоресценции приведены на рис. 2.

Результаты определения фотофизических параметров из экспериментальных данных в ходе решения обратной задачи приведены в табл. 1.

Полученные результаты показывают, что фотофизические параметры молекул хлорофилла *a* зависят от физиологического состояния фитопланктона, и их изменение коррелирует с наличием различных загрязняющих веществ: присутствие ионов меди в воде, даже в столь низкой концентрации, заметно сказывается на величине скорости синглет-синглетной аннигиляции, но лишь немного меняет значения двух остальных параметров; диурон вызывает сильное изменение как времени жизни возбужденного состояния хлорофилла *a* (что является известным фактом, имеющим установившуюся трактовку), так и скорости синглет-синглетной аннигиляции. Исследование механизмов обнаруженного влияния металлов и гербицидов на скорость синглет-синглетной аннигиляции представляет интерес для биофизики фотосинтеза и важно для разработки научных основ метода биоиндикации.

Таблица 1. Экспериментально определенные значения параметров микроводоросли *Chlorella pyrenoidosa* в различных состояниях: нативный образец (контроль), в присутствии ионов меди  $\text{Cu}^{2+}$  и диурона (DCMU).

Образец	$\tau$ , нс	$\sigma$ , $10^{-16} \text{ cm}^2$	$\gamma_0$ , $10^{12} \text{ c}^{-1}$
Контроль	0,18	2,2	2,6
$\text{Cu}^{2+}$ , $10^{-9} \text{ M}$	0,21	2,1	1,6
DCMU, $10^{-7} \text{ M}$	0,46	1,8	0,8

Представлялось интересным сравнить чувствительности биоиндикации с использованием метода нелинейной лазерной флуориметрии и классического метода флуориметрии, в качестве которого мы выбрали метод Fluorescence Induction and Relaxation FIRE [3]. Этот метод является модификацией широко известного метода Fast Repetition Rate (FRR) [2, 4]. Метод FIRE основан на измерении флуоресцентного отклика, индуцированного последовательностью микросекундных возбуждающих вспышек света с прецизионно контролируемой интенсивностью, длительностью и интервалом между вспышками. Анализ флуоресцентного отклика позволяет определить набор фотосинтетических характеристик на уровне фотосистемы фотосистем: переменную флуоресценцию, сечение фотосистемы 2, времена миграции энергии между фотосистемой 1 и фотосистемой 2, константы нефотохимического тушения, скорость фотосинтеза. Эксперимент проводился на водоросли *Zooxanthellae* 2467, которая была выращена в инкубаторе при температуре 25 °С, условия освещенности соответствовали естественным. Добавление ионов меди к образцу (раствора  $\text{CuCl}_2$ ) происходило в концентрациях 12, 25, 50 и 300 мкм/л. Эксперимент длился в течении 10 дней. Каждые 2 дня каждый из 5 образцов (контроль и 4 образца с металлами разных концентраций) разбавлялся средой (f/2 - стандартная среда) в соотношении 1:1,

кроме того к 4 образцам с металлами добавлялось необходимое количество  $\text{CuCl}_2$ , с тем, чтобы поддерживать концентрацию металлов постоянной.

В результате эксперимента были исследованы зависимости фотофизических параметров ФС2, времени электронного транспорта, скорости фотосинтеза и роста водорослей. Оказалось, что даже при максимальной из использованных концентраций (300 мкм/л) влияние меди проявилось лишь через несколько суток. Первым параметром, изменяющимся под воздействие металлов, оказалось время электронного транспорта между ФС I и ФС II. Это, возможно, обусловлено тем, что металлы связываются с мембранными белками, нарушая при этом электронный транспорт. Следующими параметрами, которые ингибируются, стали рост и скорость фотосинтеза. И наконец, в последнюю очередь изменяется переменная флуоресценция, которая отображает, в общем, функциональное состояние реакционного центра. При минимальной концентрации (12 мкм/л) присутствие меди сказалось к исходу срока наблюдения лишь на одном параметре. Именно это значение концентрации мы приняли за порог обнаружения данным методом. Полученные результаты говорят о том, что присутствие металлов возможно определить с помощью метода FIRE и что минимальная концентрация, подлежащая определению этим методом лежит в пределах 12-25 мкм/л. Следовательно, чувствительность метода биоиндикации с использованием лазерной флуориметрии неизмеримо выше чувствительности метода FIRE.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана перспективность использования фитопланктона в качестве флуоресцентного биосенсора для определения присутствия в воде ионов тяжелых металлов и гербицидов в концентрациях ниже предельно допустимых, если информационными характеристиками являются молекулярные фотофизические параметры, определяемые методом лазерной флуориметрии. При этом возможна биоиндикация и в дистанционном режиме [6]. Следующим шагом на этом пути будет развитие матричного метода [7], совмещающего в себе методы нелинейной и кинетической флуориметрии. Непростой, но перспективной задачей будут поиски путей построения комплексного метода, сочетающего лазерную флуориметрию и FIRE. Здесь в первую очередь предстоит установить связь между параметрами, определяемыми каждым из этих методов, и на этой основе объяснить полученные в данной работе различия в чувствительности методов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 08-05-00892-а).

#### Литература

1. S. Mishra, S. Agrawal. Effects of supplemental ultraviolet-B and cadmium on growth, antioxidants and yield of *Pisum sativum* L. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2009, v. 72(2).
2. M. Lombardi, M. Lesser, M. Gorbunov. Fast repetition rate (FRR) fluorometry: variability of chlorophyll a fluorescence yields in colonies of the corals, *Montastraea faveolata* (w.) and *Diploria labyrinthiformes* (h.) recovering from bleaching, 2000, v. 252(1), pp. 75-84.
3. M. Gorbunov, P. Falkowski. Fluorescence Induction And Relaxation (Fire) Technique And Instrumentation For Monitoring Photosynthetic Processes And Primary

- Production In Aquatic Ecosystems. *Photosynthesis: Fundamental Aspects to Global Perspectives*, A. van der Est and D. Bruce Eds, 2005.
4. Z. Kolber, O. Prasil, P. Falkowski. Measurements of variable chlorophyll fluorescence using fast repetition rate techniques: defining methodology and experimental protocols. *Biochimica Biophysica Acta*, 1998, v. 1367, pp. 88-106.
  5. V. Fadeev, T. Dolenko, E. Filippova, V. Chubarov. Saturation spectroscopy as a method for determining the photophysical parameters of complicated organic compounds. *Optics Communications*, 1999, v. 166, pp. 25-33.
  6. V. Fadeev. Non-linear fluorimetry as diagnostics method for natural organic complexes. *EARSel Advances in Remote Sensing*, 1998, v. 5, pp. 96-103.
  7. V. Fadeev, T. Dolenko, A. Banishev, P. Litvinov, D. Maslov, E. Ostroumov. Matrix method in laser fluorimetry of organic compounds. *Proc. of SPIE, Opto Ireland, Optical Sensing and Spectroscopy*, 2005, v. 5826, pp. 44-55.
  8. Т. С. Гостев, Ф. И. Кузьминов, Е. Г. Максимов, В. З. Пашенко, В. В. Фадеев. Фитопланктон как флуоресцентный биоиндикатор качества природных вод. Сб.: *Физические проблемы экологии (экологическая физика)*, 2008, № 15, с. 102-113, М.: Макс Пресс.
  9. Д. В. Маслов, С. А. Буриков, П. Н. Литвинов. Трехпараметрическая модель формирования флуоресцентного отклика фитопланктона — шаг к созданию метода биоиндикации качества воды *in situ*. Сб.: *Физические проблемы экологии (экологическая физика)*, 2002, № 9, с. 169-179, М.: Изд. физического ф-та МГУ.
  10. D. Maslov, V. Fadeev, E. Ostroumov, S. Burikov. Non-linear fluorimetry for diagnostics of the phytoplankton. *EARSel e-Proceedings*, 2004, v. 3, № 3, pp. 306-315.

#### НЕЛИНЕЙНАЯ КИНЕТИКА ДЕСТРУКЦИИ

#### СТОЙКОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Долгоносов Б.М., Губернаторова Т.Н.

*Институт водных проблем РАН*

Разработана модель кинетики деструкции органического вещества с хаотической структурой макромолекул. Сформулированы основные положения модели и дано их физико-химическое обоснование. Изучены режимы деструкции, отвечающие разным распределениям макромолекул по размерам. Показано, что снижение концентрации органического углерода на асимптотической стадии процесса подчиняется степенному закону. Теоретические результаты применены к анализу данных по деструкции органического вещества в морских осадках и по разложению техногенного лигнина в водной среде.

#### Введение

Биодеструкция органического вещества занимает ведущее место среди факторов, регулирующих темп самоочищения водной среды и влияющих, через качество вод, на благополучие водных экосистем, их биоразнообразие и доступность для человека. Органическое вещество непрерывно распределено по реактивностям от лабильных фракций с временем распада порядка часов или суток

до стойких, например, лигнинов, распадающихся за время от нескольких лет до нескольких десятков лет, гумусовых веществ – от десятков лет до многих тысяч лет, вплоть до высококонденсированных керогенов с геологическими временами распада порядка сотен тысяч и миллионов лет. Время распада существенно зависит от природы молекул, их структуры и размеров. Стойкое органическое вещество состоит, как правило, из крупных макромолекул разных размеров, образованных из мономерных единиц в результате полимеризации или поликонденсации и обладающих хаотической дендроидной или поперечно сшитой структурой. Типичными веществами такого рода являются гидрофильные лигнины и гумусовые вещества, гидрофобные битумоиды и смолы. Остро стоит проблема техногенного загрязнения гидросферы органическими отходами производств, которые трудно подвергаются деструкции. Прежде всего, это относится к целлюлозно-бумажной промышленности с ее многотоннажными лигнинсодержащими отходами, загрязняющими гидросферу, литосферу и приземные слои атмосферы. Наряду с экологическими проблемами, деструкция органического вещества играет важную роль в планетарном цикле углерода, который протекает в своей значительной части в мировом океане и определяет параметры климата и состояние биосферы.

Ввиду многообразия органических веществ в водной среде, изучение деструкции целесообразно проводить на примере типичного представителя широкого класса соединений. Таким уникальным веществом является лигнин, который считается эталоном неупорядоченного биополимера. Широкая распространенность природного лигнина, который составляет до трети биомассы древесины, и экологическая опасность техногенного лигнина являются серьезными основаниями для изучения кинетики его деструкции.

### Методология моделирования

Для моделирования кинетики деструкции используется иерархическая декомпозиция задачи на три разномасштабных уровня, описываемых ниже.

1. Макроуровень – уровень цели. Органическое вещество рассматривается в целом, без разбиения на компоненты. Это диктуется практикой химического анализа, когда содержание органики в пробе определяется по углероду или по косвенным интегральным показателям типа цветности, перманганатной или бихроматной окисляемости, потерям при прокаливании (в осадке) и т.д. Поэтому и в теоретическом описании приходится использовать агрегированную величину  $C(t)$  – концентрацию органического углерода, изменяющуюся с течением времени  $t$ . Цель состоит в том, чтобы найти закон этого изменения. Для этого используется связь  $C(t) = n_1 \int_0^{\infty} n f(n,t) dn$  с плотностью распределения макромолекул по размерам  $f(n,t)$ , где  $n$  – число мономерных звеньев в составе макромолекулы,  $n_1$  – число атомов углерода в мономерном звене ( $n_1 = 9$  для лигнина). Функция  $f(n,t)$  находится из решения задачи на мезоуровне.

2. Мезоуровень – уровень кинетики. Здесь рассматривается кинетика изменения во времени плотности распределения макромолекул по размеру  $f(n,t)$ . Формулируются постулаты, в которых обобщаются закономерности деструкции, изучаемые на микроуровне. Из постулатов выводится кинетическое уравнение

типа  $\partial f(n,t) / \partial t = \Lambda f(n,t)$ , где  $\Lambda$  – некоторый дифференциальный оператор, определяемый из анализа механизмов деструкции на микроуровне.

3. Микроуровень – уровень механизмов. Здесь рассматриваются механизмы деструкции лигнина с участием молекул ферментов, кислорода, радикалов и т.д., учитывается структура макромолекул. Найденные закономерности деструкции обобщаются на класс неупорядоченных биополимеров. Эти сведения используются на мезоуровне для формулировки постулатов и построения модели кинетики.

При иерархическом моделировании постановка задач осуществляется сверху вниз, а их решение – в обратном направлении: от микроуровня, через мезо-, к макроуровню (рис. 1).

### Основные положения модели

Анализ строения и механизмов деструкции лигнина позволяет обобщить его свойства на класс биополимеров с хаотической структурой. В результате можно сформулировать тезисы, которые составят основу модели кинетики деструкции. Ниже приводятся формулировки тезисов, затем, в квадратных скобках, их использование при моделировании и, наконец, краткое физико-химическое обоснование.

1. Система состоит из ансамбля кластеров, погруженных в среду. Кластеры состоят из одинаковых мономеров. [Позволяет характеризовать кластеры только числом мономеров.] Кластеры = макромолекулы лигнины. Ансамбль кластеров в среде = совокупность макромолекул лигнина разных размеров и структуры в водной среде. Мономеры = фенилпропановые звенья. Химический состав кластеров однороден по объему, что объясняется преобладанием в лигнине структур гваяцилпропана (примерно 90% для хвойных лигнинов) и сирингилпропана, а в качестве концевых групп – метоксильных и гидроксильных групп.

2. Структура кластера – хаотическая дендроидная. Межмономерные связи одинаковы. [Следствия: 1) для отрыва фрагмента достаточно разорвать одну связь, 2) константа скорости деструкции зависит только от размера кластера, а не от типа разрываемой связи.] По современным представлениям лигнин имеет дендроидную структуру. Имеется небольшая примесь структурных элементов поперечной сшивки с образованием внутримолекулярных циклов, однако этот эффект незначителен. Каждый мономер может образовывать от одной до трех связей с соседями. Около трети мономеров в макромолекулах образуют одну связь, чуть больше половины – две и только около 10% – три связи. Различия в фенилпропановых звеньях, обусловленные разной степенью метоксилирования, существенно не влияют на типы межмономерных связей и их энергию. Фенилпропановые звенья в лигнине соединены более чем десятью типами связей, однако преобладают эфирные и алкиларильные связи с примерно одинаковой энергией около 80 ккал/моль. Сюда надо добавить энергию двух–трех водородных связей (это еще 10–15 ккал/моль), которые образуют фенилпропановые звенья со своим окружением. Небольшие различия в энергиях связей не изменяют качественной картины деструкции.

3. *Размеры кластеров намного превышают размеры мономеров.* [Позволяет перейти от дискретного описания к непрерывному.] Молекулярная масса фенилпропанового звена в зависимости от числа метоксильных групп составляет 150–210 Да, тогда как масса макромолекулы лигнина разного генезиса может достигать  $10^4$  Да, а в некоторых случаях даже  $10^5$ – $10^6$  Да. Соответственно, число звеньев может быть от нескольких десятков до нескольких тысяч. Что касается среднего диаметра макромолекул, речь может идти об интервале от нескольких десятков до нескольких сотен нанометров, тогда как размер фенилпропанового звена равен всего 1.2 нм (в направлении пропановой цепи).

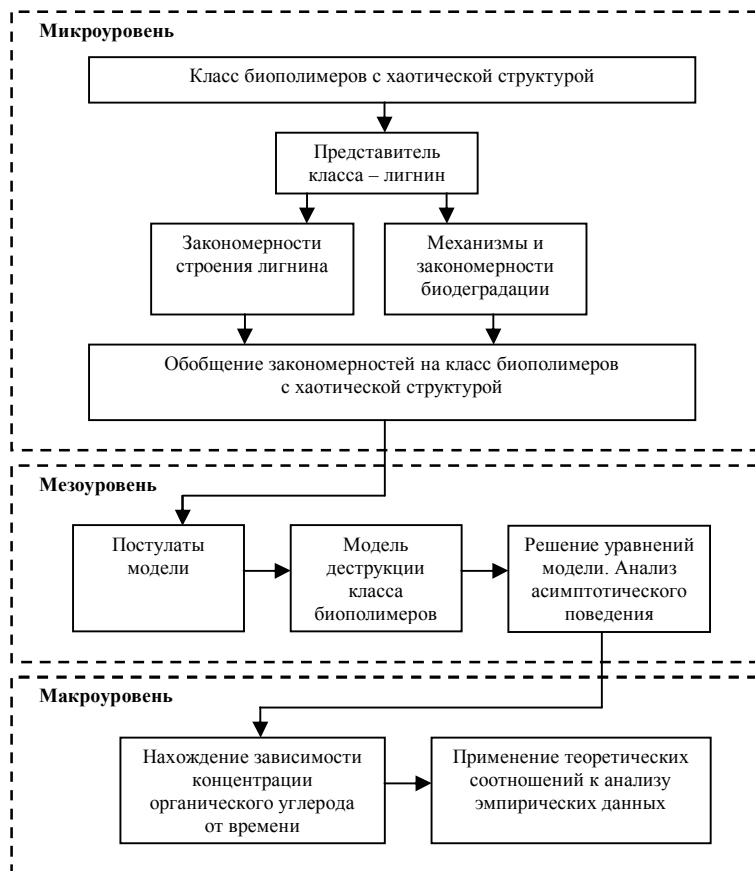


Рис. 1. Блок-схема иерархического моделирования деструкции органического вещества.

4. *Кластеры обладают свойствами случайного фрактала.* [Позволяет использовать фрактальные свойства объема и поверхности кластеров, в т.ч. фрактальные размерности, степенные зависимости от размера кластера.]

Фрактальные свойства обусловлены особенностями мономеров (высокой реакционной способностью феноксильных радикалов и их мезомерными свойствами) и способом формирования макромолекулы лигнина (режим диффузионно-контролируемой агрегации). Масса фрактального агрегата и площадь поверхности зависят от его размера по степенному закону. Показатель степени для массы = массовая фрактальная размерность (от 1 до 3)  $\approx 2.5$  при росте по механизму кластер-частица и  $\approx 1.8$  по механизму кластер-кластер. Показатель степени для поверхности = фрактальная размерность поверхности = 2–3. Фрактальные свойства – это проявление масштабной инвариантности структуры, но не строгое подобие, как для регулярных фракталов, а статистическое, свойственное случайным фракталам.

5. *Распад кластера происходит путем последовательного отрыва мономеров от его поверхности.* [Дает основание для представления деструкции макромолекулы в виде последовательности актов отрыва мономеров, из которого выводится кинетическое уравнение. Позволяет, используя механизмы деструкции, найти зависимость константы скорости деструкции от размера кластера.] Распад происходит при участии молекул ферментов, которые подходят к поверхности макромолекулы лигнина и внедряются в углубления рельефа, проявляя тем самым фрактальную структуру поверхности (учитывается, что молекулы ферментов на 1–2 порядка меньше по размеру, чем макромолекулы лигнина). Затем происходит перенос электрона из гемового кармана фермента к его поверхности, его передача (непосредственно или через диметоксифенильный медиатор) ближайшему фенилпропановому звену с последующей делокализацией электрона по всему звену и разрывом наиболее слабой связи. Из межмономерных связей наиболее слабы эфирные и алкиларильные связи, которые и окисляются в первую очередь. Присутствие кислорода в процессах ферментативного расщепления обязательно для образования пероксирадикалов. Кроме того, кислород предотвращает обратный процесс – рекомбинацию углеродных радикалов, образуемых при выбросе протона катионрадикалами. Перекисный механизм разложения лигнина приводит, через последовательность актов распада, к хаотическому разрыву многочисленных эфирных связей и глубокой фрагментации макромолекул. При изменении условий среды (рН,  $H_2O_2$ ) разложение лигнина не прекращается, но в ферментной системе гриба-деструктора лигнина происходит смещение активности от одного типа пероксидаз к другому. Разнообразие сосуществующих видов грибов-деструкторов и их ферментных систем позволяет поддерживать процесс деструкции лигнина при широком варьировании условий.

6. *Вероятность отрыва мономера не зависит от размера кластера.* [Обосновывает независимость энергии разрыва связи от размера кластера.] Вероятность отрыва зависит от энергии разрываемых связей. Согласно принципу Флори энергии связей в функциональных группах не зависят от размера макромолекул.

7. *Свободные мономеры, образующиеся в процессе распада кластеров, выводятся из системы.* [Позволяет считать, что мономеры, отделившиеся от кластера, сразу же минерализуются, поэтому их не надо учитывать при подсчете общего органического углерода: учитывается только тот углерод, который входит в состав макромолекул-кластеров.] Оторванные фрагменты макромолекул лигнина (моно- и олиголигнолы) вовлекаются в метаболизм микроорганизмов и быстро

минерализуются. Способностью расщеплять такие соединения с разрывом ароматического кольца обладают многие бактерии и грибы. Разрыв ароматического кольца осуществляют диоксигеназы. При этом в субстрат включается молекулярный кислород. Разрыв происходит либо между двумя соседними гидроксильными группами (орто-расщепление), либо между гидроксильрованным углеродом и соседним негидроксильрованным (мета-расщепление). Время расщепления и минерализации низкомолекулярных продуктов распада лигнина намного меньше времени деструкции макромолекул лигнина. Это дает основание для принятого в модели приближения.

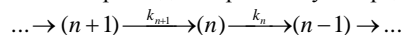
### Модель

Рассмотрим деструкцию органических макромолекул. Пусть  $n$  – размер макромолекулы (число мономерных звеньев). Деструкция сводится к последовательности элементарных актов распада – отрыву звена от поверхности. Вероятность акта распада зависит от двух факторов: 1) от вероятности адсорбции молекулы фермента поверхностью макромолекулы, где она сможет передать электрон ближайшему мономерному звену непосредственно или через медиатор; 2) от вероятности отщепления звена от каркаса макромолекулы. Согласно принципу Флори, вероятность отщепления не зависит от размера макромолекулы, однако вероятность адсорбции фермента существенно зависит от размера. Поэтому в целом частота распадов будет зависеть от  $n$ . Обозначим эту частоту  $k_n$ ; она представляет собой константу скорости реакции распада. Вероятность адсорбции фермента макромолекулой пропорциональна ее поверхности  $S$ , поэтому  $k_n \sim S$ . Т.к. макромолекула – фрактал, ее масса  $M$  и поверхность  $S$  выражаются через радиус  $R$  по соотношениям  $M \sim R^d$ ,  $S \sim R^D$ , где  $d$  и  $D$  – фрактальные размерности агрегата и его поверхности,  $1 \leq d \leq 3$ ,  $2 \leq D \leq 3$ . Так как масса пропорциональна  $n$ , то  $n \sim R^d$ . Следовательно,  $R \sim n^{1/d}$  и  $S \sim n^{D/d}$ . Отсюда

$$k_n = k(n) = k_1 n^\nu. \quad (1)$$

где  $\nu = D/d$  – фрактальный индекс макромолекулы,  $2/3 \leq \nu \leq 3$ .

Последовательность актов распада макромолекулы представим в виде схемы



Пусть  $N_n$  – числовая концентрация макромолекул размера  $n$ . В соответствии со схемой скорость изменения концентрации таких макромолекул равна

$$dN_n / dt = k_{n+1} N_{n+1} - k_n N_n.$$

Т.к.  $n \gg 1$ , переходим к непрерывному описанию, вводя вместо концентрации  $N_n(t)$  плотность распределения  $f(n, t)$ . Получим уравнение

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial k(n)f}{\partial n}. \quad (2)$$

При  $t=0$  задано начальное распределение макромолекул по размерам  $f = f_0(n)$ . Уравнение (2) с указанным начальным условием решается методом характеристик и приводит к следующему результату:

$$f = \left( \frac{z(n)}{n} \right)^\nu f_0(z(n)), \quad z(n) = \left( n^{1-\nu} + (1-\nu)k_1 t \right)^{1/(1-\nu)}, \quad \nu \neq 1, \quad (3)$$

$$f = e^{k_1 t} f_0(n e^{k_1 t}), \quad \nu = 1. \quad (4)$$

В (3) должно выполняться условие  $n^{1-\nu} + (1-\nu)k_1 t > 0$ , которое при  $\nu > 1$  ограничивает область изменения переменной:  $0 < n < z_t$ ,  $z_t = [(1-\nu)k_1 t]^{-1/(\nu-1)}$ ,  $\nu > 1$ .

Зная распределение (3)–(4), можно найти число мономерных звеньев в еще не распавшихся макромолекулах (в расчете на единицу объема системы):

$$c = \int_0^\infty n f(n) dn. \quad (5)$$

Концентрация органического углерода равна  $C = n_1 c$  (для лигнина  $C = 9c$ ).

### Деструкция вещества монодисперсного состава

Важным частным случаем является монодисперсное начальное распределение макромолекул по размеру. Это идеализация распространенной ситуации, когда в начале процесса имеется достаточно узкое распределение. В монодисперсном приближении  $f_0(n) = N_0 \delta(n - n_0)$ , где  $n_0$ ,  $N_0$  – средний размер и концентрация макромолекул. Подставляя в (3), получим следующее распределение:

$$f(n) = N_0 \delta(n - n_t), \quad n_t = \left( n_0^{1-\nu} - (1-\nu)k_1 t \right)^{1/(1-\nu)}, \quad \nu \neq 1.$$

Отсюда следует, что концентрация макромолекул  $N_0$  остается постоянной до тех пор, пока  $n_t$  не достигнет нуля. Тем временем, само распределение  $f(n)$  сдвигается в область малых размеров  $n$  по мере уменьшения  $n_t$ . Полученное распределение при подстановке (5) дает следующее выражение для концентрации:

$$c/c_0 = \left( 1 - (1-\nu)n_0^{\nu-1} k_1 t \right)^{1/(1-\nu)}, \quad \nu \neq 1; \quad c/c_0 = e^{-k_1 t}, \quad \nu = 1,$$

где  $c_0 = n_0 N_0$  – начальная концентрация структурных единиц. Дифференцируя по времени, после ряда преобразований получим уравнение

$$dc/dt = -k_\nu c^\nu, \quad (6)$$

справедливое при любых значениях  $\nu$ . Здесь введена результирующая константа скорости реакции  $k_\nu = k_1 (n_0/c_0)^{\nu-1} = k_1 N_0^{1-\nu}$ .

Рассмотрим характерные времена деструкции, протекающей по кинетике (6). Очевидно, значение  $\nu=1$  отвечает кинетике первого порядка  $dc/dt = -k_1 c$  с характерным временем деструкции  $T = 1/k_1$ . Если  $\nu \neq 1$ , можно ввести характерное время  $T$  и показатель  $\varepsilon$  по соотношениям

$$T = n_0^{1-\nu} \varepsilon / k_1, \quad \varepsilon = |1-\nu|^{-1}. \quad (7)$$

Время  $T$  имеет разный смысл в зависимости от того,  $\nu$  меньше или больше 1. При  $\nu < 1$  снижение концентрации органического углерода идет по закону  $c = c_0(1-t/T)^\varepsilon$ . В этом случае деструкция завершается за конечное время  $T$ .

При  $\nu > 1$  зависимость концентрации от времени такова:

$$c = c_0(1+t/T)^{-\varepsilon}. \quad (8)$$

Здесь время  $T$  характеризует уже не весь процесс, а только его начальную стадию. При  $t \gg T$  деструкция переходит в медленную асимптотическую стадию

$$c \approx c_0(t/T)^{-\varepsilon}, \quad (9)$$

протекающую по степенному закону, для которого вообще нет характерного масштаба времени. В связи с этой особенностью попытка ввести время полураспада не всегда удается. Действительно, время полураспада  $t_h$ , по определению, равно

$$t_h = \frac{1}{2c_0} \int_0^\infty c(t) dt. \quad (10)$$

Подставляя сюда (8), можно убедиться, что интеграл в (10) существует только при  $\varepsilon > 1$ , а так как  $\nu = 1 + \varepsilon^{-1}$ , то для существования интеграла должно быть  $1 < \nu < 2$ . В этом случае время полураспада имеет конечное значение, которое можно найти, вычисляя интеграл в (10):

$$t_h = \frac{T}{2(\varepsilon-1)} = \frac{1}{2(2-\nu)n_0^{\nu-1}k_1} \quad (1 < \nu < 2).$$

При  $\nu \rightarrow 2-0$  время полураспада  $t_h$  неограниченно растет, а при  $\nu \geq 2$  (или  $\varepsilon \leq 1$ ) интеграл в (10) вообще не существует. В этом случае процесс не имеет конечного времени полураспада (так же, как и времени распада в целом). Физическое объяснение этого феномена состоит в следующем. Условие  $\nu \geq 2$  приводит к  $2d \leq D \leq 3$ . Это возможно, если  $d \leq 3/2$ . Столь низкие значения фрактальной размерности означают, что структурный хаос в макромолекулах чрезвычайно высок (это возможно, например, при их формировании по механизму кластер-кластерной агрегации, который дает рыхлую структуру). Одновременно фрактальная размерность поверхности  $D$  должна быть достаточно близка к 3, что также говорит о ее высокой хаотичности. Следствием высоких значений фрактального индекса  $\nu \geq 2$  является, согласно (1), сильная зависимость частоты распадов от размера макромолекул (как  $n^\nu$ ), поэтому с уменьшением  $n$  частота распадов быстро убывает и деструкция сильно замедляется. В этом и состоит причина того, что время деструкции растягивается до бесконечности.

#### Деструкция вещества распределенного состава

Рассмотрим кинетику деструкции органического вещества с произвольным начальным распределением макромолекул по размерам. При  $\nu=1$  имеет тривиальную кинетику первого порядка. При  $\nu \neq 1$  из (3) и (5) находим

$$c = z_t \int_0^\infty \left[1 + (z_t/z)^{\nu-1}\right]^{-1/(\nu-1)} f_0(z) dz, \quad \nu > 1, \quad (11)$$

$$c = \int_{z_t}^\infty \left[1 - (z_t/z)^{\nu-1}\right]^{1/(1-\nu)} z f_0(z) dz, \quad \nu < 1, \quad (12)$$

где  $z_t = (1 - \nu|k_1 t|)^{1/(1-\nu)}$ . В случае  $\nu > 1$  при  $t \rightarrow \infty$  имеем  $z_t \rightarrow 0$ , и из (11) следует асимптотическое равенство  $c \approx N_0 z_t = c_0(t/T)^{-\varepsilon}$ , которое совпадает с (9).

В случае  $\nu < 1$  также возможна степенная асимптотика. Для этого начальное распределение должно иметь достаточно быстро спадающий степенной хвост:  $f_0(n) \sim n^{-\lambda}$  при  $n \rightarrow \infty$ , причем  $\lambda > 2$ . Тогда при  $t \rightarrow \infty$  имеем  $z_t \rightarrow \infty$  и из (12) найдем

$$c \sim z_t^{-\lambda+2} \sim (k_1 t)^{-b}, \quad b = \varepsilon(\lambda - 2)$$

(такую зависимость от  $z_t$  можно получить, сделав в (12) замену переменной интегрирования  $z = xz_t$ ). Условие  $\lambda > 2$  обеспечивает существование нулевого и первого моментов начального распределения, т.е. конечность концентрации макромолекул  $N_0$  и концентрации органического углерода  $c_0$  в исходной системе. В [1] показано, что появление степенного хвоста распределения объясняется особенностями коагуляционных механизмов формирования макромолекул; при этом условие  $\lambda > 2$  выполняется автоматически.

#### Органическое вещество в морских осадках

В [2] приводятся собранные из разных литературных источников данные по распаду органического вещества в морских осадках и в лабораторных экспериментах, которые охватывают широкий временной интервал: от нескольких часов до почти миллиона лет. Для описания данных, в цитируемой работе была предложена модель кинетики квазипервого порядка  $dc/dt = -k(t)c$ , отличительной особенностью которой является зависимость «константы» скорости распада от времени, которая была взята в виде  $k(t) \sim t^{-a}$ , причем наилучшее согласие с данными было достигнуто при  $a = 0.95$ . Поскольку  $a \neq 1$ , кинетика распада имеет вид  $c \sim \exp(-kt^{1-a})$ , причем  $k > 0$  при  $a < 1$  и, наоборот,  $k < 0$  при  $a > 1$ . Между тем, развитый выше теоретический подход дает принципиально иную, степенную, зависимость в асимптотическом пределе

$$c \sim t^{-b}, \quad \begin{cases} b = \varepsilon, & \nu > 1, \\ b = \varepsilon(\lambda - 2), & \nu < 1, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\varepsilon$  задается выражением (7). Наилучшее согласие с данными измерений достигается при  $b = 0.14$ . На рассматриваемом в [2] временном интервале оба подхода одинаково успешно описывают данные измерений, однако наличие физического обоснования для теоретического подхода – важное свидетельство в его пользу.

Отметим, что в одном частном случае кинетика квазипервого порядка также приводит к степенной зависимости от времени. Это имеет место при  $k(t) \sim t^{-1}$ , т.е. когда  $a = 1$ , что довольно близко к указанному выше значению  $a = 0.95$ .

Будро и Рудик [3] обработали данные разных авторов по профилям органического вещества в толще морских седиментов на основе зависимости типа (8). Некоторые из найденных оценок модельных параметров представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметров зависимости (8) для органического вещества в морских седиментах (по данным [3]);  $R$  – коэффициент корреляции

Местоположение	$\varepsilon$	$T$ , лет	$R$	Ссылки
Central Equatorial Pacific, core 10127	0.139	14000	0.926	[4]
same, core 10141&2	0.193	10184	0.935	[4]
Long Island Sound, site FOAM	0.152	4.2	0.930	[5]
Santa Cruz Basin, core SCR-44	0.202	70.4	0.929	[6]
Peru Margin, core BX-6	0.278	22.5	0.929	[7]
same, core 7706-41K	0.910	141.3	0.974	[8]
same, core 7706-36	0.804	231.7	0.978	[9]
North Philippine Sea, core DSDP 58	1.080	20224	0.917	[10]

Время распада лабильной фракции  $T$  сильно варьирует, видимо, вследствие различия скоростей осадконакопления  $V$ , значения которых приведены в [3]. Чем больше  $V$ , тем больше количество свежего органического материала попадает в седименты, а значит, тем меньше должно быть время  $T$  в соответствии с зависимостью  $T = H/V$ , где  $H$  – эффективная толщина слоя, в котором распадается лабильная фракция. Обработка данных дает  $H = 7.5$  см.

Следует отметить две группы седиментов, для одной из которых (5 образцов седиментов) показатель степени  $\varepsilon$  находится в интервале 0.14–0.28, а для другой (3 образца) – в интервале 0.8–1.1. Интерпретация этих результатов различается при  $\nu > 1$  и  $\nu < 1$ . Положим сначала  $\nu > 1$ . Если  $\varepsilon$  находится в интервале 0.8–1.1, то фрактальный индекс макромолекул  $\nu = 1 + \varepsilon^{-1}$  варьирует в интервале 1.9–2.2, удовлетворяя теоретическому ограничению  $\nu \leq 3$ .

В другом интервале  $\varepsilon = 0.14$ –0.28 получаем  $\nu = 4.6$ –8.1. Но это противоречит ограничению  $\nu \leq 3$ . Следовательно, в данном случае предположение  $\nu > 1$  приводит к противоречию, значит должно выполняться альтернативное неравенство  $\nu < 1$ . В этом случае надо использовать асимптотику (13), где участвует показатель  $b$  (вместо  $\varepsilon$ ) и именно он теперь варьирует в интервале 0.14–0.28. Зная  $b$ , найдем  $\lambda = 2 + b(1 - \nu)$ . Так как  $\nu < 1$  и  $b > 0$ , то  $\lambda > 2$ . Рассмотрим конкретное значение  $b$ , например  $b = 0.14$ . Учитывая ограничение снизу  $\nu \geq 2/3$ , приходим к выводу, что параметр  $\lambda$  может изменяться в очень узком интервале  $2 < \lambda < 2.05$ .

Рассмотрим причины, которые могут приводить к  $\nu < 1$ . Прежде всего, отметим, что фрактальная размерность поверхности зависит от масштаба, которым эту поверхность измеряют. Чем больше масштаб, тем сильнее сглаживается

неоднородность поверхности, а ее фрактальный размер  $D$  приближается к 2. В случае ферментативной деструкции в качестве масштабной единицы выступает молекула фермента, достаточно крупная по сравнению с размером неоднородностей рельефа на поверхности макромолекулы (хотя и малая по сравнению с размером самой макромолекулы). Поэтому следует ожидать, что измеряемая этим масштабом фрактальная размерность поверхности макромолекулы будет достаточно близка к 2. Что касается фрактальной размерности  $d$  объема органической макромолекулы, то она зависит от механизма ее формирования:  $d$  меньше 2 при кластер-кластерной агрегации, но больше 2 при агрегации частица-кластер. Отсюда можно сделать заключение относительно фрактального индекса  $\nu$  макромолекулы: он будет больше 1 при кластер-кластерной агрегации, но меньше или близок к 1 при агрегации частица-кластер. Важно учитывать также возможность внутренней перестройки в макромолекуле, обусловленной переориентацией структурных элементов и образованием новых связей. В процессе такого созревания структура макромолекулы становится все более плотной, что отразится на ее фрактальной размерности  $d$ : она будет увеличиваться, приближаясь к размерности физического пространства, равной 3. Из сказанного следует, что в достаточно долго созревающей системе (например, это относится к органическому веществу в водной толще и донных отложениях Мирового океана) фрактальный индекс органических макромолекул будет стремиться к  $\nu = 2/3$ .

#### Сульфатные лигнины

В [11] приводятся результаты экспериментальных исследований по деструкции сульфатных лигнинов, выделенных из сточных вод предприятий целлюлозно-бумажной промышленности Восточной Сибири. Измерения проводились на воде оз. Байкал и р. Ангара, в которую вводили раствор лигнина заданной концентрации. Параллельно изучалась комбинированная система вода–донные отложения. Эксперимент длился 20 мес. Раз в месяц определяли содержание лигнина (оптическими методами), химическое потребление кислорода (ХПК), цветность и др. Полученные данные были обработаны нами по формуле (8). По результатам (табл. 2) можно сделать следующие выводы:

1. По содержанию лигнина: в трех случаях из четырех  $\varepsilon$  и  $T \rightarrow \infty$ , хотя их отношение конечно. В этих случаях содержание лигнина изменяется по закону  $\exp(-kt)$ , где  $k = \varepsilon/T$ . В одном случае распад отличается от экспоненциального и характеризуется  $\varepsilon < 1$ . Причина таких расхождений заключается в разном химическом составе лигнинов и в разной структуре сообщества микроорганизмов.

2. По ХПК и цветности: изменение показателей качества воды во всех случаях хорошо описывается уравнением (8) с конечными значениями параметров  $\varepsilon$  и  $T$ . Осредненные для этих двух показателей значения параметров приведены в табл. 3. В системе вода–донные отложения показатель  $\varepsilon$  больше, чем без донных отложений, что свидетельствует о переработке части примеси в слое осадка. При  $\varepsilon < 1$  распад длится намного дольше, чем начальная стадия процесса (составляющая ~100 сут). Для системы байкальская вода–донные отложения  $\varepsilon > 1$ ; распад характеризуется временем ~280 сут.

Порядок реакции  $\nu$  в соответствии с табл. 2 находится в пределах 1–3.7. Во всех случаях уравнение (8) можно использовать для описания кинетики распада лигнинов, о чем свидетельствует небольшой разброс экспериментальных точек относительной теоретической кривой (стандартное отклонение 2–5%). Однако порядок реакции  $\nu$ , найденный по измерениям содержания лигнина, не согласуется с таковым для цветности и ХПК. Видимо, это связано с косвенным определением содержания лигнина (оптическими методами). Измеряемая оптическая плотность – интегральный показатель, одному и тому же значению которого могут соответствовать разные распределения компонентов, что может служить причиной отмеченного расхождения.

Таблица 2. Значения параметров кинетики распада лигнинов (8) для показателей качества воды (содержания лигнина, ХПК, цветности из р. Ангара и оз. Байкал). Использованы данные [11];  $\sigma$  – стандартное отклонение экспериментальных данных от расчетной кривой, % начального значения показателя; значение  $\nu$  вычислялось по формуле  $\nu = 1 + \varepsilon^{-1}$

Параметр	Вода			Вода–донные отложения		
	содержание лигнина	ХПК	цветность	содержание лигнина	ХПК	цветность
р. Ангара						
$T$ , сут	$T/\varepsilon = 590^*$	150	130	$T/\varepsilon = 290^*$	110	85
$\varepsilon$	$\infty$	0.37	0.44	$\infty$	0.92	0.94
$\nu$	1	3.7	3.3	1	2.1	2.1
$\sigma$ , %	2.2	3.2	2.9	4.7	4.8	3.5
оз. Байкал						
$T$ , сут	210	100	55	$T/\varepsilon = 230^*$	270	290
$\varepsilon$	0.75	0.43	0.53	$\infty$	2.1	1.9
$\nu$	2.3	3.4	2.9	1	1.5	1.5
$\sigma$ , %	2.2	3.8	2.3	3.8	4.7	2.8

\*  $\varepsilon$  и  $T \rightarrow \infty$ .

Таблица 3. Осредненные значения параметров модели (среднее  $\pm$  стандартное отклонение) (ДО – донные отложения)

Среда	$\nu$	$\varepsilon$	$T$
Р. Ангара, вода	$3.5 \pm 0.2$	$0.40 \pm 0.03$	$140 \pm 10$
Р. Ангара, вода–ДО	2.1	$0.93 \pm 0.01$	$100 \pm 10$
Оз. Байкал, вода	$3.2 \pm 0.2$	$0.48 \pm 0.05$	$80 \pm 20$
Оз. Байкал, вода–ДО	1.5	$2.0 \pm 0.1$	$280 \pm 10$

### Заключение

Обобщение свойств лигнина позволило сформулировать базовые положения для моделирования кинетики деструкции. Получено кинетическое уравнение деструкции, которое исследовано при разных начальных распределениях макромолекул. При монодисперсном распределении деструкция описывается нелинейным кинетическим уравнением, порядок которого равен фрактальному индексу макромолекул. При полидисперсном составе на кинетику деструкции

влияет не только фрактальная структура макромолекул, но и асимптотика начального распределения по размерам, формируемого при участии коагуляционных механизмов.

Проведен анализ литературных данных по деструкции органического вещества в морских донных отложениях и в лабораторных экспериментах по распаду техногенного лигнина. Теоретические зависимости адекватно описывают эмпирическую кинетику деструкции. Данные по седиментам охватывают исключительно широкий временной интервал: от нескольких часов до миллиона лет, и показывают, что концентрация убывает со временем по степенному закону с показателем степени 0.14. Выявлены два интервала изменения показателя степени: 0.14–0.28 и 0.8–1.1. Анализ данных для сульфатного лигнина дает показатель степени 0.4–0.5 при деструкции в толще воды и 1–2 при деструкции в воде в присутствии донных отложений.

### Литература

1. Долгоносов Б.М., Губернаторова Т.Н. Кинетика ферментативной деструкции органических макромолекул с фрактальной структурой // Теоретические основы химической технологии. 2007. Т. 41. № 6. С. 671–680.
2. Middelburg J.J. A simple rate model for organic matter decomposition in marine sediments // Geochim. Cosmochim. Acta. 1989. V. 53. P. 1577–1581.
3. Boudreau B.P., Ruddick B.R. On a reactive continuum representation of organic matter diagenesis // American Journal of Science. 1991. V. 291. P. 507–538.
4. Müller P.J., Mangini A. Organic carbon decomposition rates in sediments of the Pacific manganese nodule belt dated by  $^{230}\text{Th}$  and  $^{231}\text{Pa}$  // Earth and Planetary Science Letters. 1980. V. 51. P. 94–114.
5. Goldhaber M.B., Aller R.C., Cochran J.K., Rosenfeld J.K., Martens C.S., Berner R.A. Sulfate reduction, diffusion, and bioturbation in Long Island Sound sediments: report of the FOAM Group // American Journal of Science. 1977. V. 277. P. 193–237.
6. Shaw T.J. The early diagenesis of transition metals in nearshore sediments. Ph. D. dissertation. San Diego: University of California, 1988. 164 p.
7. Froelich P.N., Arthur M.A., Burnett W.C., et al. Early diagenesis of organic matter in the Peru continental margin sediments: phosphorite precipitation // Marine Geology. 1988. V. 80. P. 309–343.
8. Reimers C.E. Organic matter in anoxic sediments on Central Peru: relations of porosity, microbial decomposition and deformation properties // Marine Geology. 1982. V. 46. P. 175–197.
9. Reimers C.E., Suess E. The partitioning of organic carbon fluxes and sedimentary organic matter decomposition rates in the ocean // Marine Chemistry. 1983. V. 13. P. 141–168.
10. Westrich J.T. The consequences and controls of bacterial sulfate reduction in marine sediments. Ph.D. dissertation. New Haven, CT: Yale University, 1983. 530 p.
11. Тимофеева С.С., Бейм А.М. Закономерности трансформации лигниновых веществ в воде водоемов Восточной Сибири // Вод. ресурсы. 1990. № 2. С. 115–120.



## ВОДООБМЕН ЧЕРЕЗ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНЫМИ ЭКОНОМИЧЕСКИМИ ЗОНАМИ ГОСУДАРСТВ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Есюкова Е. Е., Чубаренко Б. В.

*Атлантическое отделение института океанологии им. П. П. Ширшова*

*РАН, Лаборатория прибрежных систем*

В работе методом численного моделирования проведены оценки интегральных значений переноса вод через границы ИЭЗ государств в Балтийском море. Величины результирующего среднегодового удельного горизонтального расхода вод через границы между ИЭЗ находятся в диапазоне 0.3-28.3 км<sup>3</sup>/год/км. Наибольшие вариации результирующего переноса вод от сезона к сезону (в 3-5 раз) установлены в юго-восточной части Балтийского моря, вдоль основной оси моря, а наименьшие вариации (в 1.5-2 раза) – в заливах и поперёк основной оси моря. Наибольший абсолютный результирующий среднегодовой трансграничный перенос вод наблюдается из ИЭЗ Польши в ИЭЗ России (Калининградская область) – около 1600 км<sup>3</sup>/год. Трансграничный перенос в Балтике (через границы ИЭЗ) по объёмам сравним и превосходит среднегодовой речной сток в Балтику. Перенос вод в Балтийском море наиболее интенсивно происходит в юго-восточной и центральной Балтике. В результирующем трансграничном переносе вод в этих районах прослеживается общее циклоническое направление.

### Введение

В 1974 г. в Хельсинки семь прибалтийских стран заключили «Конвенцию по охране морской среды Балтики» (Helsinki Convention) и создали международную Хельсинкскую комиссию (ХЕЛКОМ) по претворению этой конвенции в жизнь. В 1992 г. была подписана новая Хельсинкская конвенция, пересмотренная в связи с произошедшими в регионе политическими, экономическими и другими изменениями, и были введены принципы превентивности и «загрязнитель платит» /1/. В 2003 году /2/ официально был принят подход, согласно которому передовая научная информация должна использоваться как база для работы ХЕЛКОМ по выработке планов улучшения состояния моря, восстановления и охраны его экосистемы. Наиболее значимым результатом этого подхода было использование модели MARE NEST /3-5/ для обоснования величины уменьшения нагрузки по биогенным элементам для принятого в настоящее время (15.11.2007) «Плана действий ХЕЛКОМ по Балтийскому морю».

Исключительная экономическая зона (ИЭЗ) – это 200-мильная морская зона вдоль побережья страны, все права на экономическое использование которой принадлежат этой стране, но по которой (в отличие от 12-мильной зоны территориальных вод) разрешен беспрепятственный проход судов других стран /6-8/. Ни одно из девяти государств, имеющих непосредственный выход к

Балтийскому морю (Германия, Дания, Латвия, Литва, Польша, Россия, Финляндия, Швеция, Эстония) не может реализовать свое исключительное право на 200-мильную ИЭЗ, т.к. размер моря мал, и, поэтому акватория Балтики полностью поделена между ИЭЗ этих государств. Таким образом, наряду с общепринятым на Балтике границами внутренних бассейнов /9/ границы исключительных экономических зон обеспечивают условное, но важное с точки зрения управления человеческой деятельностью, разделение водного объема моря на части.

Задачи данного исследования – методом численного моделирования дать количественные оценки величин и направления трансграничного переноса вод между ИЭЗ разных стран, установить наиболее активные транзитные зоны в Балтийском море, интегрально оценить водообмен между этим зонами в пределах естественного бассейнового деления Балтийского моря.

Ранее таких исследований не проводилось.

### Численная модель и ее верификация по водному балансу

Для расчета динамики вод Балтийского моря в работе использована реализация трёхмерной негидростатической численной модели MIKE3-FlowModel (DHI Water & Environment, /10/). Размер прямоугольной расчетной сетки с ячейками 5 км × 5 км по горизонтали составил 152×306 ячеек. По вертикали использована аппроксимация с равномерным шагом 4 м (92 слоя). Временной шаг интегрирования составлял 90 сек. Структура глубин задана исходя из наиболее часто используемых для Балтики данных Института Балтийского моря (Варнемюнде, Германия) /11/.

Расчет проводился для двух модельных годов, повторяющих друг друга по условиям: первый год – установление модели, второй год – определение потоков между зонами Балтийского моря. Начальные поля солёности и температуры задавались исходя из среднепогодных данных (1900-1996 гг.) /12/. Для задания граничных условий для температуры воздуха и облачности над поверхностью моря использовались среднепогодные данные (за 1946-1985, 1964-1978, 1957-1986, 1970-1974 гг.) /13/. Поле ветра задавалось однородным над всей акваторией Балтики, но его изменения по времени соответствовали реальным ежедневным данным о ветре в центральной части Балтики, на острове Готланд (ст. Висбю, 2007 г.) /12/. Речной сток (среднемесячные данные, 21 речка) задавался по данным (1812-1988 гг.) /12/, /15/, /16/. На открытой границе, помещённой в Северном Каттегате, поле солёности и температуры задавалось по среднепогодным данным (1900-1996 гг.) /12/.

В ходе калибровки модели /17/ найдены подходящие значения коэффициентов горизонтального и вертикального турбулентного обмена, трения ветра, трения о дно. Верификация модели на независимых данных (среднепогодная годовая динамика вертикального профиля температуры воды в Готландской и Борнхольмской впадине; распределения средних месячных температуры и солёности воды на поверхности для каждого месяца; структура поверхностных течений Балтийского моря /13/, /15/, /16/, /22/, /23/; водный баланс отдельных частей моря, а также результаты численного моделирования других авторов /9/, /11/, /12/, /13/, /15/, /16/, /19/, /20/, /21/, /22/, /23/, /24/, показала, что модель в целом хорошо воспроизводит средний сезонный ход горизонтальных полей температуры и солёности в Балтийском море; все особенности сезонной

динамики вертикального профиля температуры воды; появление и глубины залегания ядра холодного промежуточного слоя (ХПС); пространственное распределение среднемесячной и среднегодовой температуры воды на поверхности; распределение средней месячной солености воды на поверхности; общую схему циркуляции поверхностных вод в Балтике.

Основным элементом верификации модели было сравнение результатов численного моделирования водообмена для отдельных бассейнов Балтики с известными данными /9/, /16/ (рис. 1,2).

По данным о трехмерном поле течений (временные серии с шагом 90 с в течение года) определялась величина горизонтального объёмного расхода поперек вертикальных сечений, располагавшихся на известных границах суб-бассейнов Балтийского моря /17/. Эти сечения захватывали всю глубину водоёма от поверхности до дна, без деления на слои.

Сравнение показало, что модель в целом настроена на центральный бассейн Балтийского моря. Максимальные отклонения в величинах годового обмена наблюдаются в нецентральных районах - до 25% для Ботнического залива и до 50% для Датских проливов и могут объясняться тем, что в проделанном нами расчете использовались данные о ветре для одного конкретного года, в то время как остальные данные соответствовали среднегодовым условиям. Для Ботнического залива - Ботнического моря расчеты показали среднегодовые объемы водообмена  $608-520=88 \text{ км}^3/\text{год}$  против  $280-176=104 \text{ км}^3/\text{год}$  по известным данным (рис. 1), для Ботнического моря – центрального бассейна Балтийского моря -  $1061-909=152 \text{ км}^3/\text{год}$  против  $1400-1191=209 \text{ км}^3/\text{год}$ , для Финского залива – центрального бассейна Балтийского моря - хорошее совпадение ( $657-538=119 \text{ км}^3/\text{год}$  против  $554-435=119 \text{ км}^3/\text{год}$  (рис. 2)), для Рижского залива – центрального бассейна Балтийского моря - удовлетворительное совпадение ( $306-284=22 \text{ км}^3/\text{год}$  против  $171-133=38 \text{ км}^3/\text{год}$  (рис. 2)). Для Датских проливов ( $597-365=232 \text{ км}^3/\text{год}$  против  $950-475=475 \text{ км}^3/\text{год}$  (рис. 1) и  $1356-841=515 \text{ км}^3/\text{год}$  (рис. 2)) водообмен в модели оказался несколько заниженным.

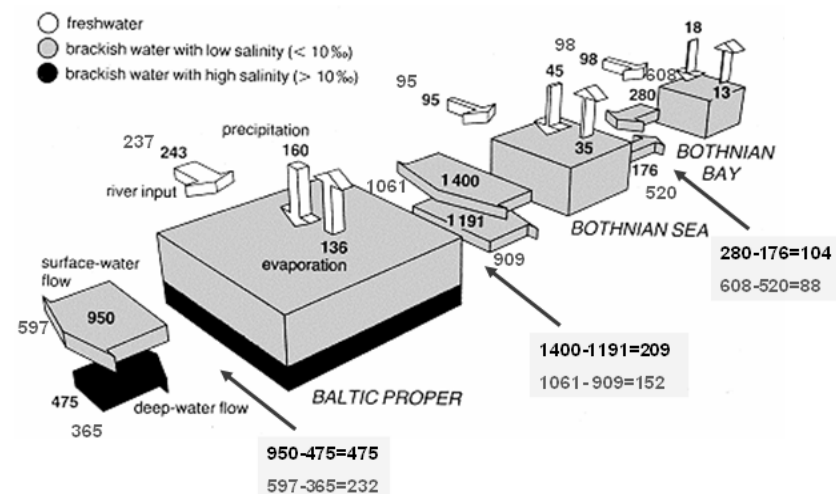


Рис. 1. Водные потоки (в  $\text{км}^3/\text{год}$ ) между отдельными бассейнами Балтийского моря /16/ (черный цвет) и результаты численного моделирования на базе МИКЕЗ (светлые цифры).

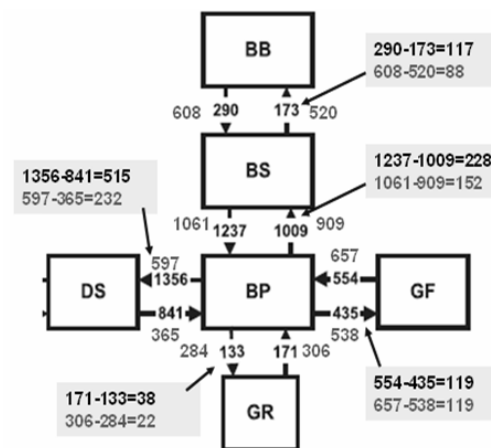


Рис. 2. Водные потоки (в  $\text{км}^3/\text{год}$ ) между отдельными бассейнами Балтийского моря 1991-1999 гг. /9/ (черный цвет) и результаты численного моделирования на базе МИКЕЗ (светлые цифры). Введены следующие обозначения: BB – Ботнический залив, BS - Ботническое море, BP - собственно Балтийское море, GF - Финский залив, GR - Рижский залив, DS - Датские проливы.



Рис. 3. Исключительные экономические зоны Балтийского моря (Мультимедийный атлас «Индикаторы безопасности морской среды Балтийского моря, 2008) /25/.

#### Расход вод через границы между исключительными экономическими зонами и суб-бассейнами

При проведении расчета течений для второго модельного года в каждый момент времени проводился подсчет значений расходов через заданные вертикальные сечения вдоль границ между ИЭЗ и суб-бассейнами. Суммарные величины расходов через границы СЭЗ представлены в таблице 1. Но, поскольку линии СЭЗ пересекают границы между суб-бассейнами, то последние делят их на естественные сегменты. В таблице 2 представлены расходы через такие сегменты границ СЭЗ, принадлежащие разным суб-бассейнам. Наглядное представление величин средних за год расходов через сегменты ИЭЗ в разных частях Балтийского моря дают схемы на рис. 4, 5, 6, 7, 8).

Годовой расход через границы исключительных экономических зон сравним и, нередко, превышает (иногда в разы) годовой сток рек в Балтийское море. Например, ИЭЗ России (Калининградская область) «получает» из ИЭЗ Польши ~1900 км<sup>3</sup>/год («отдаёт» ИЭЗ Польши ~300 км<sup>3</sup>/год), передавая при этом ~1700 км<sup>3</sup>/год в ИЭЗ Литвы («получает» из ИЭЗ Литвы ~200 км<sup>3</sup>/год). В свою очередь ИЭЗ Литвы «получает» из ИЭЗ России ~1700 км<sup>3</sup>/год («отдаёт» России ~200 км<sup>3</sup>/год), «передает» ИЭЗ Латвии ~1450 км<sup>3</sup>/год («получает» из ИЭЗ Латвии ~300 км<sup>3</sup>/год) и т.д. (рис. 8, таблица 1). В то же время суммарный годовой сток рек в Балтийское море составляет ~450 км<sup>3</sup>/год /13/, /15/.

Таким образом, в Балтийском море существует интенсивный горизонтальный водообмен между районами Юго-восточной и Центральной Балтики, что выражается в более однородных условиях в этой части моря, и, безусловно, накладывает особые требования к сохранению качества воды в этих зонах, т.к. любое локальное загрязнение будет довольно быстро распространяться.

Для отдельных районов Балтийского моря существуют направления преимущественного переноса вод. Например, из польской в российскую (Калининградская область) ИЭЗ, из российской в литовскую, из литовской в латышскую ИЭЗ и т.д.

Проведённый анализ величин расходов вод через сегменты границ между ИЭЗ в различных суб-бассейнах (Ботнический, Финский, Рижский заливы, открытая часть Балтийского моря) показал, что для всех ИЭЗ расходы через сегменты их границ, находящиеся в открытой части Балтийского моря, больше в несколько раз, чем расходы через соответствующие сегменты в заливах (таблица 2). А, поскольку, суб-бассейновые сегменты границ ИЭЗ имеют разную длину, то оптимально проводить сравнение по удельным расходам. Оказалось, что удельные расходы через границы между ИЭЗ в Ботническом заливе составляют 1.0 - 1.2 км<sup>3</sup>/год/км, в Финском – 0.7 - 0.9 км<sup>3</sup>/год/км, в Рижском – 0.3 - 0.4 км<sup>3</sup>/год/км, что примерно на порядок меньше, чем в открытой части Балтики (5- 12 км<sup>3</sup>/год/км.). Эта оценка хорошо согласуется со схемой районирования Балтийского моря по величине удельных расходов через сечения по основным геоморфологическим особенностям поля глубин Балтийского моря /17/, /18/.

Таблица 1.  
Среднегодовые расходы через границы исключительных экономических зон.

ИЭЗ	расход, км <sup>3</sup> /год	ИЭЗ	расход, км <sup>3</sup> /год
из Финляндии в Россию (СПб)	214	из Латвии в Швецию	1923
из Швеции в Эстонию	797	из Латвии в Литву	302
из Швеции в Латвию	522	из Литвы в Латвию	1446
из Швеции в Литву	56	из Литвы в Швецию	294
из Швеции в Россию (К-д)	115	из Литвы в Россию (К-д)	234
из Швеции в Польшу	1089	из Польши в Россию (К-д)	1862
из Швеции в Германию	573	из Польши в Швецию	194
из Швеции в Данию	961	из Польши в Данию	180
из Эстонии в Россию (СПб)	195	из Польши в Германию	465
из Эстонии в Швецию	784	из Дании в Польшу	1108
из России (СПб) в Финляндию	186	из Дании в Германию	208
из России (СПб) в Эстонию	218	из Дании в Швецию	205

ИЭЗ	расход, км <sup>3</sup> /год	ИЭЗ	расход, км <sup>3</sup> /год
из России (К-д) в Литву	1670	из Германии в Польшу	356
из России (К-д) в Швецию	265	из Германии в Данию	749
из России (К-д) в Польшу	273	из Германии в Швецию	454



Рис. 4. Среднегодовые расходы через границы исключительных экономических зон в районе Ботнического залива.



Рис. 5. Среднегодовые расходы через границы исключительных экономических зон в районе Финского залива.

Таблица 2.

Среднегодовые расходы через сегменты границ исключительных экономических зон по суб-бассейнам и границы между суб-бассейнами.

Границы	Обозначение на рисунках	расход, км <sup>3</sup> /год
из Финляндии в Швецию (Ботнический залив)	(AB)	312
из Швеции в Финляндию (Ботнический залив)	(AB)	369
из Финляндии в Швецию (Балтийское море)	(BN)	1162
из Швеции в Финляндию (Балтийское море)	(BN)	847
из Эстонии в Финляндию (Финский залив)	(KF)	167
из Финляндии в Эстонию (Финский залив)	(KF)	123
из Эстонии в Финляндию (Балтийское море)	(FN)	872
из Финляндии в Эстонию (Балтийское море)	(FN)	709

Границы	Обозначение на рисунках	расход, км <sup>3</sup> /год
из Латвии в Эстонию (Рижский залив)	(PR)	86
из Эстонии в Латвию (Рижский залив)	(PR)	69
из Латвии в Эстонию (Балтийское море)	(OM)	1281
из Эстонии в Латвию (Балтийское море)	(OM)	1230
из Ботнического залива в Балтийское море (Швеция)	(CB)	457
из Балтийского моря в Ботнический залив (Швеция)	(CB)	399
из Ботнического залива в Балтийское море (Финляндия)	(BD)	722
из Балтийского моря в Ботнический залив (Финляндия)	(BD)	612
из Ботнического залива в Балтийское море (всё сечение)	(CD)	1179
из Балтийского моря в Ботнический залив (всё сечение)	(CD)	1011
из Финского залива в Балтийское море (Финляндия)	(DF)	340
из Балтийского моря в Финский залив (Финляндия)	(DF)	302
из Финского залива в Балтийское море (Эстония)	(FG)	423
из Балтийского моря в Финский залив (Эстония)	(FG)	344
из Финского залива в Балтийское море (всё сечение)	(DG)	763
из Балтийского моря в Финский залив (всё сечение)	(DG)	646
из Рижского залива в Балтийское море (Эстония)	(RO)	168
из Балтийского моря в Рижский залив (Эстония)	(RO)	148
из Рижского залива в Балтийское море (Латвия)	(OT)	163
из Балтийского моря в Рижский залив (Латвия)	(OT)	159
из Рижского залива в Балтийское море (всё сечение)	(RT)	331
из Балтийского моря в Рижский залив (всё сечение)	(RT)	307

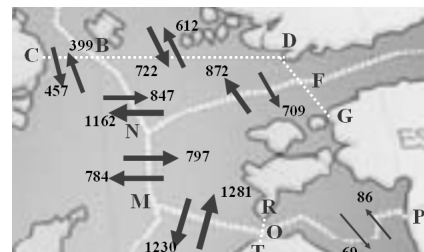


Рис. 6. Среднегодовые расходы (в км<sup>3</sup>/год) через границы исключительных экономических зон в районе северной части Балтийского моря.

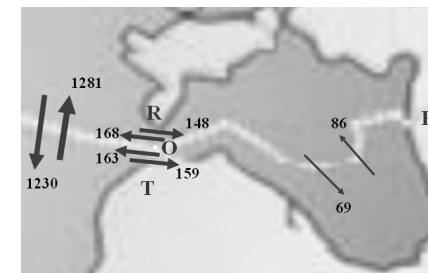


Рис. 7. Среднегодовые расходы (в км<sup>3</sup>/год) через границы исключительных экономических зон в районе Рижского залива



Горизонтальный обмен между отдельными объемными частями Балтийского моря в разы активнее внешнего водообмена (притока речных вод и обмена с Атлантическим океаном). Горизонтальный обмен наиболее интенсивно происходит в юго-восточной и центральной Балтике. В результирующем трансграничном переносе вод в этих районах прослеживается общее циклоническое направление.

Трансграничный перенос в Балтике (через границы ИЭЗ) по объемам сравним и превосходит среднегодовой речной сток в Балтику. Самый активный абсолютный результирующий среднегодовой трансграничный перенос наблюдается из ИЭЗ Польши в ИЭЗ России, из ИЭЗ России в ИЭЗ Литвы (1400-1600 км<sup>3</sup>/год). Исключительная экономическая зона России (Калининградская область) – одна из наиболее активных транзитных зон в Балтийском море.

Наибольшие результирующие среднегодовые удельные расходы через границы ИЭЗ имеют место в юго-восточной и центральной Балтике (от 4 до 28 км<sup>3</sup>/год/км), наименьшие – в заливах Балтийского моря (0.3-1.2 км<sup>3</sup>/год/км), в южной части Балтики эти расходы составляют от 2 до 4 км<sup>3</sup>/год/км.

Во всех рассмотренных районах отмечены сезонные вариации результирующего переноса вод через границы ИЭЗ. Наибольшие вариации результирующего переноса вод от сезона к сезону (в 3-5 раз) установлены в юго-восточной части Балтийского моря, вдоль основной оси моря, а наименьшие вариации – в заливах и поперёк основной оси моря. Наиболее интенсивный горизонтальный перенос наблюдается в осенне-зимний период из ИЭЗ Литвы в ИЭЗ Швеции, из ИЭЗ Польши в ИЭЗ России, из ИЭЗ России в ИЭЗ Литвы, из ИЭЗ Литвы в ИЭЗ Латвии (от 17 до 50 км<sup>3</sup>/год/км), В заливах (максимальные расходы в марте - до 2 км<sup>3</sup>/год/км) отсутствует значимо выраженное сезонное преимущественное направление переноса.

Полученные результаты, исходя из условия, что расходы через вертикальные сечения усреднены, описывают структуру, характер и величины горизонтального водообмена в Балтийском море в общем, без деталей, которые определяются стратификацией в отдельных районах. Данные о среднегодовых абсолютных и удельных расходах, их сезонных вариациях, позволяют судить о масштабах происходящих в Балтийском море процессов и выявить наиболее транзитные районы.

Анализ проводился при поддержке грантов РФФИ № 07-05-00850, 08-05-01023, 08-05-92421.

### Литература

1. <http://www.kodeks.ru/nofname/free-helcom>
2. <http://www.helcom.fi>
3. <http://nest.su.se/nest/>
4. Savchuk, O., Wulff, F. Modelling the Baltic Sea eutrophication in a decision support system. // *Ambio*, 2007, № 36, pp 131-148.

5. Wulff, F., Savchuk, O., Sokolov, A., Humborg, C., Morth, M. Assessing the past and the possible future of the Baltic // *Ambio*, 2008, № 36. Pp. 243-249.
6. Действующее международное право. Т. 3.- М.: Московский независимый институт международного права, 1997. С. 322 - 474. (Извлечение)
7. Конвенция ООН по морскому праву, Монтего-Бей, 10.12.1982 г. (<http://www.ecopages.ru>).
8. Конвенции о территориальном море и прилежащей зоне, Женева, 29.04.1958 г. (<http://www.law.edu.ru/norm/>)
9. Savchuk, O.P. Resolving the Baltic Sea into seven subbasins: N and P budgets for 1991–1999 // *J. Mar.Syst.* V. 56. Pp. 1– 15.
10. <http://www.dhi.dk>
11. <http://www.io-warnemuende.de>
12. Janssen F., Schrum C., Backhaus J. O. A Climatological Data Set of Temperature and Salinity for the Baltic Sea and the North Sea // *Dt. hydrogr. Z. Erganzungsheft*. 1999. Supplement 9. 245 p.
13. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря СССР». В 3 т. Т. 3. Балтийское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. – СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. – 450 с.
14. <http://rp5.ru/>
15. Sea and Coast. The National Atlas of Sweden. – 1992. – ISBN 91-87760-16-9.
16. <http://www.balticuniv.uu.se/>
17. Есюкова Е.Е. Пространственная структура и внутригодовая изменчивость горизонтального водообмена в Балтийском море / Автореферат дисс. на соиск. степ. канд. геогр. наук. - Калининград, 2009. – 25 с.
18. Esiukova E.E., I.P. Chubarenko. Horizontal water exchange within the Baltic Sea: results of numerical modeling // The environmental and socio-economic response in the southern Baltic region: abstr. Int. Conf. on Climate Change. – Szczecin, 2009. – pp. 35-36.
19. Siegel, H., M. Gerth, G. Tschersich. Sea surface temperature development of the Baltic Sea in the period 1990-2004 // *J. Oceanologia*. 2006. V. 48(S). P. 119-131.
20. Omstedt A., Gustafsson B., Rodhe J., and Wallin G. Use of Baltic Sea modelling to investigate the water cycle and the heat balance in GCM and regional climate models // *J. Clim. Res.* 2000. V.15. P. 95–108.
21. Lehmann, A., Krauss, W., Hinrichsen, H.-H. Effects of remote and local atmospheric forcing on circulation and upwelling in the Baltic Sea // *Tellus*. 2002. V. 54A, 299–316.
22. Myrberg, K., O. Andrejev. Modelling of the circulation, water exchange and water age properties of the Gulf of Bothnia // *J. Oceanologia*. 2006. V.48(S). P. 55-74.
23. Andrejev, O., Myrberg, K., Alenius, P. & Lundberg, P. A. Mean circulation and water exchange in the Gulf of Finland — a study based on three-dimensional modelling.// *Boreal Env. Res.* 2004a. 9: 1–16.
24. Добровольский А.Д., Залогин Б. В. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
25. Мультимедийный атлас «Индикаторы безопасности морской среды Балтийского моря»: адаптация в рамках проектов BalticMaster и SDI4SEB / АО ИОРАН ; рук. Б.В. Чубаренко ; отв. исп. А. Ю. Андриашкина, Д. А. Домнин. – Калининград. – 2008. – 42с.

УДК 551.465.7

## ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЧЕРНОГО МОРЯ

Еремеев В.Н.<sup>1</sup>, Крашенинникова М.А.<sup>2</sup>, Горячкин Ю.Н.<sup>2</sup>, Жуков А.Н.<sup>2</sup>,Сизов А.А.<sup>2</sup><sup>1</sup>Океанологический центр НАН Украины, г. Севастополь<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

По данным гидрометеорологических наблюдений, мирового банка океанологических данных (WODB) и ре-анализа NCEP/NCAR температуры поверхности моря (ТПМ) за период 1950–2008 гг. проанализированы долговременные тенденции изменения ТПМ Черного моря. Подтверждено увеличение среднегодовой ТПМ на всей акватории моря, за исключением его северо-западной и юго-восточной частей. В этих районах, а так же в прибрежных водах Турции в окрестности 32° в.д. отмечается тенденция к выхолаживанию поверхностных вод. Наиболее хорошо просматривается знакопеременная структура линейного тренда ТПМ в зональном направлении в зимний период.

### Введение

В последние годы авторами многочисленных работ была обнаружена общая тенденция глобального потепления системы океан-атмосфера, особенно значимая в последние 40–50 лет в континентальных районах Северного полушария. Однако такая тенденция может нарушаться на региональных масштабах, при этом Черноморский бассейн не является исключением [1].

Исследованию долговременных тенденций изменения температуры в поверхностном слое Черного моря посвящено большое число работ [1–7]. В работе [3] отмечалось, что в северо-западной части Черного моря в весенний период 1955–1994 гг. отсутствуют значимые тренды температуры поверхности моря. Аналогичный результат для всех сезонов за 1979–1993 гг. получен в работе [5]. В западной части Черного моря, как показано в работе [7], в зимний период в 60–90-е годы XX столетия происходило выхолаживания верхнего слоя, что возможно связано с увеличением зимнего стока главных черноморских рек и дополнительным турбулентным вовлечением вод термоклина в верхний перемешанный слой. В работе [4] показано, что в восточной части побережья Турции от Хопы до Гиресуна в среднем за все месяцы выделяется отрицательная тенденция в изменчивости ТПМ (большие значения трендов отмечаются в зимний и летний периоды), в центральной (от Самсуна до Инеболу) – положительная (зимой, летом – отрицательные тренды, весной, осенью – положительные). В работе [1] найдено, что ТПМ Черного моря в зимний период за последние 30 лет XX столетия понизилась на 1°C. Такое значительное понижение поверхностной температуры могло произойти по мнению авторов [1] по двум причинам. Первая

причина связана с подъемом относительно холодных подповерхностных вод, вызываемым уменьшением речного стока. В качестве второй причины выдвигается предположение об увеличении числа интенсивных холодных циклонов с большими скоростями приводного ветра, что неизбежно должно приводить к интенсивной теплоотдаче с поверхности моря за счет потоков явного и скрытого тепла.

В работе [6] обосновывается другая точка зрения на причину выхолаживания поверхностных вод Черного моря. По мнению авторов [6] отрицательные тренды ТПМ могут быть связаны с увеличением стока Дуная и Днестра, температура вод которых на 5–10°C ниже температуры поверхностных морских вод.

Имеющиеся на сегодняшний день оценки трендов поверхностной температуры относятся главным образом к отдельным районам Черноморского бассейна (южной [4] и северо-западной частей [3,7]). Оценки трендов по всему морю содержатся в работе [1]. Все эти оценки относятся к периоду наблюдений до середины 90-х годов XX столетия. Процессы, характерные для конца прошлого и начала текущего столетия, еще недостаточно представлены в литературе.

Целью настоящей работы является проведение анализа долговременных тенденций изменения поверхностной температуры Черного моря с использованием рядов наблюдений за поверхностной температурой воды (с 1950 по 2008 гг.) на гидрометеорологических станциях по всему побережью Черного моря, а также данных о ТПМ из мирового банка океанографических данных (WODB) и ре-анализа NCEP/NCAR.

### Материалы и методика расчета

При оценке долговременных трендов гидрометеорологических полей приходится сталкиваться с ограниченностью объема данных, а также их значительной неоднородностью по пространству и времени. Данные прямых наблюдений за температурой наиболее многочисленны и надежны за последние 50–60 лет. Поэтому в настоящей работе мы ограничивались периодом наблюдений за ТПМ с 1950 по 2008 гг.

Для анализа долговременных тенденций поверхностной температуры на всем побережье Черного моря использовались среднемесячные данные гидрометеорологических станций национального климатического центра данных (NCDC, USA) Интернета, данные, предоставленные Институтом морских наук Технического Университета восточного Средиземноморья (г. Эрдемли, Турция), и массивы среднемесячных значений ТПМ из архива МГИ НАН Украины в пределах черноморского региона, относительно равномерно расположенных вдоль побережья, за примерно 50-летний период. В работе для увеличения длины ряда в пунктах наблюдений в прибрежных областях Черноморского бассейна также привлекались данные ТПМ Мирового банка океанографических данных (OSD, MBT, XBT) за 1955–2004 гг. [8]. Они предварительно осреднялись в одноградусных квадратах в районах расположения гидрометеорологических станций. В центральных областях Черного моря использовались среднемесячные значения ТПМ из массива ре-анализа NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/ National Center of Atmospheric Research) за 1950–2001 гг. [9]. Эти данные, представленные в узлах неравномерной сетки, имеющей

гауссовское распределение по широте, и шаг, равный  $1,875^\circ$  по долготе, интерполировались на сетку с равномерным шагом  $2^\circ \times 2^\circ$ .

Среднегодовые величины ТПМ находились путем осреднения среднемесячных оценок за год. В работе также производилось осреднение среднемесячных значений ТПМ за летний (июнь-август) и зимний (январь-март) сезоны.

По полученным рядам среднегодовых и среднесезонных значений ТПМ вычислялись угловые коэффициенты линейных трендов ( $a$ ), а так же определялись величины коэффициентов детерминации ( $R^2$ ), определяющих вклад тренда в общую дисперсию ряда.

### Результаты

Рассчитанные по исходным рядам коэффициенты  $a$  и  $R^2$  для среднегодовых и сезонных значений ТПМ по наблюдениям на береговых станциях показаны в табл. 1–3. В табл. 4 приведены эти же величины, полученные по данным ре-анализа *NCEP/NCAR* для открытой части моря.

Как следует из приведенных таблиц, угловые коэффициенты линейных трендов ТПМ имеют весьма малые значения. За небольшим исключением они ниже 95% уровня значимости. Поэтому по ним можно судить только о тенденции в многолетней изменчивости поверхностной температуры Черного моря в зимний и летний сезоны и ее среднегодовых значений. Наибольшие значения угловых коэффициентов по данным береговых станций характерны для зимнего сезона. Значения линейного тренда в этот сезон лежат в пределах от 0,02 до 0,04 °C за ~ 40 лет. При этом знак тренда по всему побережью отрицательный, за исключением юго-западного и северо-восточного его участков. На юго-западе (Варна, Стамбул, Синоп) он достигает величины 0,04–0,05 °C/40 лет, а на северо-востоке (Анапа, Новороссийск) равен 0,02°C/40 лет. Для среднегодовых значений ТПМ положительный тренд сохраняется только на юго-западном участке побережья, а для летнего сезона преобладает положительная тенденция в изменчивости ТПМ по всему побережью моря, за исключением его юго-восточного участка.

Тренды среднегодовых и летних ТПМ в открытом море (по данным ре-анализа *NCEP/NCAR*) за последние 50 лет положительны и укладываются в диапазон 0,02–0,07 °C. Тренды зимних ТПМ так же положительны по всем узлам сетки ре-анализа *NCEP/NCAR*, за исключением западных и восточных районов моря, где они принимают отрицательные значения.

Учитывая неоднозначность угловых коэффициентов тренда в прибрежных районах Черного моря, рассмотрим их распределение по всей акватории моря (рис. 1). На этом рисунке представлены среднегодовые и сезонные величины трендов, вычисленные как по данным контактных наблюдений (береговые станции) так и по данным ре-анализа *NCEP/NCAR*. Точками на картах рис.1 показано положение береговых станций наблюдения и узлов сетки ре-анализа *NCEP/NCAR*.

Таблица 1

Величины и знаки угловых коэффициентов линейных трендов среднегодовых значений ТПМ ( $a$ ), и оценки достоверности линейной аппроксимации ( $R^2$ ).

Пункт наблюдений	$a$	$R^2$	Начало и конец измерений (гг)
Одесса	-0.13	0.27	1955 – 2008
Черноморское	-0.02	0.01	1955 – 1998
Евпатория	-0.025	0.01	1955 – 1998
Севастополь	-0.015	0.17	1955 – 1997
Ялта	-0.025	0.3	1955 – 2003
Алушта	0	0.04	1955 – 2006
Феодосия	-0.01	0.03	1950 – 2006
Керчь	-0.03	0.02	1955 – 2003
Анапа	-0.015	0.01	1950 – 2005
Новороссийск	-0.01	0.01	1950 – 2005
Туапсе	-0.02	0.88	1957 – 2005
Сочи	-0.03	0.02	1957 – 2005
Сухуми	-0.02	0.01	1955 – 1990
Батуми	-0.03	0.02	1955 – 1998
Хопа	-0.04	0.14	1963 – 1986
Самсун	-0.02	0.16	1950 – 2008
Гиресун	-0.03	0.49	1950 – 2008
Зончулдак	-0.02	0.02	1957 – 2008
Стамбул	0.04	0.06	1994 – 2008
Синоп	0.03	0.07	1963 – 1986
Трабзон	-0.03	0.2	1951 – 1986
Варна	0.11	0.27	1956 – 2004
Констанца	0.015	0.01	1956 – 2004
Сулина	-0.09	0.08	1955 – 2008

Как показано на рис. 1а, тренды среднегодовых значений ТПМ положительны на всей акватории Черного моря за исключением его северо-западной и юго-восточной частей. В этих районах преобладает тенденция к выхолаживанию моря. Режим выхолаживания формируется в зимний сезон (рис. 1б), когда к упомянутому району добавляется южная область выхолаживания в районе  $32^\circ$  в.д. Эта область отрицательных трендов ТПМ наряду с юго-восточной областью сохраняется и в летний сезон (рис. 1в), что согласуется с результатами [4]. Наиболее интересным, как представляется, является пространственное распределение коэффициентов линейного тренда в зимний сезон (рис. 1б). В этот сезон интенсивного взаимодействия моря и атмосферы проявляется некоторая закономерность в пространственном распределении коэффициентов линейного тренда ТПМ по акватории бассейна.

Таблица 2

Величины и знаки угловых коэффициентов линейных трендов средних за лето ТПМ ( $a$ ) и оценки достоверности линейной аппроксимации ( $R^2$ ).



Пункт наблюдений	$a$	$R^2$	Начало и конец измерений (гг.)
Одесса	0.03	0.07	1956 – 2008
Николаев	0.05	0.16	1955 – 2001
Черноморское	0.045	0.07	1955 – 2003
Евпатория	0.03	0.05	1955 – 1999
Севастополь	0.03	0.02	1955 – 1999
Ялта	0.04	0.11	1955 – 2003
Алушта	0.035	0.1	1950 – 1998
Феодосия	0.025	0.04	1950 – 1999
Керчь	0.03	0.06	1955 – 2005
Анапа	0.02	0.03	1950 – 2006
Новороссийск	0.01	0.01	1950 – 2005
Туапсе	0.02	0.02	1955 – 2005
Сочи	0.01	0.07	1955 – 2005
Сухуми	0	0.02	1955 – 1998
Поти	0	0.001	1955 – 1998
Батуми	0.01	0.001	1955 – 1998
Хопа	-0.035	0.07	1963 – 1986
Самсун	-0.01	0.02	1950 – 2008
Гиресун	-0.02	0.06	1950 – 2008
Зончулдак	-0.015	0.02	1957 – 2008
Стамбул	0.04	0.18	1994 – 2008
Синоп	0.01	0.01	1976 – 1986
Трабзон	-0.045	0.2	1951 – 1986
Варна	0.03	0.06	1976 – 2008
Констанца	0.03	0.05	1956 – 2008
Сулина	0.05	0.16	1955 – 2008

Как хорошо видно на рис.16, положительные тренды ТПМ у западного побережья сменяются отрицательными в районе 32° в.д. и на северо-западе Черного моря. Затем в полосе долгот 34°–37° в.д. преобладающими становятся положительные тренды ТПМ, которые сменяются отрицательными у восточного побережья Черного моря. Знакопеременный ход линейного тренда ТПМ в окрестности «векового» разреза от мыса Херсонес до пролива Босфор показан в работе [7]. В работе [10] исследован волновой характер изменчивости ТПМ Черного моря в зональном и меридиональном направлениях. В этой работе оценены временные и пространственные масштабы межгодовой изменчивости ТПМ по всему бассейну. Результаты, представленные на рис.16, подтверждают существование термических волн на поверхности Черного моря, исследованных в [10]. Этот волновой процесс, порождаемый, по-видимому, динамикой бассейна и, прежде всего, системой течений в верхнем слое моря, может играть важную роль в региональном распределении гидрохимических и гидробиологических характеристик в его деятельном слое.

Таблица 3

Величины и знаки угловых коэффициентов линейных трендов средних за зиму ТПМ ( $a$ ) и оценки достоверности линейной аппроксимации ( $R^2$ ).

Пункт наблюдений	$a$	$R^2$	Начало и конец измерений (гг.)
Одесса	-0.14	0.44	1972 – 2008
Черноморское	-0.025	0.02	1955 – 1998
Севастополь	-0.03	0.32	1958 – 1998
Алушта	0.01	0.3	1958 – 1998
Керчь	-0.07	0.22	1955 – 2006
Анапа	0.02	0.016	1950 – 2006
Новороссийск	0.02	0.02	1950 – 2006
Туапсе	-0.04	0.3	1958 – 2005
Сочи	-0.035	0.25	1958 – 1998
Сухуми	-0.07	0.37	1961 – 1998
Хопа	-0.03	0.06	1963 – 1986
Самсун	-0.01	0.013	1950 – 2008
Гиресун	-0.03	0.26	1950 – 2008
Зончулдак	-0.02	0.06	1967 – 2008
Стамбул	0.05	0.03	1955 – 2004
Синоп	0.05	0.19	1963 – 1986
Трабзон	-0.05	0.22	1951 – 1986
Варна	0.04	0.03	1995 – 2008
Сулина	0.01	0.002	1990 – 2008

#### Заключение

На основании анализа длительных рядов данных наблюдений за поверхностной температурой воды в Черном море (данных гидрометеорологических станций и мирового банка океанографических данных в прибрежных районах, и ре-анализа *NCEP/NCAR* – в центральной части Черного моря) были проанализированы долговременные тенденции изменения ТПМ.

Подтверждено наличие положительных линейных трендов ТПМ на всей акватории моря, за исключением его северо-западной и юго-восточной частей. В этих районах, а так же в прибрежных водах Турции в окрестности 32° в.д. отмечается тенденция к выхолаживанию поверхностных вод. Угловые коэффициенты положительных трендов в центральных частях моря изменяются от 0,01 до 0,04 °C/40 лет. Отрицательные тренды ТПМ на юго-востоке моря достигают величины - 0,02, а на северо-западе -0,06°C/40 лет.

Таблица 4

Величины и знаки угловых коэффициентов линейных трендов ТПМ ( $a$ ) и оценка достоверности аппроксимации ( $R^2$ ) в точках ре-анализа *NCEP/NCAR* 1950– 2001 гг.

Координаты	годовые	летние	зимние
------------	---------	--------	--------

долгота	широта	$a$	$R^2$	$a$	$R^2$	$a$	$R^2$
39.375	42.856	0.045	0.27	0.06	0.26	0.04	0.11
37.5	42.856	0.04	0.25	0.06	0.31	0.035	0.1
37.5	44.761	0.03	0.1	0.05	0.17	0.04	0.07
35.625	42.856	0.025	0.13	0.055	0.27	0.02	0.02
35.625	44.761	0.07	0.31	0.057	0.25	-0.01	0.97
33.75	42.856	0.02	0.06	0.05	0.23	-0.01	0.01
31.875	44.761	0.03	0.15	0.05	0.18	0.035	0.08
31.875	42.856	0.015	0.03	0.05	0.27	-0.02	0.03
30	44.761	0.035	0.17	0.055	0.2	0.03	0.07
30	42.856	0.015	0.04	0.06	0.27	-0.015	0.02
28.125	42.856	0.025	0.12	0.07	0.31	0.003	0.001
33.75	44.761	0.03	0.16	0.05	0.21	0.03	0.01

Показано, что тенденция к выхолаживанию прибрежных вод юго-восточной части моря и в районе 32° в.д. сохраняется и в летний сезон, что может свидетельствовать в пользу высказанного в [1,7] предположения о вовлечении в верхний перемешанный слой моря более холодных вод термоклина.

Интересным является то, что именно в зимний сезон хорошо просматривается знакопеременная структура линейного тренда ТПМ в зональном направлении. Величины угловых коэффициентов как положительных, так и отрицательных линейных трендов ТПМ лежат в пределах 0,01...0,03°C/40 лет. Отрицательные тренды достигают максимальных значений в северо-западной части моря.

Главная особенность знакопеременной структуры коэффициента линейного тренда заключается в том, что он показывает, что у западного побережья моря формируется область прогрева. В районе 32° в.д. выделяется область выхолаживания поверхности моря, которая распространяется до его северо-западной части. Далее в восточном направлении в окрестности 34–37° в.д. вновь появляется область прогрева поверхности моря, сменяющаяся на востоке областью выхолаживания. Таким образом, явно просматривается волновой характер изменчивости зимних ТПМ, что подтверждает результаты, полученные в [10]. Можно предполагать, что такая волновая картина распределения трендов зимних ТПМ должна быть связана с динамикой моря и, прежде всего, с системой его поверхностных течений. Одним из следствий знакопеременного распределения областей прогрева и выхолаживания поверхности моря может быть аналогичное распределение водных масс в его верхнем слое с соответствующими знакопеременными характеристиками гидрохимических и гидробиологических параметров.

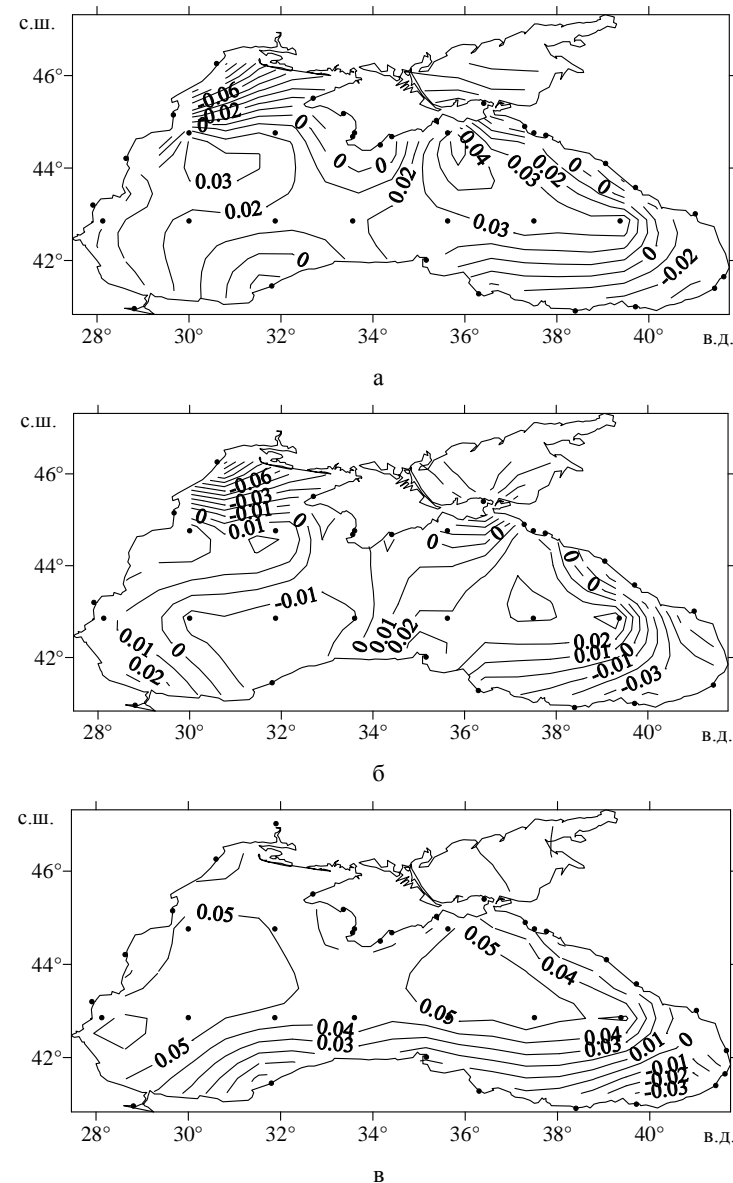


Рис. 1. Распределение угловых коэффициентов линейных трендов по всей акватории Черного моря для среднегодовых оценок ТПМ (а), средних зимних ТПМ (б), средних летних ТПМ (в).

## Литература

1. Еремеев В.Н., Ефимов В.В., Суворов А.М., Шокуров М.В. Аномальная климатическая тенденция температуры Черного моря // Докл. НАН Украины. – 2001. – №11. – С. 91–96.
2. Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР, Т.4 (Черное море). Вып. 1 Гидрометеорологические условия. – С.-Петербург: Гидрометеониздат, 1991. – 469 с.
3. Polonsky A., Voskresenskaya E., Belokopytov V. Variability of Northwestern Black sea hydrography and river discharges as part of global ocean-atmosphere fluctuations // Sensivity to Change: Black Sea, Baltic Sea, North Sea. Kluwer Academic publishers/–1997. – P. 11–24.
4. Горячкин Ю.Н., Иванов В.А. Гидрометеорологический режим южного побережья Черного моря. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 1999. – 46 с.
5. Schrum C., Staneva J., Stanev E., Oszoy E. Air-sea exchange in the Black Sea estimated from atmospheric analysis for the period. 1979–1993 // J. Mar. Sys. – 2001. – 31, № 1. – P. 3–19.
6. Полонский А.Б., Воскресенская Е.Н. О причинах понижения температуры поверхностного слоя Черного моря // Доклады НАН Украины. – 2003. – № 12. – С. 108–111.
7. Полонский А.Б., Ловенкова Е.А. Тренд температуры и солености в Черном море во второй половине XX века и его возможные причины // Известия РАН. ФАО. – 2004. – 40, № 6. – С. 832–841.
8. Boyer T.P., Antonov D.R. et al. World Ocean Data Base 2005. Levitus S. Ed., NOAA Atlas NESDIS60, U.S. Government/ [http://www/awi-bremerhaven.de/GEO/ODV\\_2001](http://www.awi-bremerhaven.de/GEO/ODV_2001).
9. Kalnay E. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull.Amer.Meteor.Soc. –1996. – 77. – P. 437–471.
10. Еремеев В.Н., Жуков А.Н., Лебедев Н.Е., Сизов А.А. Пространственная анизотропия межгодовой изменчивости температуры воды Черного моря (по спутниковым данным // Исследование Земли из Космоса. – 2007. – № 5. – С.3–10.

## ABSTRACT

## LONG-TERM TRENDS OF THE SEA SURFACE TEMPERATURE VARIATION OF THE BLACK SEA

Eremev V.N.<sup>1</sup>, Krasheninnikova M.A.<sup>2</sup>, Goryachkin Y.N.<sup>2</sup>, Zhukov A.N.<sup>2</sup>, Sizov A.A.<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Oceanological Centre NAS of Ukraine, Sevastopol  
<sup>2</sup>Marine Hydrophysical Institute NAS of Ukraine, Sevastopol

Long-term trends of the sea surface temperature (SST) variation of the Black Sea are analyzed, using hydrometeorological data of observations, data of the World ocean data base (WODB) and re-analysis NCEP/NCAR for the period 1950–2008. The average annual SST increase in the whole area of sea waters is confirmed, except its northwestern and southeastern parts. The trend to cooling of surface waters is observed in these regions and also in the offshore waters of Turkey near 32°E. The alternating structure of the SST linear trend in zonal direction most clearly is inspected in winter.

## ОБНАРУЖЕНИЕ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ СРЕДСТВАМИ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ.

## ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Запечалов А.С.<sup>1</sup>, Показеев К.В.,<sup>2</sup> Пустовойтенко В.В.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт НАН Украины,

<sup>2</sup>Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

<sup>3</sup>Черноморский филиал МГУ им. М.В. Ломоносова

Анализируются возможности распознавания нефтяного загрязнения на фоне неоднородностей, создаваемых естественными процессами, на радиоизображениях морской поверхности, получаемых с космических аппаратов. Анализ проводится для углов падения радиоволн, на которых преобладает резонансный (брегговский) механизм рассеяния.

## Введение

В настоящее время загрязнение Мирового океана нефтепродуктами является одной из основных угроз нарушения его экологического равновесия. Особенно заметно это для закрытых и полукрытых морей. Так, объем поступающих в Черное море нефтепродуктов приближается к ассимиляционной емкости бассейна [1]. Необходимость проведения природоохранных мероприятий требует разработки всепогодных методов и средств оперативного контроля поступлений нефтепродуктов в море.

Одним из перспективных методов обнаружения разливов нефти на морской поверхности является радиолокационный. Различными научными коллективами выполнено множество работ, направленных на изучение особенностей обнаружения радиолокационными (РЛ-) методами загрязнения морской поверхности поверхностно-активными веществами (ПАВ) – преимущественно нефтью и нефтепродуктами. Исследования проводились с помощью РЛ-систем корабельного, авиационного и космического базирования в широком диапазоне частот и углов наблюдения (см., например [2 - 15]). Они подтвердили возможность РЛ-обнаружения пленок ПАВ на поверхности моря и дали богатый материал для анализа явления.

При использовании РЛ-систем космического базирования возможен контроль обширных акваторий в любое время суток и независимо от погодных условий. Однако, использование только одного признака – наличия контраста между участками чистой и загрязненной поверхности, – дает неоднозначный результат. Причина этого в том, «радиолокационная неоднородность» изображения морской поверхности создается не только присутствием пленок ПАВ, но множеством других естественных геофизических явлений, таких, например, как: пространственная неоднородность поля ветра, вариации скорости поверхностных течений, морские температурные фронты, а также слики «штилевой погоды». Последние образуются при снижении скорости ветра ниже порогового значения, при котором генерируются ветровые волны, ответственные за рассеяние

радиоволн морской поверхностью. Вследствие этого, для повышения надежности распознавания необходим учет не только РЛ-контраста изображений, но и других признаков.

В настоящей работе анализируются возможности привлечения дополнительной информации для решения данной проблемы.

#### Физические механизмы, позволяющие регистрировать загрязнения

*Эволюция нефтяного пятна на морской поверхности.* Нефть и нефтепродукты поступают в морскую среду как из антропогенных, так и из естественных источников. Интегральный вклад различных антропогенных источников в загрязнение морских акваторий характеризуется относительными величинами, приведенными в табл. 1, основой которой являются оценки [16].

Таблица 1 – Относительный вклад антропогенных источников нефтяного загрязнения морских акваторий

Источник	Вклад, %	Примечания
1. Городские стоки	34	
2. Атмосферные осадки	14	
2. Морские операции	12	
3. Промышленные стоки	10	
5. Городские смывы	8	
6. Танкерные операции	7	
7. Прибрежная нефтеперегонка	6	
8. Аварии танкеров	6	
9. Добыча нефти	2	
10. Прочее	1	

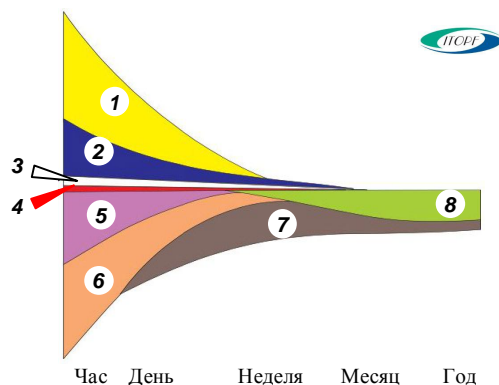


Рис. 1 – Схематическое изображение эволюции разлива сырой нефти [17].

Масштаб по вертикали соответствует относительному весу процессов, масштаб по горизонтали – продолжительности процесса.

Цифровые обозначения: 1 – испарение; 2 – диспергирование; 3 – растворение; 4 –

окисление; 5 – образование эмульсии; 6 – растекание; 7 – осаждение; 8 – биоразложение

К естественным источникам нефти, попадающей в морскую среду, относятся подводные грязевые вулканы, просачивания из нефтеносных слоев по трещинам, выбросы из грифонов и т.д.

Попадающая в море нефть и нефтепродукты вовлекаются в сложные миграционные процессы, общее представление о которых дает рис. 1, на котором представлены основные процессы эволюции нефтепродукта [17]<sup>3</sup>.

В результате воздействия названных процессов попавшая на морскую поверхность нефть (и продукты ее переработки) находятся в различных миграционных формах: поверхностные пленки (слики), эмульсии (типа «нефть в воде» и «вода в нефти»); нефтяные агрегаты и комочки.

Прямые эмульсии типа «нефть в воде», составленные капельками нефти диаметром до 0.5 мкм, малоустойчивы и характерны для нефти, содержащей поверхностно-активные вещества.

После удаления летучих и растворимых фракций остаточная нефть образует вязкие обратные эмульсии типа «вода в нефти», которые стабилизируются высокомолекулярными соединениями типа смол и асфальтенов и содержат в себе до (50-80)% воды – так называемый («шоколадный мусс»). Под влиянием абиотических процессов вязкость «мусса» повышается и начинается его слипание в агрегаты – нефтяные комочки размерами от 1 мм до 10 см.

Агрегаты представляют собой смесь высокомолекулярных углеводородов, смол и асфальтенов. Считается, что на образование агрегатов расходуется от 5 до 10% разлитой нефти.

Высоковязкие образования – «шоколадный мусс» и нефтяные комочки, могут длительное время сохраняться на поверхности воды и в подповерхностном слое, переноситься течениями, выбрасываться на берег и оседать на дно. Нефтяные комочки нередко заселяются перифитомом (сине-зеленые и диатомовые водоросли, усоногие рачки и другие беспозвоночные).

Естественно, интенсивность и продолжительность эволюции нефти, разлитой на морской поверхности, определяются множеством факторов, и соотношение между различными формами существования нефтяного загрязнения зависит как от состава и свойств самой нефти (нефтепродукта), так и условий (в том числе – метеорологических) ее поступления в водоем и его гидрологических особенностей.

В отличие от химически чистых поверхностно-активных веществ, нефть никогда не растекается до мономолекулярных слоев, а ее пленки имеют большую толщину. Так, по данным Агентства по охране окружающей среды США (*US Environmental Protection Agency*) через 10 минут после попадания в воду 1 тонны нефти, образуется пятно, толщина которого составляет около 10 мм. С течением времени толщина пленки в пятне уменьшается (до величин менее 1 мм), а само пятно расширяется, покрывая поверхность площадью до 12 кв. км. Растекание нефти продолжается до тех пор, пока толщина пленки не достигнет величины 10-30 микрон. Дальнейшее изменение толщины пленки происходит за счет испарения и поступления нефти в ниже лежащие слои. Когда толщина пленки составит 0.1-1 микрон, пятно начинается разрываться на отдельные фрагменты [18]. Обычно толщина свободной нефтяной пленки оценивается величиной порядка  $3 \cdot 10^{-3}$  см. [19]. Детальный анализ основных механизмов, приводящих к уменьшению

<sup>3</sup> ITOPF – The International Tanker Owners Pollution Federation Limited

количества нефти на поверхности, представлен, например, в работе [20]. После попадания в море около 50% нефтепродуктов испаряется, 23-28% – образуют тяжелые оседающие агрегаты, 1-5% растворяются в воде и только 15-17% образуют пленку [21]. Химический состав нефти и продуктов ее переработки варьируется в широких пределах, поэтому приведенные оценки являются весьма приблизительными.

На распространение пленок по поверхности моря влияют два основных процесса: перенос (дрейф) под действием ветра, волн и течений<sup>4</sup> и самопроизвольное растекание по поверхности. При сильном ветре пятно разрушается и в слое ветрового перемешивания возникает нефтяная эмульсия (причем водная эмульсия со временем оседает на дно).

*Радиолокационное наблюдение slickов на морской поверхности.* При попадании нефти на морскую поверхность, на ней, вследствие изменения поверхностного натяжения, образуется slick, т.е. область, в которой подавлены высокочастотные составляющие ветрового волнения. Поскольку при этом уменьшается шероховатость поверхности, подобные области хорошо выделяются на радиолокационных (РЛ-) изображениях, как зоны пониженного сигнала<sup>5</sup>. РЛ-контрасты принято определять как отношение мощностей<sup>6</sup> сигналов  $P^{(p)}$  и  $P^{(f)}$ , регистрируемых при зондировании загрязненной и чистой поверхности:

$$D = 10 \lg \left( P^{(p)} / P^{(f)} \right). \quad (1)$$

Далее везде индекс  $p$  соответствует загрязненной поверхности, индекс  $f$  – чистой (фоновой).

В качестве иллюстрации проявления slickов на РЛ-изображениях морской поверхности на рис. 2, заимствованном из [15] показано изображение тянущегося за судном «нефтяного следа», полученное с помощью PCA, установленной на борту ИСЗ ERS-1 (*European Remote Sensing Satellite*). На рис. 3, заимствованном из сайта *Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer)* [22], показано РЛ-изображение района катастрофы танкера «Престиж». Снимок получен с помощью PCA, установленной на борту ИСЗ ENVISAT (*European Space Agency Environmental Satellite*), через трое суток после аварии судна (17 ноября 2002 г.). Нетрудно видеть, что в обоих приведенных случаях след нефтепродукта на взволнованной морской поверхности уверенно фиксируется с помощью спутниковых PCA.

<sup>4</sup> По приблизительным оценкам, скорость перемещения нефтяных пленок составляет 60% от скорости течения и от 2 до 4% от скорости ветра.

<sup>5</sup> Речь идет о «классических» однопозиционных РЛС. В случае разнесенных (двухпозиционных) РЛС, работающих в области зеркальных отражений (область прямого сигнала, уменьшение шероховатости поверхности приводит к увеличению уровня радиолокационного сигнала).

<sup>6</sup> Величина РЛ-контраста обычно выражается в логарифмической шкале, единицей измерения служит децибелл (дБ).

Находящиеся на морской поверхности пленки нефти и нефтепродуктов являются не единственным источником формирования обширных областей, характеризующихся пониженным уровнем РЛ-сигнала. На рис. 4, заимствованном из [23], приведен фрагмент РЛ-изображения внутренних приливных волн, полученного с помощью PCA, установленной на канадском КА РЛ-наблюдения «RADARSAT». На рис. 5, заимствованном из [24], показан



Рис. 2 – Нефтяной след (темная полоса), тянущийся за судном (яркая точка, отмечена стрелкой). Длина следа превышает 80 км. Координаты центра кадра: 23°01'N, 121°41'E. Размер кадра: 100 км × 100 км [15]

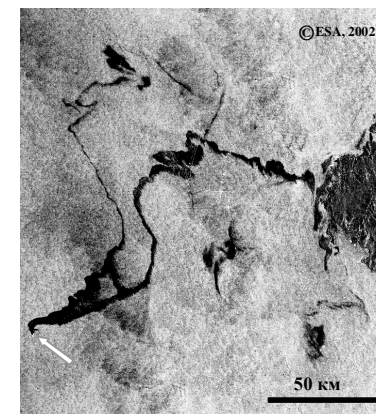


Рис. 3 – Растекание по морской поверхности нефтепродукта (мазут), вытекающего из танкера «Престиж». Размер кадра 150 × 150 км. Положение танкера отмечено стрелкой [16]

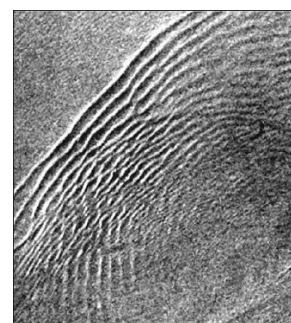


Рис. 4. Фрагмент РЛ-изображения внутренних приливных волн, полученного с помощью PCA КА «RADARSAT» [23]



Рис. 5 Фрагмент РЛ-изображения морской поверхности, полученного с помощью PCA ASAR КА ENVISAT (дата съемки 28.05.2005, режим *Wide Swath Mode*). Область пониженного РЛ-сигнала соответствует области интенсивного цветения водорослей. Площадь пятна – 97 км<sup>2</sup> [24]

фрагмент РЛ-изображения морской поверхности, полученной с помощью РСА ASAR, установленной на борту КА РЛ-наблюдения ENVISAT.

В первом случае (см., рис. 4), на высокочастотные морские волны воздействует знакопеременное поле поверхностных течений, что приводит к изменению их амплитуды (высоты) и, соответственно, к изменению интенсивности рассеиваемого ими сигнала. Другим, одновременно работающим механизмом, является изменение толщины пленок поверхностно-активных веществ в порождаемых внутренними волнами на морской поверхности областях дивергенции и конвергенции поверхностных течений. Во втором случае (см., рис. 5), выглаживание морской поверхности обусловлено повышенной плотностью водорослей, находящихся непосредственно вблизи границы раздела «воздух-вода» и подавляющих мелкомасштабные составляющие морского волнения.

Сопоставляя между собой рис. 3 и рис. 5, отметим сложность конфигурации и внутренней структуры областей, соответствующих пониженному уровню РЛ-сигнала, и даже некоторое подобие их форм.

Обратим также внимание читателя на существование еще одного физического механизма, оказывающего влияние на уровень шероховатости границы раздела «океан-атмосфера» при попадании поверхностно-активных веществ в море. В результате изменения шероховатости морской поверхности в зоне слика происходит изменение потока энергии от ветра к волнам. Очевидно, что чем больше размеры слика, тем на больших длинах волн проявление указанного механизма будет заметным. В частности, видимо, именно этим механизмом обусловлено значительное затухание волн длиной до 3.2 м под пленкой поверхностно-активного вещества [25]. Одновременно заметим, что подобный механизм должен проявляться при наблюдении морской поверхности в секторе углов, близких к направлениям зеркального отражения (альтиметрия, двухпозиционные РЛС, работающие в области «прямого» сигнала, и т.д.).

Многофакторность формирования структуры РЛ-изображений взволнованной морской поверхности обуславливает неоднозначность трактовки их неоднородности, вследствие чего задача выявления разливов *нефтепродуктов* сводится не столько к задаче обнаружения, сколько к задаче распознавания и, в частности, – к задаче оптимального выбора дешифровочных признаков.

#### Радиолокационный контраст «слик-рябь»

При зондировании морской поверхности на углах падения более 20° (типичные условия наблюдения поверхности с помощью спутниковых РСА), рассеянный в обратном направлении сигнала определяется, в основном, резонансным (брегговским) механизмом взаимодействия радиоволн с морской поверхностью. В ситуации, когда брегговские составляющие поля поверхностных волн распространяются по плоской поверхности, нормированное сечение обратного рассеяния  $\sigma^0$  можно представить в форме,

$$\sigma_{pp}^0(K, \theta, \alpha) = 8 K^4 \left| G_{pp}(\varepsilon, \theta) \right|^2 \Xi(\vec{k}_B), \quad (2)$$

где  $K = 2\pi\lambda^{-1}$  – волновое число радиоволны  $\lambda$ , облучающей морскую поверхность;  $\theta$  – угол падения;  $\alpha$  – азимутальный угол;  $G_{pp}$  – функция угла зондирования, определяемая диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  и видом поляризации  $pp$  (первый индекс определяет поляризацию излучаемого излучения, второй принимаемого);  $\Xi$  – спектр возвышений морской поверхности.

Условие резонанса, связывающее волновые числа поверхностных  $k_B$  и рассеянных в обратном направлении электромагнитных волн  $K$ , имеет вид,  $k_B = K 2 \sin \theta$ .

Присутствие длинных волн приводит к тому, что брегговские составляющие распространяются по криволинейной поверхности. Это, в свою очередь, приводит к изменению локального угла падения радиоволн на величину, равную углу наклона морской поверхности в направлении зондирования  $\beta_{\uparrow}$ . Как следствие меняется значение функции угла зондирования  $G_{pp} = G_{pp}(\theta - \beta_{\uparrow})$ , а волновое число брегговской составляющей поверхностного волнения становится функцией трех переменных  $k_B = (K, \theta, \beta_{\uparrow})$ . Влияние длинных волн на величину рассеянного назад сигнала, можно учесть, усреднив выражение (1) по всему диапазону создаваемых ими углов наклонов морской поверхности  $\beta_{\uparrow}$  с весом, равным плотности вероятностей углов наклонов  $P(\beta_{\uparrow})$  в данном направлении,

$$\sigma_{pp}^1 = \int \sigma_{pp}^0(\theta - \beta_{\uparrow}) P(\beta_{\uparrow}) d\beta_{\uparrow}. \quad (3)$$

Подавление (*damping*) мелкомасштабных составляющих волнения пленками и является причиной появления на взволнованной морской поверхности сликов и областей с пониженным уровнем сигнала на ее РЛ-снимках.

В последние годы большое внимание уделяется изучению составляющей РЛ-сигнала, которую нельзя описать в рамках резонансной модели. Существует целый ряд «нерезонансных» и «незеркальных» механизмов рассеяния, связанных с обострением гребней волн (как энергонесущих, так и более мелких) перед обрушением, с брызгами и пеной, образующимися при обрушении морских волн, и т.д. (см., например [26 - 29]). При этом термин «нерезонансное, небрегговское рассеяние» является собирательным, интегрально впитывающим в себя проявления всех возможных механизмов формирования РЛ-сигнала, называемых «эффектами обрушения» [30] и связываемых с реализацией неустойчивости свободной поверхности.

При таком подходе сечение обратного рассеяния представляется в виде суммы двух составляющих: брегговской (резонансной) и небрегговской

$$\sigma_{pp} = \sigma_{pp}^B + \sigma_{pp}^{NB} \quad (4)$$

где индексы  $B$  и  $NB$  соответствуют брегговской и небрегговской составляющим.

С учетом вышесказанного, РЛ-контраст описывается выражением

$$D = 10 \lg \left( \frac{(\sigma_{pp}^B + \sigma_{pp}^{NB})^{(p)}}{(\sigma_{pp}^B + \sigma_{pp}^{NB})^{(f)}} \right) \quad (5)$$

В реальных условиях РЛ-наблюдения взволнованной морской поверхности контраст  $D$  определяется многими факторами: начиная от соотношения размеров нефтяного пятна и элемента разрешения РЛС и заканчивая выбором оптимальной длины радиоволны  $\lambda$  и углов наблюдения поверхности  $\theta$ . Этим, по-видимому, и объясняется наблюдаемый в литературе разброс данных о контрастах участков поверхности, покрытых пленками ПАВ и нефтепродуктов.

Авторы работы [11], используя многочастотный авиационный комплекс дистанционного зондирования, наблюдали в районе нефтепромысла «Нефтяные Камни» на удалении от 10 до 20 км от эстакад контрасты, не превышающие 7 дБ, вблизи же эстакад контраст стабильно превышал 7 дБ, максимальные его значения достигали 14 дБ. Эксперименты [11] показали также, что при использовании радиоволны  $\lambda = 8$  мм даже при работе с самолета наблюдается влияние погодных условий на результат измерения – в этом смысле, с точки зрения решения задачи обнаружения разливов нефтепродуктов, радиоволна  $\lambda = 8$  мм не является оптимальной. В работе [4] приведены результаты экспериментов, выполненных при скользящих углах наблюдения ( $\psi < 10^\circ$ )<sup>7</sup>: на радиоволне  $\lambda = 3.2$  см наблюдались РЛ-контрасты пленок нефтепродуктов, превышающие 10 дБ. К сожалению, авторы не привели данных о температуре воды и воздуха во время выполнения эксперимента.

Основываясь на выражениях (2) - (5) можно показать, что РЛ-контраст  $D$  может возникать вследствие изменения следующих характеристик: диэлектрической проницаемости (соответственно функции  $G_{pp}$ ); спектра поверхностных волн на масштабах береговой компоненты; плотности вероятностей уклонов морской поверхности (углов наклонов), создаваемых волнами, длина которых много больше длины береговых компонент; а также изменением характера обрушений.

Рассмотрим, могут ли изменения указанных характеристик быть использованы для выделения поверхностного загрязнения на радиолокационном изображении морской поверхности.

Изменение диэлектрической проницаемости. Зависящий от вида поляризации излучаемого и принимаемого РЛ-сигнала геометрический коэффициент  $|G_{pp}(\varepsilon, \theta)|^2$  меняется с изменением диэлектрической проницаемости морской воды. В случае, если излучение и прием сигнала осуществляются на одной и той же поляризации, функция  $G_{pp}(\theta)$  имеет вид [31]:

при вертикальной поляризации

<sup>7</sup>  $\psi$  – угол скольжения, отсчитываемый от спокойной поверхности моря. Область углов скольжения, не превышающих ( $5 - 10^\circ$ ), типична для работы береговых и корабельных РЛ-систем.

$$G_{vv}(\theta) = \cos^4 \theta \frac{(\varepsilon - 1) [\varepsilon (1 + \sin^2 \theta) - \sin^2 \theta]}{[\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}]^2}, \quad (6)$$

при горизонтальной поляризации

$$G_{hh}(\theta) = \cos^4 \theta \frac{(\varepsilon - 1)}{[\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}]^2}, \quad (7)$$

Здесь нижние индексы  $v$  и  $h$  обозначают вертикальную и горизонтальную поляризацию радиосигнала соответственно;  $\varepsilon$  – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость среды под границей атмосфера-океан.

Присутствие на поверхности моря нефтяной пленки, имеющей отличную от морской воды диэлектрическую проницаемость, может изменять величину геометрического коэффициента  $|G_{pp}(\varepsilon, \theta)|^2$ . Однако для реальных пленок, имеющих толщину  $h \approx 10^{-5} - 10^{-7}$  см, выполняется условие

$$K h \sqrt{\varepsilon_p} \ll 1, \quad (8)$$

где  $K$  – волновое число радиоволны;  $\varepsilon_p$  – диэлектрическая проницаемость вещества, образующего пленку, и влиянием изменения диэлектрической проницаемости можно пренебречь [32]: образно говоря, радиоволна «не замечает» присутствие на морской поверхности пленки нефтепродукта, проникая сквозь нее непосредственно до поверхности воды.

Трансформация спектра поверхностных волн. В ситуации, когда небереговскими механизмами рассеяния радиоволн можно пренебречь, т.е. – в области наблюдения морской поверхности с помощью спутниковых РЛС БО, РЛ-контраст загрязненной и чистой поверхности определяется соотношением:

$$D = 10 \lg \left( \frac{\Xi^{(p)}(\vec{k}_B)}{\Xi^{(f)}(\vec{k}_B)} \right) \quad (9)$$

Выражение (9) получено в рамках предположения, что длинные поверхностные волны оказывают незначительное влияние на величину сечения обратного рассеяния радиоволн.

Перейдем от спектра волновых векторов  $\Xi(\vec{k})$  к спектру волновых чисел и направлений  $\Psi(k, \alpha)$ , который можно представить в форме,

$$\Psi(k, \alpha) = S(k)\Theta(k, \alpha), \quad (10)$$

где  $S(k)$  – одномерный спектр волновых чисел;  $\Theta(k, \alpha)$  – функция углового распределения, описывающая распределение волновой энергии по направлениям;  $\alpha$  – азимутальный угол. Естественно предположить, что пленка нефти в равной степени подавляет поверхностные волны, независимо от направления их распространения, т.е.  $\Theta^{(p)}(k, \alpha) = \Theta^{(f)}(k, \alpha)$ . Тогда из выражения (9) получаем,

$$D = 10 \lg \left( S^{(p)}(k_B) / S^{(f)}(k_B) \right). \quad (11)$$

Если известна модель, описывающая трансформацию спектра поверхностных волн в зоне нефтяного загрязнения, то, проводя измерения на нескольких длинах радиоволн, и соответственно оценивая спектр поверхностных волн на разных масштабах, можно получить систему уравнений для расчета параметров модели. В свою очередь параметры модели связаны с характеристиками загрязнения, в частности, с толщиной пленки. Такой подход был реализован в работе [12], в которой по данным трехчастотного зондирования (длины волн 0.8 см, 3 см и 23 см) оценивалось количество разлитой нефти на акватории каспийского промысла «Нефтяные камни».

Следует отметить, что аномалии структуры морской поверхности могут быть созданы рядом факторов, не связанных с загрязнением. Поэтому использовать способ оценки характеристик нефтяного загрязнения по данным многочастотного зондирования можно только в ситуации, когда есть информация о природе возникновения радиолокационного контраста между отдельными участками морской поверхности.

Изменение поляризационного отношения. Существует еще одна характеристика рассеяния радиоволн морской поверхностью – поляризационное отношение,

$$R = \sigma^v / \sigma^h, \quad (12)$$

которая может быть использована для распознавания пленок нефтепродуктов. При скользких углах зондирования нерезонансные механизмы рассеяния радиоволн на морской поверхности по-разному проявляются на вертикальной и горизонтальной поляризации. Присутствие пленки нефти меняет характер обрушений поверхностных волн, вследствие чего может изменяться и поляризационное соотношение (см., например [33, 34]).

Если уменьшать угол падения радиоволн на морскую поверхность (оставаясь в диапазоне углов, где доминирует резонансный механизм рассеяния), то вклад в регистрируемый радиосигнал небреговой составляющей,

обусловленной обрушением поверхностных волн, снижается. Соответственно снижается и возможность использовать поляризации для распознавания нефтяных сликов.

#### Распознавание сликов нефтепродуктов на РЛ-изображениях

Как отмечено выше, использование в качестве дешифровочного признака только величины контраста  $D$  при обнаружении загрязнений морской поверхности нефтепродуктами дает неоднозначный результат. Поэтому для повышения достоверности опознания привлекаются дополнительные дешифровочные признаки: особенности формы, типичные размеры, текстура, четкость границ, параметры поля ветра, статистика появления в регионе сликов естественного происхождения и т.д.

Мировым научным сообществом выполняется ряд международных проектов, направленных на создание систем регионального контроля. Среди проектов, в которых участвуют научные коллективы России и Украины, назовем:

– *ERUNET (European-Russian-Ukrainian GMES Network for Monitoring of Oil Spill and Oil & Gas Pipelines)*. Проект координируется Совместным исследовательским центром (*Joint Research Centre – JRC*) Европейской комиссией, расположенном в Испре (*Ispra*), Италия;

– *OSCSAR (Marine Oil Control: SAR monitoring and model prediction)*;

– *DEMOSSES (Development of Marine Oil Spills/slicks Satellite monitoring System Elements Targeting the Black/Caspian/Kara/Barents Seas)*. Сроки выполнения работ – с 01.02.2007 по 31.01.2009. Выполняется в рамках программы *INTAS*<sup>8</sup>.

– *MONRUK (Monitoring the Marine Environment in Russia, Ukraine and Kazakhstan using Synthetic Aperture Radar)*. Сроки выполнения – с 01.07.2007 по 30.06.2009.

– *MOPED (Monitoring of Oil Pollution using Earth Observation Data)*. Проект выполняется с 2007 г. также в рамках программы *INTAS*.

Однако, как справедливо замечено в [35], проекты являются демонстрационными или исследовательскими, большинство из них являются пилотным, направленными на столько на создание и развитие отечественных (российских и украинских) средств и эксплуатационных систем мониторинга нефтяных загрязнений морских акваторий, сколь на продвижение на рынки (российский и украинский) европейских конечных информационных (прежде всего дорогостоящих – высокого разрешения) и программных продуктов. Основными целями проектов является [35]:

– демонстрация возможностей проведения мониторинга морских акваторий с помощью *зарубежных* космических средств;

– продвижение на рынок *зарубежной* спутниковой информации высокого разрешения;

– продвижение на рынок *зарубежного* программного обеспечения;

<sup>8</sup> *INTAS – The International Association for the promotion of co-operation with scientists from the New Independent States of the former Soviet Union* – Международная ассоциация по содействию сотрудничеству с учеными из Новых независимых государств бывшего Советского Союза.



– получение *зарубежными (!)* организациями сведений о масштабах загрязнения *российских (и украинских)* морей и др.

Наконец, следует отметить, что в мире уже существуют оперативные и квази-оперативные системы мониторинга загрязнений морских акваторий. Например, Данией ежесуточно (!) выпускается карта загрязнений своих территориальных вод [35]. Ведут постоянную работу по мониторингу нефтяных загрязнений морских акваторий и другие страны – в частности, известны методические работы специалистов Совместного исследовательским центром Европейской комиссии (*Joint Research Centre – JRC*), систематизирующих спутниковые данные о нефтяном загрязнении европейских морей.

В качестве примера на рис. 6 показана карта распределения нефтяных пятен на поверхности европейских морей, полученная по данным спутниковой РЛ-съемки, выполненной в период с 2000 по 2004 г. [36]. Нетрудно видеть, что нефтесодержащие пленки группируются в районах интенсивного судоходства. Что, впрочем, не удивительно.

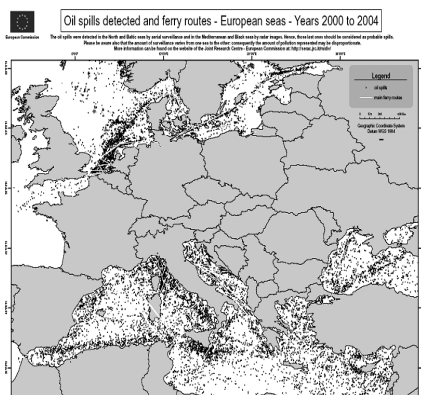


Рис. 6. Распределение сликов нефтепродуктов в акватории европейских морей [36]

Полностью автоматические методы идентификации нефтяных загрязнений морской поверхности на основе анализа данных спутниковых РСА в настоящее время только разрабатываются.

Решение относительно генезиса каждого слика принимается экспертом-дешифровщиком на основе анализа указанных характеристик изображения слика, а также дополнительной информации о скорости приводного ветра, поле поверхностных течений, дислокации возможных источников загрязнения и т.д. (см. например, [37]).

Необходимо отметить, что отдельные проекты доведены до работы квази-оперативном режиме. В 2007 г. Инженерно-технологический центр (ИТЦ) «Сканекс» совместно с НП «Прозрачный мир» запустил пилотный *on-line* проект «Радиолокационный мониторинг нефтяных загрязнений северной части Каспийского моря» [38], в августе 2008 г. ИТЦ «Сканекс» совместно с администрацией порта Новороссийск [39] запустили проект, направленный на отработку технологий оперативного обнаружения нефтяных загрязнений и контроля экологической обстановки в районах интенсивного судоходства в Керченском проливе, акватории порта Новороссийск и на подходах к нему. В его рамках введен в эксплуатацию автоматизированный интерфейс «Космоснимки-Черное море». Интерфейс создан на базе известного геопортала «Космоснимки», работает в закрытом режиме и позволяет отображать обстановку в зоне контроля с указанием координат нахождения судов и позиционирования нефтяных сликов, обнаруживаемых при обработке данных спутниковой съемки. Одновременно со спутниковой съемкой портовые службы Новороссийска документируют

обстановку в акватории с помощью береговых и судовых средств, идентифицируют суда, причастные к обнаруженным загрязнениям и проводят расследования, предусмотренные международными конвенциями. Данные поступают специалистам служб капитана порта Новороссийск с технологической задержкой по времени, составляющей от 2-х до 4-х часов с момента выполнения съемки.

### Заключение

Установленные на космических аппаратах РЛ-системы высокого разрешения (с синтезированием апертуры приемной антенны) являются эффективным инструментом для мониторинга нефтяного загрязнения на больших акваториях. По сравнению с оптическими приборами они имеют ряд преимуществ, поскольку обеспечивают возможность получения данных по большой акватории, вне зависимости от облачности и освещенности, позволяя осуществлять мониторинг в любое время суток.

Во многих странах мира действуют государственные системы оперативного контроля аварийного загрязнения территориальных вод, в которой ключевая роль принадлежит спутниковой РЛ-информации [35].

– в США и Канаде такие системы находятся в ведении Служб береговой охраны. После обнаружения со спутника нефтяного разлива в район аварии направляется судно или авиационное средство для уточнения масштаба загрязнения и выявления виновника – финансирование этих работ осуществляется в рамках *государственной программы Integrated Satellite Tracking of Oil Pollution (ISTOP)*;

– в Дании такую функцию выполняет военная организация (*Admiral Danish Fleet*). В случаях обнаружения слика район детально обследуется с воздуха. Организация каждые сутки выпускает карту загрязнений территориальных вод Дании;

– в Норвегии скоординированный спутниковый и авиационный мониторинг побережья и морских районов осуществляет *Norwegian Pollution Control Authority (SFT)* при министерстве окружающей среды – по данным мониторинга в территориальных водах Норвегии ежегодно отслеживается от 500 до 600 случаев разлива нефтепродуктов.

– с 1980 г. действует *Конвенция об охране окружающей среды Балтийского моря* (Хельсинская конвенция). Правовая база международного сотрудничества обеспечивается Хельсинкской комиссией (Хелком). В состав межправительственного сотрудничества по защите морской среды Балтийского моря от всех источников загрязнения входят: Дания, Эстония, Европейское сообщество, Финляндия, Германия, Латвия, Литва, Польша, Россия и Швеция. В рамках «Хелком» мониторинг загрязнения Балтийского моря осуществляется комплексный мониторинг с помощью спутниковых, авиационных и корабельных средств с помощью спутниковых РЛ-средств;

– основным международным документом, регулирующим вопросы охраны Чёрного моря, является «Конвенция о защите Черного моря от загрязнения» [40], подписанная шестью черноморскими странами – Болгарией, Грузией, Россией, Румынией, Турцией и Украиной в 1992 в Бухаресте (Бухарестская конвенция). А также «Конвенция о сотрудничестве по защите и устойчивому развитию реки Дунай», подписанная в Софии в июне 1994 года представителями Австрии, Болгарии, Хорватии, Чешской Республики, Германии, Венгрии, Молдавии, Румынии, Словакии, Словении, Украины и Европейского союза. Координация

мероприятий, выполняемых в рамках Конвенций возложена на Черноморскую комиссию (Стамбул) и Международную комиссию по охране реки Дунай (Вена).

Вместе с тем, говоря о *системах* мониторинга нефтяных загрязнений морских акваторий, отметим и ряд недостатков, присущих спутниковым РЛ-средствам:

– спутниковые системы дистанционного зондирования, особенно высокого разрешения, имеют ограничения по периодичности съемки одного и того же района, даже при перенацеливании РСА в пределах ее полосы обзора;

– существует технологическая задержка (от нескольких часов до суток) в получении информации потребителем, обусловленная затратами времени на синтезирование апертуры на наземных средствах;

– существуют ограничения и гидрометеорологическим условиям: опыт показывает, что слики нефтесодержащих продуктов наиболее ярко проявляются при скоростях ветра от 3 до 8 м/с. При меньших скоростях ветра они маскируются штилевыми полосами, а при больших – разрушаются вследствие интенсивного перемешивания.

Обратим внимание и на некоторые особенности использования спутниковых РСА, как средств обнаружения несанкционированных разливов нефти и нефтепродуктов, практически не затрагиваемые в публикациях:

– в случае аварийных разливов всегда известно место разлива, тип разлитого нефтепродукта и его количество. Существующие модели переноса позволяют с приемлемой точностью прогнозировать путь распространения пятна нефтепродукта. В этом случае задача обнаружения и распознавания естественным образом отпадает, а РЛ-средства могут использоваться не более чем средства сопровождения и уточнения траектории движения нефтепродукта;

– в случае несанкционированного сброса загрязненных нефтепродуктами балластных вод необходимо, чтобы КА «увидел» нарушителя в процессе сброса, что позволило бы «схватить нарушителя за руку» и применить к нему штрафные санкции и другие меры воздействия. Но, образно говоря, «к каждому кораблю космический аппарат не приставишь». Представляется, что центр тяжести при решении этой задачи должен быть перенесен на авиационные средства контроля;

– поскольку промывка балластных цистерн осуществляется вдали от берегов, сбросы нефтесодержащих вод, по-видимому, не представляют существенной угрозы для прибрежной полосы и не требуют применения каких-либо специальных способов воздействия на них.

Наконец, можно согласиться с авторами бюллетеня [35] в том, что не следует излишне надеяться на высокий, в сравнении со странами Европейского союза, приоритет проведения съемок морских акваторий в интересах российских и украинских потребителей, не имеющих в настоящее время в космосе собственных (национальных) средств РЛ-мониторинга.

### Литература

1. *Рябинин А.И., Губанов В.И., Клименко Н.П., Назаренко С.А.* Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IV. Черное море. Выпуск 3. Современное состояние загрязнения вод Черного моря. Севастополь «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 1996. – 230 с.
2. *Pilon R.O., Purves C.G.* Radar Imagery of Oil Slicks // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. – 1973. – Vol. AES-9, № 5. – P. 630 - 636.

3. *Krishen K.* Detection of Oil Spills Using a 13.3-GHz Radar Scatterometer // J. Geophys. Res. – 1973. – Vol. 78, № 12. – P. 1952 - 1963.

4. *Галаев Ю.М., Калмыков А.И., Курекин А.С., Лементя Ю.А., Хелено Б.А., Островский И.Е., Пичугин А.П., Пустовойтенко В.В., Терехин Ю.В.* Радиолокационные обнаружения нефтяных загрязнений морской поверхности // Известия АН СССР, серия: Физика атмосферы и океана. – 1977. – Т.13, №4. – С.406 - 414.

5. *Hawkins R.K., Gray A.L., Thomson V. And Neville R.A.* Observation of two test oil spills with a microwave scatterometer and a Synthetic Aperture Radar // Proc. 1st Workshop by Working Group 1, U.S. Coast Guard, DC. – Washington (USA). – 1979. – P. 249 - 257.

6. *Alvarado U.R., Tomiyasu K., Gulatsy R.L.* Assessment of space sensor for ocean pollution monitoring // AIAA Sens. Syst. 80's Conf., Colorado Springs (USA), Collect. tech. pap. – 1980. – P. 61 - 64.

7. *Johnson J.W., Crosswell W.F.* Characteristics of 13.9 GHz radar scattering from oil films on the sea surface // Radio Science. – 1982. – Vol. 17, № 3. – P. 611 - 617.

8. *Singh K.P., Gray L.A. Hawkins R.K., O'neil R.A.* The Influence of Surface Oil on C- and Ku-Band Ocean Backscatter // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1986. – Vol. GE-24, № 5. – P. 738 - 743.

9. *Waggett P.W., Ward I.A.* A Combined SAR and Scatterometer System // Proc. IGARSS'87 Symposium, Ann Arbor (USA), 18-21 May. – 1987. – P. 1507-1509.

10. *Иванов А.Ю.* Нефтяные загрязнения моря на радиолокационных изображениях КА «Космос-1870» и «Алмаз-1» // Исследования Земли из космоса. – 1997, № 6. – С. 73 - 84.

11. *Боев А.Г., Карвицкий Е., Матвеев А.Д., Цымбал В.Н.* Оценка параметров нефтяной пленки на морской поверхности методом многочастотного радиолокационного зондирования // Радиофизика и астрономия. – 1998. – Т. 3, № 1. – С. 43 - 48.

12. *Боев А.Г., Матвеев А.А.* Оценка количества разлитой нефти на акватории каспийского промысла «Нефтяные камни» по данным многочастотного радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, № 2. – С. 178 - 188.

13. *Иванов А.Ю.* Сликы и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследование Земли из космоса. – 2007, № 3 (Май-Июнь). – С. 73 - 96.

14. *Лаврова О.Ю., Златопольской А.А., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю.* Опыт мониторинга антропогенных загрязнений в прибрежной зоне. [Электронный документ] [www.iki.rssi.ru/earth/ppt2005/lavr.pdf](http://www.iki.rssi.ru/earth/ppt2005/lavr.pdf) (Проверено 12.04.2009).

15. *Alpers W.* Remote Sensing of Oil Spills [Электронный документ] [www.ifm.zmaw.de/fileadmin/files/images/Staff/Werner\\_Alpers/PDF\\_ALPERS/saudi\\_arabia.pdf](http://www.ifm.zmaw.de/fileadmin/files/images/Staff/Werner_Alpers/PDF_ALPERS/saudi_arabia.pdf) (Проверено 11.06.2009 г.)

16. *Frid C., Dobson M.* Ecology of Aquatic Management. – London: Pearson Education Limited. – 2002. – 274 p.

17. *ITOPF Fate of Marine Oil Spill.* Technical information paper. – 2003, № 2. – 8 с. [Электронный документ] <http://www.itopf.org/marine%2Dspills/fate/weathering%2Dprocess/documents/tip2.pdf> (Проверено 11.06.2009 г.)

18. Журбас В.М. Основные особенности распространения нефти в море. – Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. – М.: ВИНТИ. – 1978. – Т. 12. – С. 144 - 159.
19. Боев, Ясницкая Н.Н. Коэффициент затухания поверхностных волн под пленкой поверхностно-активного вещества конечной гидродинамической толщины // Прикладная гидромеханика. – 2002. – Т. 4, № 4. – С. 14-22.
20. Wheeler R.B. The fate of petroleum in the marine environmental // Special report. N.Y. Exxon production Research Co. – 1978. – 182 p.
21. Фацук Д.Я., Крылов В.Н., Иерокликс М.К. Загрязнение Черного и Азовского моря пленками нефтепродуктов // Водные ресурсы. – 1996. – Т. 23, № 3. – С. 361 - 375.
22. *Prestige oil slick detection from space*. [Электронный документ] Сайт IFREMER [http://www.ifremer.fr/droos/anglais/programmes/web\\_prestige/prestige.htm](http://www.ifremer.fr/droos/anglais/programmes/web_prestige/prestige.htm) (Проверено 11.06.2009 г.).
23. Бондур В.Г., Морозов Е.Г., Бельчанский Г.И., Гребенюк Ю.В. Радиолокационная съемка и численное моделирование внутренних приливных волн у северо-восточного побережья США. [Электронный документ]. [www.iki.rssi.ru/earth/ppt2005/greb.pdf](http://www.iki.rssi.ru/earth/ppt2005/greb.pdf) (Проверено 12.05.2009).
24. Лаврова О.Ю., Златопольской А.А., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю. Опыт мониторинга антропогенных загрязнений в прибрежной зоне. [Электронный документ] [www.iki.rssi.ru/earth/ppt2005/lavr.pdf](http://www.iki.rssi.ru/earth/ppt2005/lavr.pdf) (Проверено 12.04.2009).
25. Alpers W., Hühnerfuss H. The damping of ocean waves by surface films: a new look at an old problem // Journ. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 94, № C5. – P. 6 251 - 6 265.
26. Kalmykov A.I., Pustovoytenko V.V. On Polarization Features of Radio Signals Scattered From the Sea Surface at Small Grazing Angles // J. Geophys. Res. – 1976. – Vol. 81, № C12. – p.1960 - 1964.
27. Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Раев М.Д., Сабинин К.Д., Трохимовский Ю.Г., Чурюмов А.И., Шуган И.В. Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // Успехи физических наук. – 2003. – том 173, № 1. – С. 69 - 87.
28. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semi-empirical model of the normalized cross-section of the sea surface. 1 Background model // J. Geophys. Res. – 2003. – Vol. 108, № C3. 8054 doi: 10.1029/2001JC001003.
29. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semi-empirical model of the normalized cross-section of the sea surface. 2 Radar modulation transfer function // J. Geophys. Res. – 2003. – Vol. 108, № C3. 8055 doi: 10.1029/2001JC001004.
30. Кудрявцев В.Н., Малиновский В.В. О влиянии внутренних волн на радиолокационный сигнал при малых углах скольжения // Морской гидрофизический журнал. – 1988, № 6. – С. 3 - 9.
31. Valenzuela G. Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves. A Review // Boundary Layer Meteorology. – 1978. – Vol. 13, № 1-4. – P. 61 - 85.
32. Боев А.Г., Карвицкий Г.Э. К теории радиолокационного контраста морского волнения при наличии пленки поверхностно-активного вещества // Радиофизика и радиоастрономия. – 1997. – Т. 2, № 3. – С. 281 - 287.

33. Малиновский В.В., Кориненко А.Е. Об идентификации загрязнений морской поверхности по радиолокационным данным // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: Сб. научн. тр. Вып. 16 / НАН Украины, МГИ, ИГН, ОФ ИнБЮМ. Редкол.: Иванов В.А. (гл. ред.) и др. – Севастополь, «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – С. 84 - 90.
34. Юровский Ю.Ю., Малиновский В.В., Смолков В.Е. Радиолокационные методы мониторинга прибрежной зоны: возможности и проблемы использования (Серия Современные проблемы океанологии, вып. 4). – Севастополь, НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2008. – 75 с.
35. Опыт проведения в мире спутникового мониторинга загрязнения морской среды. Апрель-ноябрь 2007. Итоговый бюллетень. [Электронный документ]. Сайт Государственного учреждения «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета"» [http://planet.iitp.ru/sea\\_monitor/archive/2007/12/02.htm](http://planet.iitp.ru/sea_monitor/archive/2007/12/02.htm) (Проверено 15.05.2009)
36. Ferraro G. Monitoring sea-based oil pollution in the Black Sea: JRC activities [Электронный документ] <http://www.osce.org/item/32336.html> (Проверено 15.06.2009).
37. Феоктистов А.А., Новикова Н.Н., Пахомов Л.А., Люшин П.В., Захаров А.И., Мартынов С.И., Федичев О.Б., Мирошин А.А. Разработка системы космического мониторинга нефтяных загрязнений морской поверхности // Третья всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 14-17 ноября 2005 г. Труды конференции.
38. Проекты. Радиолокационный мониторинг нефтяных загрязнений северной части Каспийского моря. [Электронный документ]. Сайт ИТЦ «Сканекс» <http://www.scanex.ru/ru/company/default.asp?submenu=about&id=project4> (Проверено 15.06.2009).
39. Спутники на страже экологического благополучия Черного моря. [Электронный документ]. Сайт ИТЦ «Сканекс» [http://www.scanex.com/ru/news/News\\_Preview.asp?id=n21377164](http://www.scanex.com/ru/news/News_Preview.asp?id=n21377164) (Проверено 15.06.2009).
40. Конвенция о защите Черного моря от загрязнения, Бухарест, 21 апреля 1992 г. [Электронный документ]. Сайт «Юридическая Россия» <http://law.edu.ru/norm/norm.asp?normID=1296715> (Проверено 01.06.2009).

УДК 620.91

## О ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГИИ

Киселева С.В.

*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова,**Географический факультет*

Для эффективного продвижения технологий возобновляемой энергетики необходимо - среди других важных проблем - решить задачу создания методов оценки доступных ресурсов возобновляемых энергоисточников. Иными словами необходимы надежные исходные данные и методики их обработки, максимально адекватные потребностям различных отраслей возобновляемой энергетики. Что касается оценок и прогнозов выработки электрической/тепловой энергии установками, использующими солнечную и ветровую энергию, то традиционно основой для таких оценок являлись многолетние измерения наземных метеорологических (в том числе актинометрических) станций. Для России с ее громадной территорией и широким набором климатических зон достоверная оценка потенциала солнечной и ветровой энергии в конкретном географическом районе является крайне важной задачей. Однако имеющаяся в России в настоящее время сеть метеостанций, ведущих регулярные измерения интенсивности солнечной радиации (менее 130 станций), часто недостаточна; причем ее распределение по территории неравномерно, что не вполне отвечает современным потребностям в оценке ресурсов и не обеспечивает возможности надежного расчета показателей разрабатываемых установок. Что касается наземных измерений характеристик ветровой активности, то сеть метеостанций также далеко не всегда позволяет с высокой достоверностью определять параметры ветрового потока в *заданной географической точке*, особенно на высотах более 10 м, что необходимо для современных ветроустановок единичной мощностью до нескольких МВт с ветроколесом, размещаемым на высоте 50 – 100 м.

В настоящее время при оценке ресурсов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) все шире используются дистанционные (спутниковые) методы измерений и математическое моделирование, позволяющие получать более детальные массивы исходной информации, которая обычно предоставляется пользователю в виде баз данных. На сегодняшний день существует значительное число таких компьютерных баз данных. В нашей работе была использована база, разработанная Национальным агентством по авиации и исследованию космического пространства США NASA Surface meteorology and Solar Energy (NASA SSE), первая версия которой появилась в 1997г. Она представляла собой массив данных, полученный на основе спутниковых измерений (за период 1983-1993 гг.) радиационного баланса на верхней границе атмосферы, состояния облачности, концентрации аэрозолей в атмосфере Земли, альbedo земной поверхности, а также математического моделирования особенностей распространения радиации в атмосфере. В настоящее время база данных NASA SSE оперирует массивом результатов спутниковых и наземных измерений за

период 01.07.1983 – 30.06.2005 и путем использования модельных расчетов обеспечивает пользователя широким спектром актинометрических и метеорологических данных, включая характеристики скорости ветра на различных высотах. Этот массив информации преодолевает в определенной степени проблемы наземных измерений, поскольку, будучи основным на длительном периоде наблюдений и имея пространственное разрешение ( $1^\circ \times 1^\circ$ ), дает возможность решить проблему недостатка метеорологических станций и их удаленности друг от друга.

Учитывая преимущества, связанные с использованием современных источников данных, следует принимать во внимание необходимость проведения их верификации с использованием результатов измерений метеостанций России. Такое сравнение позволяет выбрать основу как для расчетов потенциала территорий, так и картографирования элементов этого потенциала. Как следует из описания методологии базы NASA [<http://eosweb.larc.nasa.gov>] при «подгонке» результатов расчетов к результатам наземных измерений разработчики использовали достаточно обширный массив данных метеостанций, однако при этом были использованы только 6 российских станций. Учитывая значительность территории России, а также высокоширотное расположение большей ее части, верификация данных для этой территории приобретает особое значение<sup>9</sup>.

Ранее проводились исследования возможности использования этой базы данных для анализа и картографирования потенциала солнечной энергии на территории России [1,2]. При этом направленность работы определялась практическими потребностями, возникающими при разработке установок солнечной энергетики (солнечных водонагревательных установок, фотоэлектрореобразователей), а также нуждами потребителей солнечной энергии: необходимо было найти фактическую основу для оценок как самой возможности использования солнечных энергоустановок, так и их основных технических параметров в конкретной географической точке часто вдали от метеостанций, ведущих актинометрические измерения. В связи с этим проводилась подробная верификация данных NASA SSE путем сравнения характеристик солнечной радиации для конкретной точки, представленных в базе NASA и в климатических справочниках [3]. Было показано, что при сравнении с более чем 50 актинометрическими станциями в различных регионах России (с широтным расположением от 42 до 70° с.ш.) отклонение данных NASA от наземных измерений не превышает 10-15% в теплые полгода и 30% в холодные, что вполне удовлетворительно для проведения гелиотехнических предпроектных расчетов.

Поскольку база данных NASA SSE определяет и предоставляет доступ к обширному перечню метеорологических величин, логично было бы использовать этот массив данных для картографирования и анализа потенциала ветровой энергии на территории России. Здесь также первым этапом работ стало сравнение данных NASA и наземных метеостанций и обсерваторий по средним скоростям ветра на одинаковых высотах. Из базы NASA SSE были выбраны

<sup>9</sup> Согласно упомянутой методологии, ошибки определения актинометрических и метеорологических параметров возрастают в направлении к полюсам.

скорости ветра на высоте 10 м, поскольку высота флюгерных измерений на метеостанциях обычно составляет 10-16 м. В качестве территории сравнения рассматривался Южный федеральный округ РФ, который в настоящее время в России является регионом, наиболее динамично развивающимся различными направлениями возобновляемой энергетики, в том числе ветровую и солнечную энергетику. На рис.1 показаны характерные результаты сравнения среднемесячных значений скорости ветра по данным метеостанций и данным NASA, приведенным к соответствующим высотам флюгерных измерений. Результаты статистической обработки исходных массивов данных изображены в виде X-Y диаграммы.

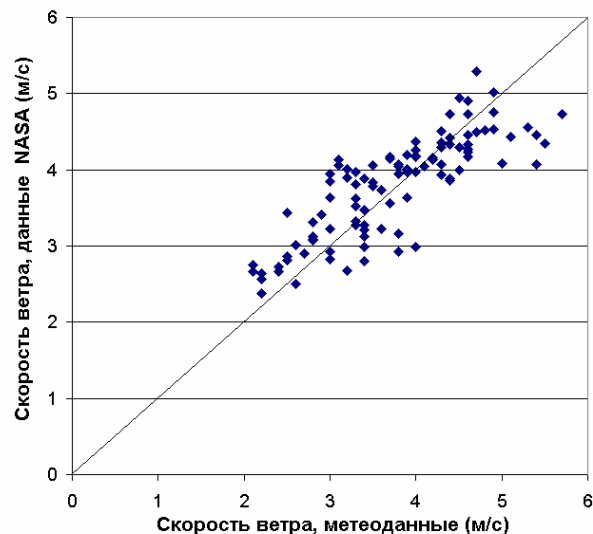


Рис. 1. Диаграмма рассеяния для среднемесячных скоростей ветра, полученных из базы данных NASA и наземных метеонаблюдений (выборка из 9 пунктов наблюдений, метеостанции Южного федерального округа). Результаты статистической обработки данных:  $V_{\text{ср.метео}} = 3.93$  м/с;  $V_{\text{ср. NASA}} = 3.85$  м/с; систематическая погрешность  $RMS = -0.0768$  м/с; среднеквадратичное отклонение  $-0.4317$ ; коэффициент корреляции массивов данных  $K_{\text{корр}} = 0.8181$ ; дисперсия значений (NASA)  $\sigma_{\text{NASA}} = 0.4844$ .

В то же время проведенный качественный анализ по отдельным точкам показал, что в ряде случаев данные метеостанций и результаты спутниковых измерений с последующим математическим моделированием совпадают достаточно удовлетворительно (Таганрог, Астрахань, Волгоград, Сочи, Майкоп). Для других метеостанций (Ставрополь, Ростов-на-Дону, Черкесск) имеет место значительные расхождения, причем не только в абсолютных значениях скоростей ветра, но и в сезонном ходе. Причиной таких расхождений могут явиться

недостатки математического моделирования при разработке базы данных NASA, в частности, неадекватность учета типа подстилающей поверхности или иные обстоятельства.

Далее на основе данных базы NASA SSE были построены карты средних скоростей ветра на высоте 50 м по территории России, а также скоростей ветра на тех же высотах для Южного Федерального округа<sup>10</sup>. Для построения карт была использована программа по созданию, редактированию и анализу картографической и пространственной информации MapInfo Professional 8.0. Все карты были выполнены в конической проекции «Долгота-Широта» VGS 84. Коническая проекция – наиболее приемлемая для территории Российской Федерации – позволяет в дальнейшем проводить оценку суммарного потенциала выбранных территорий и обеспечивать иные приложения картографического материала. Карты дают возможность детально проанализировать распределение средних скоростей ветра на территории Южного Федерального округа по данным NASA SSE. Средние скорости, однако, недостаточны для реальных оценок природного, и, тем более технического потенциала ветровой энергии территорий, которые определяются мощностью ветрового потока и средней выработкой энергии заданным типом ветроагрегата. При определении этих характеристик наиболее значимой является функция повторяемости скорости ветра в заданной точке территории. Поскольку в базе NASA представлены данные по повторяемости, можно перейти к оценке валового потенциала территории, понимая под таковым энергию воздушной струи единичной площади на заданной высоте, а также к оценке элементов технического потенциала, требующих учета характеристик современных типовых ветроэнергоустановок. В работе в качестве основной величины, определяющей характеристики технического потенциала была рассмотрена выработка энергии единичным ветряком заданного типа с оголовком турбины, расположенным на высоте 50 м. (для этой высоты в настоящее время имеются данные по повторяемости скоростей ветра в базе NASA).

Для обоснованного использования данных NASA SSE при расчетах элементов ветропотенциала необходимым становится проведение сопоставления повторяемости скоростей ветра по данным NASA и доступным метеонаблюдениям. Климатические справочники дают информацию о повторяемости лишь ограниченного количества точек в Южном Федеральном округе: Ростов-на-Дону, Сочи, Приморско-Ахтарск, Астрахань, Пятигорск, Грозный. Нами на первом этапе работы были проведены лишь качественный анализ повторяемости для ряда географических точек, поскольку имеется несоответствие высот определения этих величин (NASA – для высоты 50 м., наземные метеорологические станции – для высот флюгерных измерений, не превышающих 20 м.). Было обнаружено, что имеются значимые отличия распределения повторяемостей, которые вполне ожидаемы в связи с различием высот измерений, а также неточным совпадением координат рассматриваемых точек (в базе данных NASA значения привязаны к сетке  $1^\circ \times 1^\circ$ ). В дальнейшем для

<sup>10</sup> Картографическая обработка данных была проведена младшим научным сотрудником НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ Рафиковой Ю.Ю.

более точных сравнений предполагается провести для наземных данных процедуру «подъема» повторяемости на высоту 50 м. по существующим методикам [5].

В целях получения конкретных оценок технического потенциала ветровой энергии с применением массива данных NASA для территории Южного федерального округа РФ были рассчитаны значения выработки электрической энергии тремя типами ветряков высотой 50 м и мощностью 150 кВт (модель NORDEX N 27–50), 600 кВт (модель VESTAS V44-50) и 1300 кВт (NORDEX N 60-50). По расчетным данным были построены карты выработок ветровой энергии на территории Южного федерального. Обнаружено, что для всех трёх типов ветроагрегатов наибольшими значениями выработок характеризуются районы Ростовской области, Ставропольского и Краснодарского края. Более низкие, но также имеющие промышленное значение, показатели выработки в Волгоградской области и на Каспийском побережье. Наименьшие значения – на Черноморском побережье, в Астраханской области, а также в северной части Волгоградской области. Видно, что наибольшие значения выработок присущи равнинным низменным территориям. Однако Астраханская область, расположенная в Прикаспийской низменности, характеризуется, согласно полученным результатам невысокими показателями выработок. Это не соответствует общей картине распределения средних скоростей ветра, что показывает значимость учета распределения повторяемости для адекватного отражения валового и технического потенциалов. Таким образом, для оценки ветровой обстановки над территорией, т.е. для интегральных оценок, использование базы данных NASA, по-видимому, является оправданным. Однако, при «точечных» расчетах, т.е. обоснованиях локального ветропотенциала, необходимо использовать наземные измерения – многолетние метеоданные или результаты специально проводимого *ветромониторинга* [4].

В России имеется весьма небольшой опыт проведения такого ветромониторинга. Так, в период 06.12.2007–12.12.2008 г был проведен комплексный ветромониторинг на побережье Ейского лимана Азовского моря для подтверждения целесообразности строительства Ейской ВЭС. Город Ейск - промышленный и курортный центр, морской порт на берегу Азовского моря. Имея прямой выход к международным морским путям, он реализует интересы России и Краснодарского края в зоне черноморского и средиземноморского экономического сотрудничества. Социально-экономическое развитие города в последние годы характеризуется динамичным формированием потребительского рынка, активным развитием курортно-гостиничной сферы, усилением роли малого и среднего бизнеса, относительной стабильностью финансовой системы, рынка труда. С целью удешевления электро- и теплоэнергии для потребителей города реализуется инвестиционный проект строительства газопоршневой теплоэлектростанции мощностью 12 МВт, а также рассматривается вопрос создания крупной ветроэлектрической станции мощностью 50...100 МВт.

Основной задачей ветромониторинга являлось получение ветровых характеристик, а именно средних скоростей ветра и их временной динамики, профилей ветра по высоте, повторяемости скоростей ветра и др. Система ветромониторинга была установлена на мачтах HiMast класса 1 высотой 70 м (фирма–производитель NexGen, UK) близ населенных пунктов Краснофлотский,

Симоновка и Широцанка. Измерительные мачты находились на расстояниях 5–6 км друг от друга, образуя почти равносторонний треугольник. Наиболее близкая точка к морю – Широцанка, что обуславливает более высокие средние скорости ветра в этой точке. Самая удаленная от моря точка – Симоновка. Все мачты были установлены на ровной площадке, так же как и метеостанция аэропорта г.Ейска, с данными измерений которой проводилось сравнение результатов ветромониторинга. На мачтах был поставлен регистратор данных ветровой энергии Nomad 2. В комплекс измеряемых величин входили: скорость ветра, направление ветра, температура воздуха. Измерения величин проводились на 4 уровнях – 40, 50, 60, 70 м. Характерный временной интервал измерений – 10 мин. Дальнейшая обработка полученных первичных данных осуществлялась с использованием программы NOMAD 2 DESKTOP (Second Wind. Inc.,US). Авторами были проведены расчеты и анализ полученных данных, в частности, предполагаемой выработки электроэнергии заданными типами ветроагрегатов (ENERCON E-82; GAMESA G-90; VESTAS V-90, WICOV Wind W2000spg-WT86, WICOV Wind W2000spg-WT92.5).

Для обработки и анализа результатов использовались также данные измерений скорости ветра, полученные на метеообсерватории аэропорта г.Ейска в тот же период. Аэропорт находится на небольшом удалении от площадки ВЭС, причем ландшафт местности в целом имеет абсолютно плоский, степной характер. Кроме того, доступными были данные Северокавказского гидрометцентра (СК ГМЦ) о ветровом режиме в районе г. Ейска, осредненные за период 1992–2006 гг. (высота измерений в обоих случаях составляла 16,5 м). Анализ результатов измерения годовой хода скоростей ветра на высотах измерения в п. Краснофлотский показал, что вариации скорости практически синхронны на высотах 40, 50, 60, 70 м. При этом среднемесячные значения скоростей ветра по результатам измерений СК ГМЦ по г.Ейску демонстрируют некоторое сходство с сезонным ходом скоростей ветра, полученным при ветромониторинге, в частности, наличие летнего минимума. Однако многолетние данные СК ГМЦ не отражают высокочастотные колебания сезонного хода скоростей ветра на пунктах измерения.

Поскольку важнейшим вопросом для оценки ветропотенциала является получение достоверных данных о характеристиках ветра на уровне ветроколеса, дальнейшие расчеты и оценки были посвящены определению характеристик профилей скорости ветра. Для каждого месяца были рассчитаны средние значения скорости ветра на высотах измерений и проведены аппроксимации профилей ветра над поверхностью земли. Для современных ветроэнергоустановок (ВЭУ) мегаваттного класса с высотами башен 80–100 м необходимо учитывать нелинейность высотного профиля скорости в приземном 100-метровом слое, поэтому для расчетов используются либо степенная, либо логарифмическая зависимости. При обработке результатов ветромониторинга были получены аппроксимации вида:  $V(z) = V_0 \cdot \ln(z/z_0)$  и  $V(z)/V(z_1) = (z/z_1)^m$ .

Для обоснования возможности использования данных годичного ветромониторинга для проведения оценок ветропотенциалов было также проведено сопоставление результатов аппроксимаций текущих измерений на высоту 16,5 м с многолетними метеорологическими наблюдениями. Именно эта процедура, как представляется, позволяет провести некоторые сравнения

полученных данных с результатами измерений на метеообсерватории аэропорта г. Ейска, которая находится в 15-18 км от площадок ветромониторинга, и многолетними данными Северокавказского гидрометцентра. Следует учитывать, что параметры скоростей ветра, получаемые на МО аэропорта г. Ейска, округлены с точностью  $\pm 1$  м/с. Поэтому можно считать, что в пределах указанной погрешности построенные аппроксимации и данные реальных измерений на высоте 16.5 м совпадают. Таким образом, результаты проведенного годовичного ветромониторинга соответствуют общему характеру вариаций среднемесячных скоростей ветра по данным многолетних измерений, а расчетные значения (аппроксимации) на высотах флюгерных измерений в пределах погрешности количественно совпадают с данными метеообсерватории. Это дает определенное обоснование прогнозных оценок ветропотенциала по результатам краткосрочного ветромониторинга и доказывает возможность использования при расчетах ветропотенциала на площадке строительства ВЭС многолетних данных СК ГМЦ.

На основании полученных результатов и сравнений были проведены расчеты выработки энергии для заданных типов ветроагрегатов на высоте ветроколеса 100 м. Расчеты проводились на основе подъема эмпирической повторяемости скоростей ветра на заданную высоту [Национальный кадастр..., 2007]. Были получены как среднемесячные, так и годовые оценки выработки электрической энергии. За год в целом они составили (для ветроагрегата Егерсон Е-82 мощностью 2 МВт): Краснофлотский – 5600 ÷ 6800 МВтч, Симоновка – 5500÷6000 МВтч, Широцанка – 5500÷6200 МВтч. При этом в течение года выработка возрастала от минимума в летние месяцы (июнь, п. Симоновка – 200÷220 МВтч) до максимума зимой (январь, п. Симоновка – 720÷780 МВтч), что отражает внутригодовые изменения скорости ветра. Полагая среднее значение годовой выработки равное (Симоновка) 5700 МВтч электроэнергии и прогнозную установленную мощность ВЭУ 50 МВт, можно оценить общую годовую производительность станции в 142 500 МВтч.

Таким образом, в работе были намечены подходы к расчетам и анализу распределения элементов ветропотенциала с использованием детальных массивов, полученных как с помощью кратковременного ветромониторинга непосредственно в заданной географической точке, так и современными дистанционными (спутниковыми) методами измерения и математического моделирования. Полученные в ходе работы выводы требуют дальнейшего анализа, однако уже на данном этапе очевидно, что применение дистанционного метода при оценке природно-ресурсного и технического потенциала ветровой энергии может стать важным элементом комплексного подхода к решению данной проблемы.

#### Литература

1. Киселева С.В., Попель О.С., Фрид С.Е. О возможности использования дистанционных методов для оценки потенциала солнечной и ветровой энергии // Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. 2008. Т.13. №3. С. 134-142.
2. Коломиец Ю.Г., Попель О.С., Фрид С.Е. Эффективность использования солнечного излучения для нагрева воды на территории Российской Федерации // Альтернативная энергия и экология. 2009. № 6(74). С. 16-23.

3. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1990.
4. Левакова М.А., Киселева С.В. Анализ результатов ветромониторинга на площадке предполагаемого строительства Ейской ВЭС // Возобновляемые источники энергии. Материалы докладов 6-ой Всероссийской научной молодежной школы (25-27 ноября 2008г.). М.: Университетская книга, 2008. Ч.1. С.150-154.
5. Национальный Кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения // Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Под редакцией канд. физ.-мат. наук Николаева В.Г. – М.:Изд-во «Атмограф», 2007. 596 с.

#### КРИТЕРИИ КОНВЕКТИВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ЛОКАЛИЗОВАННОЙ КОНВЕКЦИИ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ

Кистович А.В.

ФГУП «ВНИИФТРИ».

Хорошо известно [1], что характер поведения неоднородной жидкости в поле силы тяжести зависит от термодинамических характеристик среды и степени возмущения её плотности. При малых возмущениях переход системы к равновесному состоянию осуществляется путем диффузионных процессов. В случае больших возмущений возможно возникновение конвективных течений в среде. В качестве параметра, разграничивающего эти режимы, зачастую используется критерий Рэлея для однокомпонентных сред

$$Ra_T = g\alpha \Delta T d^3 / \nu \chi = g\alpha \gamma_T d^4 / \nu \chi \quad (1)$$

$$Ra_S = g\beta \Delta S d^3 / \nu \kappa = g\beta \gamma_S d^4 / \nu \kappa$$

где  $g$  – гравитационное ускорение,  $\alpha, \beta$  – коэффициенты температурного расширения и солевого вклада в плотность,  $\nu, \chi, \kappa$  – коэффициенты кинематической вязкости, температуропроводности и диффузии соли соответственно,  $d$  – характерный вертикальный размер среды,  $\Delta T, \Delta S$  – характерные температурный и солевой перепады между границами среды,  $\gamma_T, \gamma_S$  – градиенты температурной и солевой стратификаций.

Превышение этими числами определенных критических значений принимается в качестве условия начала конвективного движения.

Менее известен тот факт, что критерий (1) входит в противоречие с экспериментально наблюдаемыми явлениями [2]. Кроме того, (1) не учитывает размеры области, в которой возникло возмущение равновесного состояния среды (на интуитивном уровне ясно, что степень конвективной неустойчивости зависит от соотношения между запасенной энергией возмущения и способности среды перераспределять эту энергию в окружающие жидкие элементы).

В данной работе предлагаются измененные критерии Рэлея для среды с температурной и слоевой стратификациями, определяющие как условия

абсолютной конвективной неустойчивости, так и критерии локализованной конвекции.

Рассматривается стратифицированная жидкость, находящаяся в поле силы тяжести. Исходные солевая и температурные стратификации задаются соотношениями

$$T_s(z) = T_0 + \gamma_T z, \quad S_s(z) = S_0 + \gamma_S z \quad (2)$$

где  $z$  – вертикальная ось, направленная против вектора гравитационного ускорения.

Пусть в начальный момент времени  $t=0$  на уровне  $z=0$  возник сферический элемент жидкости радиуса  $R$ , средняя плотность которого  $\bar{\rho}(0) = \rho_0(1 + \beta \bar{S}(0) - \alpha \bar{T}(0))$  меньше плотность окружающей среды на том же уровне  $\rho_s(0) = \rho_0(1 + \beta S_s(0) - \alpha T_s(0)) = \rho_0(1 + \beta S_0 - \alpha T_0)$ . Под действием архимедовой  $\mathbf{F}_A$  силы этот элемент начнёт подниматься вверх. Как результат его движения возникает сила трения  $\mathbf{F}_V$ , замедляющее продвижение легкой жидкости. Во время своего подъёма жидкий элемент обменивается теплом и солью с окружающей средой, в результате чего в момент времени  $t$ , когда он оказывается на уровне  $z(t)$ , его средняя плотность равна  $\bar{\rho}(t) = \rho_0(1 + \beta \bar{S}(t) - \alpha \bar{T}(t))$ , а плотность окружающей среды –  $\rho_s(t) = \rho_0(1 + \beta S_0 - \alpha T_0 + (\beta \gamma_S - \alpha \gamma_T)z(t))$ .

Таким образом, если на уровне  $z=0$  запас плавучести элемента среды над остальной её частью составлял величину  $\alpha(\bar{T}(0) - T_0) - \beta(\bar{S}(0) - S_0)$ , то на уровне  $z(t)$  это превышение равно  $\alpha(\bar{T}(t) - T_0 - \gamma_T z(t)) - \beta(\bar{S}(t) - S_0 - \gamma_S z(t))$ . Условие поддержания незатухающего конвективного всплытия элемента среды (условие возникновения абсолютной конвективной неустойчивости) можно представить в виде

$$\frac{\alpha(\bar{T}(t) - T_0 - \gamma_T z(t)) - \beta(\bar{S}(t) - S_0 - \gamma_S z(t))}{\alpha(\bar{T}(0) - T_0) - \beta(\bar{S}(0) - S_0)} \geq 1 \quad (3)$$

или в обобщенной форме

$$\frac{\alpha(\bar{T}(t_2) - T_s(t_2)) - \beta(\bar{S}(t_2) - S_s(t_2))}{\alpha(\bar{T}(t_1) - T_s(t_1)) - \beta(\bar{S}(t_1) - S_s(t_1))} \geq 1 \quad (4)$$

Для того чтобы придать соотношениям (3, 4) явный вид, необходимо определить законы всплытия (координату  $z(t)$  центра масс) и тепломассообмена (средние температуру  $\bar{T}(t)$  и солёность  $\bar{S}(t)$ ) выделенного элемента жидкости.

Движение перегретого элемента среды определяется вторым законом Ньютона и начальными условиями

$$\bar{\rho}(t) V z'' = \mathbf{F}_A + \mathbf{F}_V, \quad z'|_{t=0} = z|_{t=0} = 0 \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $V$  – объём всплывающего элемента, штрих обозначает дифференцирование по времени.

В используемой приближенной модели сила Архимеда определяется выражением

$$\mathbf{F}_A = g \rho_0 V [\alpha(\bar{T}(t) - T_s(t)) - \beta(\bar{S}(t) - S_s(t))] \quad (6)$$

а сила вязкого сопротивления – соотношением

$$\mathbf{F}_V = -K_f \pi \rho(t) R v z' \quad (7)$$

где коэффициент  $K_f$  определяет пропорциональность при движении жидкого элемента в жидкости (в случае твёрдой сферы  $K_f = 6$  – формула Стокса). Подстановка (6, 7) в (5) с использованием приближения Буссинеска и с учётом того, что  $V = 4\pi R^3/3$ , преобразует уравнение движения к форме

$$z'' = g [\alpha(\bar{T}(t) - T_s(t)) - \beta(\bar{S}(t) - S_s(t))] - \frac{3K_f v}{4R^2} z', \quad z'|_{t=0} = z|_{t=0} = 0 \quad (8)$$

Для придания уравнению (8) явного вида необходимо определить зависимости средних температуры и солёности элемента от времени. С этой целью используется упрощенная модель тепломассообмена сферического элемента, который “обтекает” окружающая среда. Задание плотностей потоков тепла и соли  $j_T \approx -\chi(\bar{T}(t) - T_s(t))/L_\chi$ ,  $j_S \approx -\kappa(\bar{S}(t) - S_s(t))/L_\kappa$  во внешнюю среду, где  $L_\chi$ ,  $L_\kappa$  – характерные расстояния тепловой и солевой диффузий, приводит к уравнениям для средних значений температуры и солёности всплывающего элемента

$$\bar{T}' = -\chi \frac{\bar{T}(t) - T_s(t)}{L_\chi^2}, \quad \bar{T}|_{t=0} = \bar{T}(0); \quad \bar{S}' = -\kappa \frac{\bar{S}(t) - S_s(t)}{L_\kappa^2}, \quad \bar{S}|_{t=0} = \bar{S}(0) \quad (9)$$

Решения этих уравнений

$$\begin{aligned} \bar{T}(t) &= \left( \bar{T}(0) - \frac{\chi}{L_\chi^2} \int_0^t T_s(\tau) \exp(\chi \tau / L_\chi^2) d\tau \right) \exp(-\chi t / L_\chi^2) \\ \bar{S}(t) &= \left( \bar{S}(0) - \frac{\kappa}{L_\kappa^2} \int_0^t S_s(\tau) \exp(\kappa \tau / L_\kappa^2) d\tau \right) \exp(-\kappa t / L_\kappa^2) \end{aligned} \quad (10)$$

позволяют придать (8) явный вид

$$\begin{aligned} z'' &= \alpha g \left( \Delta T - \gamma_T \int_0^t z'(\tau) \exp(\chi \tau) d\tau \right) \exp(-\chi t) - \\ &- \beta g \left( \Delta S - \gamma_S \int_0^t z'(\tau) \exp(\kappa \tau) d\tau \right) \exp(-\kappa t) - v z' \end{aligned} \quad (11)$$

$$z|_{t=0} = z'|_{t=0} = 0, \quad \Delta T = \bar{T}(0) - T_0, \quad \Delta S = \bar{S}(0) - S_0$$

В (11) для сокращения записи введены нормированные кинетические коэффициенты  $\chi \equiv \chi/L_\chi^2$ ,  $\kappa \equiv \kappa/L_\kappa^2$  и  $v \equiv v/L_\chi^2$ , где  $L_\chi^2 = 4R^2/3K_f$ .



Исключение интегральных членов сводит (11) к виду

$$z^{IV} + (\chi + \nu + \kappa) z''' + (g(\alpha \gamma_T - \beta \gamma_S) + \nu \chi + \chi \kappa + \kappa \nu) z'' + (g(\alpha \kappa \gamma_T - \beta \chi \gamma_S) + \kappa \chi \nu) z' = 0$$

$$z|_{t=0} = z'|_{t=0} = 0, \quad z''|_{t=0} = g(\alpha \Delta T - \beta \Delta S) \quad (12)$$

$$z'''|_{t=0} = g(\beta(\kappa + \nu)\Delta S - \alpha(\chi + \nu)\Delta T)$$

Свойства возможных решений (12), то есть наличие или отсутствие конвективной неустойчивости среды, ограниченность конвективного течения и т.п., зависят от допустимых решений  $\lambda$  характеристического уравнения

$$\lambda = 0, \quad \lambda^3 + a\lambda^2 + b\lambda + c = 0, \quad a = \chi + \nu + \kappa \quad (13)$$

$$b = g(\alpha \gamma_T - \beta \gamma_S) + \nu \chi + \chi \kappa + \kappa \nu, \quad c = g(\alpha \kappa \gamma_T - \beta \chi \gamma_S) + \kappa \chi \nu$$

соответствующего уравнению (12).

Физически реализуемое развитие абсолютной конвективной неустойчивости имеет место, если хотя бы один из корней (13) обладает свойствами:  $\text{Re}(\lambda) > 0$ ,  $\text{Im}(\lambda) = 0$ . Эти условия выполняются, когда справедливо соотношение

$$c < \frac{a^3}{27} (2x^3 - 3x^2 + 1) \mathcal{G}(-b), \quad x = \sqrt{1 - 3b/a^2} \quad (14)$$

где  $\mathcal{G}(x)$  – функция Хевисайда. Как и в (1), критерий Рэля (14) для среды с температурной и солевой стратификациями налагает условия на величины стратифицирующих градиентов. Для упрощения анализа (14) вводятся обозначения

$$p = g \alpha \gamma_T, \quad q = g \beta \gamma_S, \quad r = \nu \chi + \chi \kappa + \kappa \nu$$

Поскольку правая часть соотношения (14) заведомо неотрицательна, его справедливость достигается при выполнении условия  $c < 0$  при любых значениях  $b$ . На рис. 1 и 2, выполненных для случаев  $\kappa > \chi$  и  $\kappa < \chi$  соответственно, граница  $c = 0$  изображена синим цветом. Еще одна характеристическая граница  $b = 0$ , разграничивающая области нулевых ( $b \geq 0$ ) и положительных значений правой части (14), представлена красным цветом. В области  $c > 0 \cup b > 0$  соотношение (14) невыполнимо, что отвечает подавлению конвективных движений. Остается область  $c > 0 \cup b < 0$ , в которой возможно выполнение критерия (14).

В случае  $\kappa > \chi$  точка пересечения границ  $c = 0$  и  $b = 0$  имеет координаты  $p_* = \chi^2 \frac{\kappa + \nu}{\kappa - \chi}$ ,  $q_* = \kappa^2 \frac{\chi + \nu}{\kappa - \chi}$ . Если в этой точке разместить

начало системы координат  $(x, y)$ , такую что  $p = p_* + a_1^2 x$ ,  $q = q_* + a_1^2 y$ , то условие (14) приобретает вид

$$27(\kappa x - \chi y) - (\chi + \kappa + \nu)(2s^3 - 3s^2 + 1) < 0, \quad s = \sqrt{1 - 3(x - y)} \quad (15)$$

Равенство нулю левой части (15) определяет границу области неустойчивости, изображенную зеленым цветом.

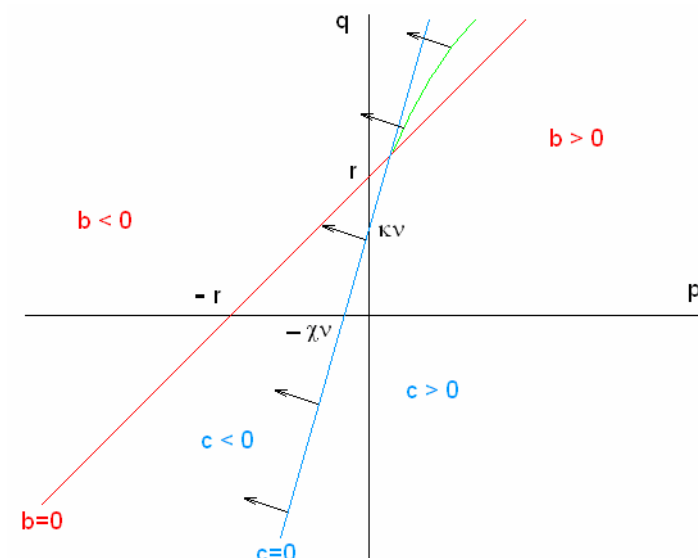


Рис.1. Области конвективной неустойчивости при  $\kappa > \chi$ .

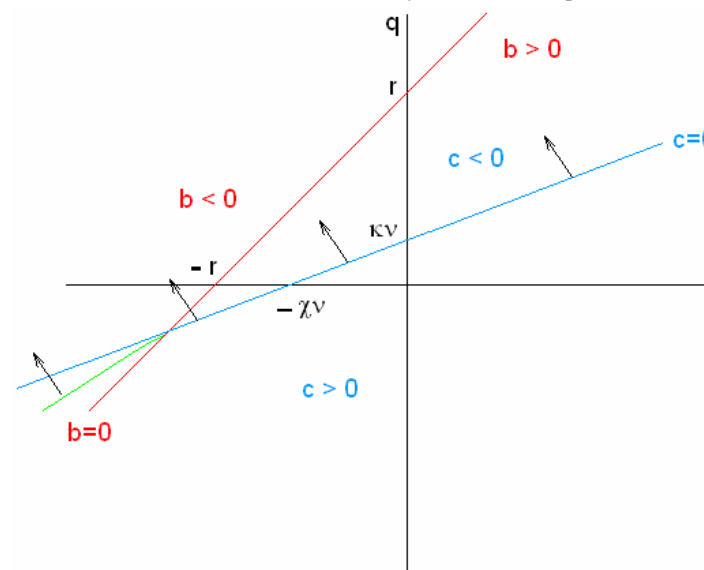


Рис.2. Области конвективной неустойчивости при  $\kappa < \chi$ .

Аналогичный анализ для случая  $\kappa < \chi$  приводит к построению, изображенному на рис. 2. Черные стрелки на обоих рисунках направлены от границы вглубь области неустойчивости.

В области между синей и зеленой границами критерий Рэлея имеет довольно сложную формулировку. При  $c < 0$  его вид существенно упрощается

$$-\frac{g(\alpha \kappa \gamma_T L_\chi^2 - \beta \chi \gamma_S L_\kappa^2) L_v^2}{\kappa \chi v} > 1 \quad (16)$$

При отсутствии примеси в среде ( $\kappa = \infty$ ), критерий (16) переходит в критерий для температурно-стратифицированной среды

$$-\frac{g \alpha \gamma_T L_\chi^2 L_v^2}{\chi v} > 1 \quad (17)$$

из которого следует необходимость наличия температурной инверсии.

Для изотермического случая ( $\chi = \infty$ ) имеет место

$$\frac{g \beta \gamma_S L_\kappa^2 L_v^2}{v \kappa} > 1 \quad (18)$$

что требует инверсии солёности.

Необходимо также отметить, что в предельном случае ( $\kappa = \infty, \chi = \infty$ ) область, заключенная между синей и зеленой границами, исчезает, что означает полноту условий (17) и (18) для однокомпонентной конвекции.

Полученные критерии описывают те условия, при которых развивающаяся конвекция постепенно охватывает всю область, занимаемую средой. Однако данные соотношения не могут описывать возникновение локализованной конвекции, например, конвекция в виде “новогодней ёлки” [3] от точечного источника тепла в жидкости с солевой стратификацией. Критерий (14) для таких процессов является слишком сильным условием.

Поскольку в данном случае абсолютная конвективная неустойчивость среды запрещена, соотношение (14) необходимо обратить, так что необходимое условие локализованной конвекции имеет вид

$$c > \frac{a^3}{27} (2x^3 - 3x^2 + 1) g(-b), \quad x = \sqrt{1 - 3b/a^2} \quad (19)$$

Второе условие задает ограничение снизу на интенсивность конвекции. Если определить высоту конвективного подъема предельным значением  $\lim_{t \rightarrow \infty} |z(t)|$  для решения (12) и отнести ее к радиусу жидкой частицы  $R$ , то в качестве второго

условия, входящего в критерий локализованной конвекции, можно выбрать условие

$$\frac{\lim_{t \rightarrow \infty} |z(t)|}{R} = \frac{g |\alpha \kappa L_\chi^2 \Delta T - \beta \chi L_\kappa^2 \Delta S| L_v^2}{R |g(\alpha \kappa L_\chi^2 \gamma_T - \beta \chi L_\kappa^2 \gamma_S) L_v^2 + \kappa \chi v|} = B > 1 \quad (20)$$

В случае одной лишь температурной стратификации среды соотношения (19, 20) упрощаются к виду

$$-\frac{\alpha g \gamma_T L_v^2 L_\chi^2}{v \chi} = A < 1, \quad \frac{\alpha g |\Delta T| L_v^2 L_\chi^2}{v \chi R(1-A)} = B > 1 \quad (21)$$

а в изотермической среде имеет место

$$\frac{g \beta \gamma_S L_\kappa^2 L_v^2}{v \kappa} = A < 1, \quad \frac{\beta g |\Delta S| L_v^2 L_\kappa^2}{v \kappa R(1-A)} = B > 1 \quad (22)$$

Величина  $B$  во всех соотношениях задает интенсивность локализованной конвекции.

Как видно из полученных результатов, в предлагаемые критерии входят не только градиенты равновесных стратификаций температуры и солёности, но и величины начальных перегревов  $\Delta T$  и избыточных солёностей  $\Delta S$ , средний размер  $R$  области возмущения, а также характерные масштабы вязких  $L_v$  и диффузионных  $L_\chi, L_\kappa$  процессов, влияющих на динамику теплообмена.

### Литература

1. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкости. М.: Мир, 1977, 170 с.
2. Benard H. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquid transportant de la chaleur par convection en regime permanent. – Ann. Chem. Phys., 1901, V. 23, P. 62-144.
3. Чашечкин Ю.Д., Беляев В.С. Режимы свободной термоконцентрационной конвекции над точечным источником тепла. – ДАН СССР, 1982, Т.267, №3, С. 574-577.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ  
ЧИСЛЕННОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА В Р. МОСКВЕ

К. А. Корчагин\*, Е. М. Мессинева\*\*.

\*Учреждение Российской академии наук Институт водных проблем РАН,

г. Москва

\*\*«МАТИ» - Российский государственный технологический университет им.

К.Э.Циолковского, г.Москва

Исследованы вероятностные характеристики стохастической динамики изменения численности фитопланктона в воде москворецкого водоисточника, определен характер асимптотического поведения функций распределения и спектральных показателей соответствующего случайного процесса, предложена динамическая интерпретация полученных соотношений.

Современные масштабы использования человеком природных ресурсов, таких как пресная вода, остро ставят вопрос об оценке рисков, которые влекут неожиданные изменения характеристик процессов, протекающих в окружающей среде, и объема средств, необходимых для купирования их. Потребность в снижении последних при сохранении достаточного уровня надежности использующих их технологических процессов определяет задачу максимально точного прогноза вероятности указанных событий. Количество фитопланктона, содержащегося в воде, является одним из главных контролируемых показателей качества воды, определяющих характер принимаемых решений и объем используемых ресурсов при решении задач водоснабжения. В настоящей статье рассмотрено поведение статистических характеристик численности фитопланктона на эмпирическом материале исследований речной воды, поступающей на Западную станцию водоподготовки г. Москвы (ЗСВ — МГУП "Мосводоканал") в связи с сезонными особенностями динамики указанной величины.

Одна из задач данной работы состоит в выявлении особенностей экстремального поведения указанного показателя (цветение фитопланктона). Другая задача связана с выявлением связи статистических характеристик, описывающих эти особенности с законами, управляющими стохастической динамикой изменения численности фитопланктона. В качестве основы статистического описания, использовались функции распределения изучаемой величины. Знание таковых является необходимой составляющей информационного обеспечения многих производственных задач, связанных с управлением технологическими процессами.

В настоящей работе исследовалась статистика общего содержания фитопланктона без дифференцирования его на группы или таксономические единицы, поскольку именно подобного характера данными располагают, обычно, предприятия водоснабжения и именно этот показатель является для них нормативно определенным.

Второй исследованной характеристикой является спектральная плотность случайного процесса, который представляет собой изменение численности фитопланктона. Она позволяет вычлнить в нем временные зависимости, определить факторы каких временных масштабов участвуют в формировании изменчивости численности фитопланктона

Исходный временной ряд численности фитопланктона представлен на Рис. 1. На графике отчетливо видны ее пики, отвечающие периодам летнего цветения фитопланктона, которое начинается в мае и сопровождается весь летне-осенний период. Факторами, определяющими интенсивность развития водорослей, служат температура, освещенность, концентрацией биогенных элементов (в первую очередь азота и фосфора), а также численностью выедающего их зоопланктона, наличием субстрата развития в виде зарослей макрофитов. Годовые максимумы фитопланктона представлены в таблице:

Год	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Фито- планктон, тыс. кл/см	42.9	98.2	89.4	41.0	46.9	96.8	79.8	34.6	64.8	93.0	207.2	140.0

Наблюдаемое поведение численности фитопланктона, как случайной величины, обусловлено, в первую очередь, флуктуациями факторов влияющих на интенсивность его размножения. Основываясь на приближении экспоненциального роста численности фитопланктона при постоянных условиях, флуктуации его численности более наглядно можно представить в логарифмических координатах (Рис. 2). На графике зрительно можно вычлнить три периода приблизительно одинакового поведения численности фитопланктона: зимнего минимума, фазы активного изменения численности при весеннем росте и осеннем отмирании и летних флуктуаций вблизи максимального значения.

В последние годы, как видно их таблицы, численность фитопланктона в пике достигала величины превышающей 100 и даже 200 тыс. см<sup>-3</sup>, что заметно осложняет работу сооружений водоподготовки. Кроме того, в процессе своей жизнедеятельности некоторые виды фитопланктона выделяют токсичные продукты метаболизма.

Особенностью Москворецкой водной системы является сочетание водохранилищ и русловых участков реки, где развиваются разные виды фитопланктона. Так, в водохранилищах в период цветения преобладают синезеленые водоросли (до 90% по биомассе) [11, 12]. При попадании в русло р. Москвы они элиминируются, и численность клеток падает. Далее по течению (ниже устья р. Рузы) численность фитопланктона вновь увеличивается. При этом возрастает роль хлорококковых, синезеленых и зеленых водорослей. Однако после впадения р. Истры численность клеток вновь падает. Такие изменения численности связаны с изменением характера биотопа, главным образом, наличием погруженных макрофитов, которые конкурируют за биогенные вещества и солнечный свет. В русле реки формируется автохтонный комплекс водорослей, который описан в работе [2], тогда как аллохтонные виды, характерные для водохранилищ, плохо переносят условия потока и быстро выпадают из планктона реки.

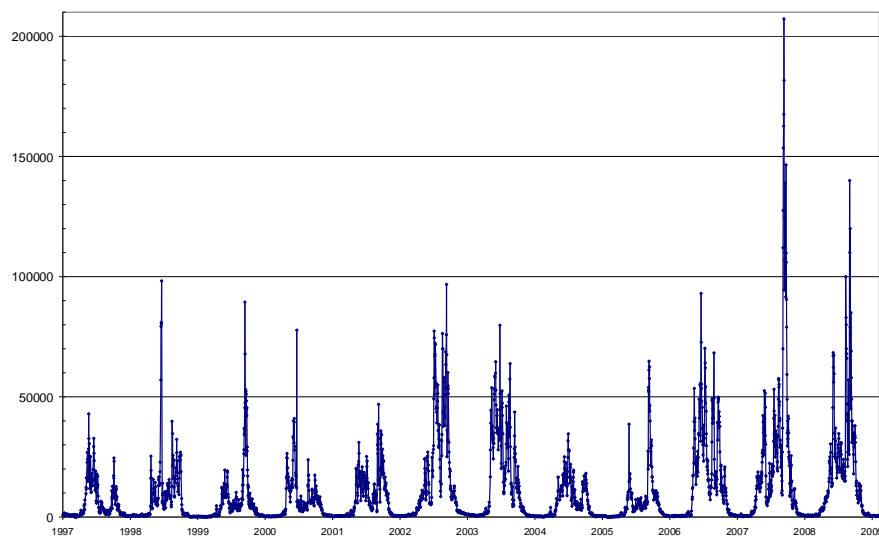


Рис. 1 Временной ряд численности фитопланктона в натуральных единицах.

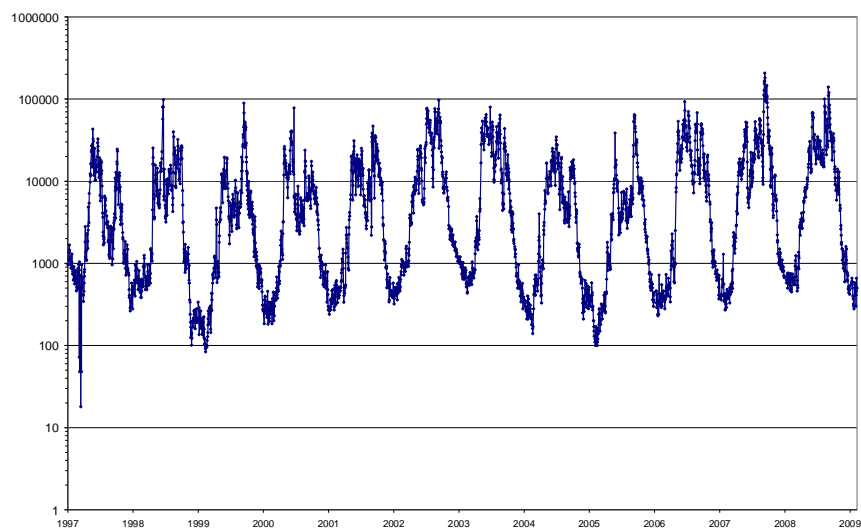


Рис. 2 Временной ряд логарифма численности фитопланктона

В сумме в пробах в течение всего периода наблюдений было обнаружено 160 видов представителей фитопланктона; из которых 20 относится к отделу *Cyanophyta* (сине-зеленые водоросли), 65 — к *Chlorophyta* (зеленые водоросли), 7 — к *Euglenophyta* (эвгленовые), 2 — к отделу *Cryptophyta* (криптофитовые), остальные относятся к отделу *Heterokontophyta* (разножгутиковые), в том числе 61 вид из класса *Bacillariophyceae* (Диатомовые), 3 — из *Dinophyceae* (динофитовые), 2 — к *Chrysophyceae* (золотистые) (систематика указывается по [3]). В целом эти данные не противоречат данным других исследователей по фитопланктону р. Москва [3, 5], однако они отражают повышенную эвтрофикацию воды в зоне забора проб.

В этот период численность фитопланктона может достигать величины превышающей 100 и даже 200 тыс. кл/см<sup>3</sup>, что заметно осложняет работу сооружений водоподготовки. Кроме того, это свидетельствует о том, что фитопланктон в этот период практически полностью представлен синезелеными водорослями (см. Рис. 3). Такие значения численности цианобактерий можно охарактеризовать, как потенциально токсичные, поскольку они значительно превышают значение в 20000 кл/см<sup>3</sup>, при котором ВОЗ рекомендует проведение обязательного контроля [9], даже если, как в р.Москве, не обнаружено водорослевых токсинов. На образования цианобактериальных токсинов могут влиять такие факторы, как рН среды (оптимальные значения 8,5 – 10), температура (оптимум – 25 –28°C), повышение содержания азота (особенно аммонийного) и фосфора в воде, связанного с загрязнениями. [10, 11] Существенно также, что обогащение воды прижизненными метаболитами и продуктами разложения клеток при их массовом отмирании ухудшает органолептические свойства воды (запах, привкус), а также способствует росту содержания вредных побочных продуктов хлорирования и озонирования воды (хлорорганические соединения, альдегиды, кетоны и др.).

Стоит отметить, что хотя в норме подобная флора свойственна водохранилищам [5, 6], она часто наблюдается в реках с зарегулированным стоком [11], характеризующихся повышенной эвтрофикацией, таких как р.Москва в ее нижнем течении. Для данного водоема подобное явление наблюдается с начала 1970 годов, причем отмечается, что, массовое развитие фитопланктона в реке не всегда связано с таковым в водохранилищах [4]. При этом общее количество клеток фитопланктона в реке в летне-осенний период с течением времени (с годами) продолжает увеличиваться. Скорее всего, основной причиной этого явления служит резкое повышение антропогенной нагрузки на водосборную площадь реки по всей ее длине, связанное с интенсификацией сельского хозяйства и жилищного строительства, а, следовательно, с увеличением количества бытовых и промышленных сточных вод [4]. Сходные явления отмечаются с конца 1960-х годов и для второго водоисточника города Москвы, реки Волги [11].

Осенью, по мере охлаждения воды, в воде снижается количество сине-зеленых водорослей, в речной воде вновь появляются холодолубивые диатомые, возможно даже второе диатомовое цветение [3].

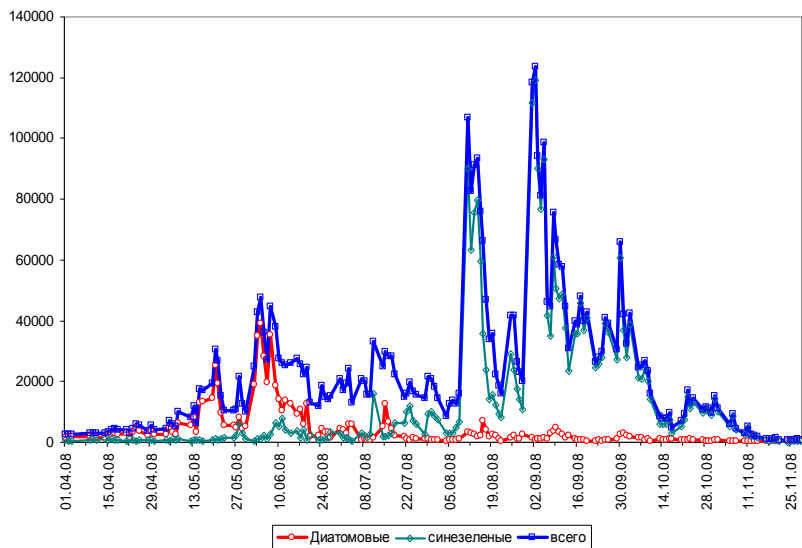


Рис. 3. Вклад различных групп фитопланктона в его общую численность.

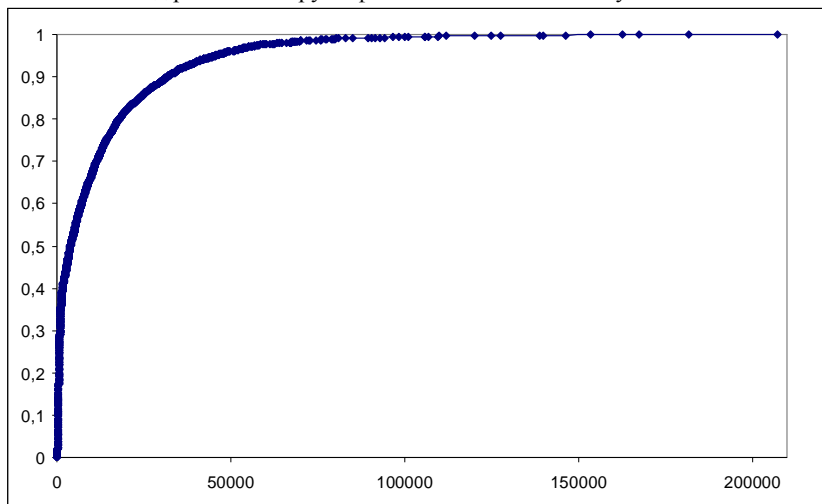


Рис. 4. Эмпирическая функция распределения численности фитопланктона.

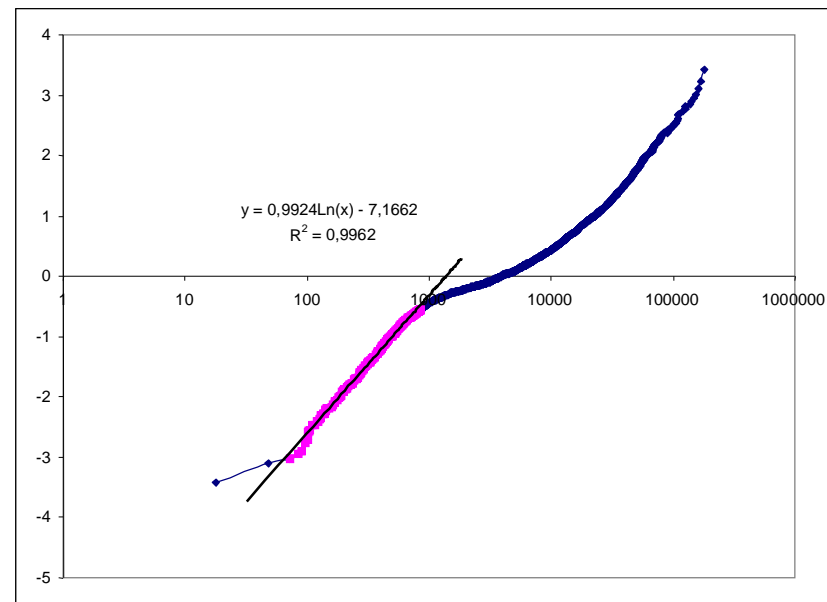


Рис. 5. Функция распределения численности фитопланктона в логвероятностных координатах.

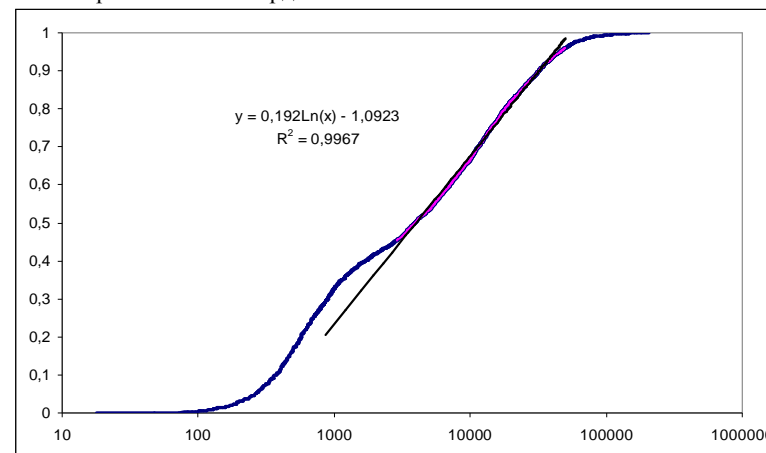


Рис. 6. Функция распределения численности фитопланктона в полулогарифмических координатах.

### Распределение вероятностей численности фитопланктона.

Функция распределения, построенная на основании эмпирических частот непревышения заданных порогов приведена на Рис. 4. Более информативным является представление соответствующих графиков в логарифмически-вероятностных (где логнормальное распределение представляется прямой линией Рис. 5) и в полулогарифмических координатах (Рис. 6). Из приведенных графиков видно, что при низких значениях концентраций клеток фитопланктона ( $<1000$  кл/см<sup>3</sup>) распределение имеет логнормальный характер, что согласуется с видением поведения популяции при этом как отдельных самостоятельно растущих островков, флуктуации скорости относительного прироста численности которых представляет собой белый гауссов шум. Однако при достижении момента вегетации характер распределения численности заметно меняется и может быть представлено логарифмически растущей функцией, достаточно хорошо приближающей функцию распределения, что хорошо видно из ее графика (Рис. 6) в полулогарифмических координатах.

Описанное поведение функции распределения результатов измерений содержания фитопланктона в речной воде, может быть понято исходя из рассмотрения распределения как результата свертки двух случайных процессов — стохастического процесса изменения концентрации фитопланктона в воде, представляющего экспоненциальный в среднем рост его количества с флуктуирующей скоростью относительного прироста и накладывающегося на него процесса равномерного "засевания" периода наблюдения моментами отбора пробы. При этом, в случае экспоненциального роста без флуктуаций и при равномерно распределенных моментах взятия проб на протяжении периода вегетации, должна получиться логарифмически распределенная случайная величина. По-видимому, эта компонента оказывает доминирующее влияние на результирующую функцию распределения. В этом случае хорошее соответствие полученной результирующей функции экспоненте (коэффициент детерминации зависимости частоты превышения порога от логарифма его величины  $>0.99$ ) свидетельствует о стабильности параметров роста фитопланктона на протяжении нескольких лет.

Участок экстремальных значений содержания фитопланктона характеризуется распределением формируется в условиях установившегося среднего значения и может быть рассмотрен как относительно независимые флуктуации вокруг последнего. В этой области она может быть приближен хвостовой частью нормальной функции распределения, как видно из Рис. 7, где график представлен в вероятностных координатах (прямые – функции нормального распределения).

### Спектральные характеристики флуктуаций численности фитопланктона.

Спектр процесса представлен на Рис. 8. Для большей наглядности спектр был вычислен для логарифма численности фитопланктона. На графике спектральной плотности наиболее выделяющийся пик с очевидностью отвечающий годовой цикличности (частота представлена в обратных годах). При этом, однако стоит заметить большой вклад шумовой компоненты, сообщающий графику в целом характер сходный с поведением фликкерного шума, в данном случае с показателем степени  $\sim 1.5$ . Это говорит о широком диапазоне времен корреляции в рассматриваемом процессе, делающим его поведение сходным с поведением

фликкерных флуктуаций — нарастание спектральной плотности по мере снижения частоты. Подобное поведение может свидетельствовать о расходимости средних значений численности фитопланктона по мере увеличения продолжительности наблюдения и повышенной вероятности достижения ею экстремальных значений.

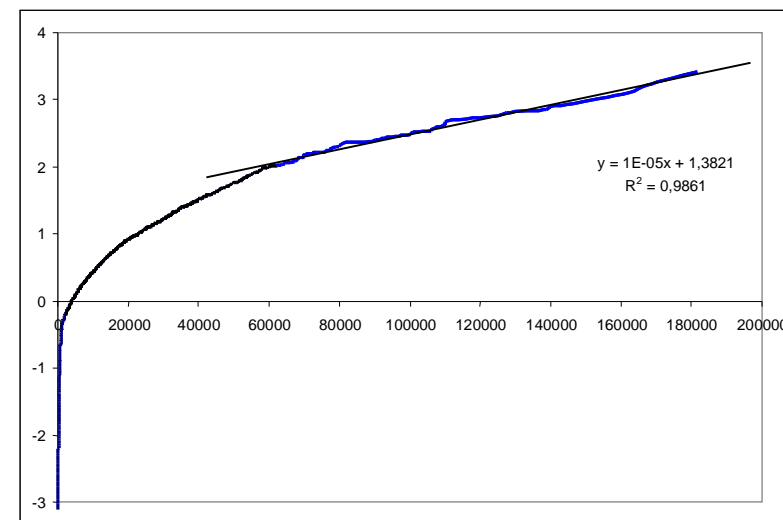


Рис. 7. Функция распределения численности фитопланктона в вероятностных координатах

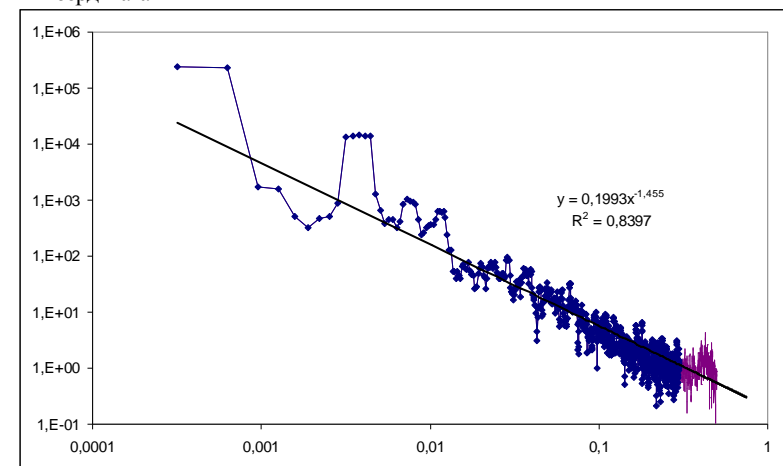


Рис. 8. Спектр мощности временного ряда логарифма численности фитопланктона.

**Выводы**

Динамика численности общего содержания фитопланктона в речной воде, несмотря на сложность его видового состава и изменения численности его групп со временем в целом может быть описана общей функцией распределения.

Эмпирическая функция распределения может быть описана как комбинация 3 участков, соответствующих зимнему периоду, периоду активного роста и флуктуациям вокруг максимальных значений в период цветения.

Асимптотика функции распределения имеет экспоненциальный характер

Спектральная плотность процесса изменения фитопланктона характеризуется степенной зависимостью от частоты с показателем промежуточным между показателем броуновского движения и фликкерных флуктуаций, что говорит о возможной неинтегрируемости спектра в нуле и возможном расхождении среднего значения при наращивании продолжительности периода наблюдений.

**Литература**

1. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 239 с.
2. *Витвицкая Т.В., Хромов В.М.* 1991. Изменение сезонной и пространственной структуры фитопланктонного сообщества р. Москвы. Водные ресурсы. N 6. с. 82-89
3. *Саут Р., Уиттик А.* Основы альгологии - М.: Мир, 1990. 596 с.
4. *Хромов В.М., Витвицкая Т.В., Харченко Ю.И., Телитченко М.М.* 1991. Структурно-функциональные характеристики фитопланктона - показателя качества воды р. Москвы. Водные ресурсы. N 2. с. 117-122
5. *Левшина Н.А.* Фитопланктон Можайского водохранилища // Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 2. М.: Изд-во МГУ, 1973.
6. *Левшина Н.А.* Фитопланктон // Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. Можайское водохранилище. М.: Изд-во МГУ, 1979.
7. *Кисин И. М., Немальцев А. С.* Результаты изучения трансформации воды Москворецких водохранилищ в русловом участке р. Москвы//Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 4. М.: Изд-во МГУ, 1978. С. 23-56.
8. Водохранилища Москворецкой водной системы. М.: Изд-во МГУ, 1985.
9. Guidelines for safe recreational water environments. w. 1. WHO. 251 p.
10. Андреюк Е.И., Коптева Ж.П., Занина В.В. Цианобактерии. – Киев: Наукова думка, 1990. 200 с.
11. Водоросли, вызывающие «цветение» водоемов Северо-Запада России. 2006 / под ред. К.Л.Виноградовой. М.: Товарищество научных изданий КМК. 367 с.
12. *Охалкин А.Г.* Динамика состава массовых видов фитопланктона при эвтрофизации и зарегулировании речного стока (на примере р. Волги) // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского Серия Биология. 1999. вып. 1. с.5-11

О СООТВЕТСТВИИ ЧИСЛЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК «ЗОЛОТОГО СЕЧЕНИЯ» И БИФУРКАЦИЙ В ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Кудин В.Н.

*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова,*

*Географический факультет.*

Рассмотрены свойства численного логистического уравнения, связанные с устойчивостью и хаосом изменения переменных во времени. Приведен случай динамического развития, когда бифуркационный рост численности популяции характеризуется соотношениями «золотого сечения». Проиллюстрирована структура сходимости к равновесию в процессе численного решения уравнения Ферхюльста. Отмечается связь понятий динамического равновесия с гармоническим развитием самоорганизующейся системы.

Положительная экология отражает ситуацию в борьбе противодействующих сил, когда характерные переменные изменяются преимущественно в положительную сторону. Если рассматривается биологическая система, то гармоническое развитие в первую очередь связано с выходом к устойчивым условиям, которые благоприятны с точки зрения численности популяции. Возможность выбора устойчивой обстановки для выживания соответствует случаю эффективного поиска доли от нормы в «золотых сечениях».

Норма (нормировка) для противоборствующих дополнительных переменных подразумевает выделение взаимодействия их из массы других факторов. Единая пара переменных с противоположным действием в условиях, нормированных инвариантами, позволяет осуществляться самоорганизующейся системе с возможностью развития неравновесной устойчивости. Реализация устойчивости происходит в случае особого количественного соотношения переменных, которое соответствует «золотой пропорции».

Природа существования «золотого сечения» до конца не ясна, хотя имеется множество примеров приложения его в биологии, физике, экономике и других областях. Подмечено, что численные значения «золотых пропорций» наблюдаются в живых системах, где присутствуют самоорганизующиеся силы, и отсутствуют в системах неживой природы. Образное представление о «золотом сечении» сводится к понятию, которое охватывает процесс движения по расходящейся спирали с осью вокруг значения  $x_z = (\sqrt{5} - 1)/2$ , являющегося корнем квадратного уравнения

$$x^2 + x = 1 \quad (1)$$

Обобщая, можно напомнить, что  $x_k$  характеризует  $k$ -степень среднего геометрического сторон, в сумме равным единице,  $k$ -мерного «куба» при натуральных  $k=1,2,\dots$ . Величина  $x_k$  представляет собой решение для «золотого

отношения» к единичной норме объема  $k$ -мерного «куба» со стороны  $x_k$  согласно уравнения

$$1/x^k = x/(1-x), \quad (2)$$

где под обозначением «куб» подразумевается квадрат при  $k=1$ , куб при  $k=2$  и т.д.

Можно сказать, что структура самоорганизующейся системы стремится к отношениям «золотого сечения», служащих опорными точками в фазовом пространстве их эволюции и трансформации [1].

Наиболее простой самоорганизующейся системой является модель Ферхюльста [2], где рассматриваются изменения численности популяции с учетом ее 1 – внутренних свойств и

2 – влияния окружающей среды. Для популяции первое подразумевает существования внутреннего скрытого механизма (например, конкуренции за источники питания), который регулирует рост численности, а второе сводится к так называемой «несущей способности» внешней обстановки. Противостояние внутренних и внешних сил определяет зависимость во времени  $t$  численности популяции  $P(t)$ . Ферхюльст ввел гипотезу, согласно которой замедление роста

$\frac{dP(t)}{dt}$  пропорционально размеру популяции  $P(t)$ . В этом случае развитие

имеет S-образную форму, а кривую зависимости называют логистической.

Запишем общий вид логистического дифференциального уравнения следующим образом

$$\frac{dP(t)}{dt} = n + l * P(t) + q * P^2(t) \quad (3)$$

с параметрами  $n, l, q$ . Заметим, что параметр  $n$  учитывает иммиграцию ( $n > 0$ ) и эмиграцию ( $n < 0$ ), чем характеризует поведение внешних факторов, а параметры  $l$  и  $q$  соответствуют коэффициентам уравнения Ферхюльста, характеризующим в системе внутренние противоборствующие способности к росту и конкуренции. Общее решение уравнения (3) с произвольными начальными условиями  $P_0 = P(t_0)$  можно найти в [3].

Для модели Ферхюльста  $q = -\beta < 0$  и пребывания численности со стороны равно убыванию, т. е.  $n = 0$ . Заменой переменных  $P(t) = x(t) * l / q$  уравнение (3) можно свести к уравнению с одним параметром

$$\frac{dx(t)}{dt} = A * x(t) * (1 - x(t)), \quad (4)$$

где  $x(t)$  – переменная, приведенная к нормированной (около единицы) области изменения, параметр  $A = l$  – скорость увеличения численности, которая благодаря нормировке также характеризует фактор ограничения роста.

В случае исследования развития численности популяций необходимо учитывать переход от непрерывного течения к дискретному изменению времени. Этим обусловлена замена дифференциального

уравнения (4) на численное логистическое уравнение, когда производная

$\frac{dx(t)}{dt}$  представляется соотношением  $\frac{\Delta x_n}{\Delta t_n}$ ,

$$x_{n+1} = x_n * (1 + a * (1 - x_n)), \quad (5)$$

где  $\Delta x_n = x_{n+1} - x_n$ ,  $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$  и  $a = A * \Delta t_n$ .

Напомним, что дифференциальное уравнение (4) в модели Ферхюльста описывает изменения численности в случае положительной скорости  $\frac{dx(t)}{dt}$ ,

ограниченной  $S_a = A^2 / 4$ . Эти ограничения нарушаются при использовании численного уравнения (5), где присутствуют отрицательные наклоны у зависимости, связанной с табличными  $x_n$ . Отсюда появляется ситуация, которая приводит к выходу переменной  $x$  из коридора устойчивых значений.

На рис. 1-3. представлены результаты расчетов численного уравнения (5) для разных значений, во-первых, начальных условий  $x_1 = x1$  и, во-вторых, величин параметра  $a$ . Следует отметить, что всевозможные (из нормированного набора от 0.01 до 0.99) начальные значения  $x1$  принципиально не меняют вид графика на фазовой плоскости рис. 1.

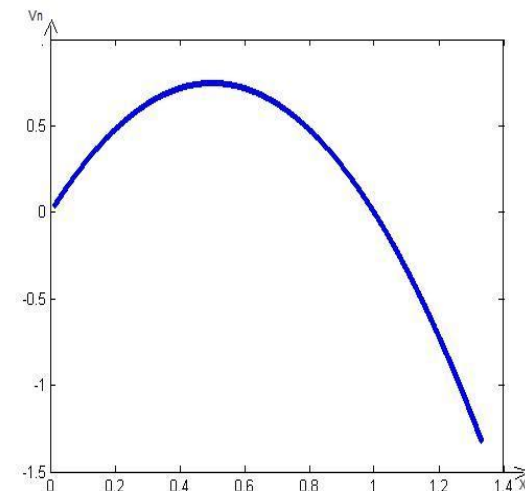


Рис. 1. Фазовая плоскость для переменных  $V_n = \frac{\Delta x_n}{\Delta t_n}$  и  $x_n$  при

всевозможных начальных значениях  $x_1 = x1$ ,  $n = 1000$  и  $a < 3$ .



Хотя во времени структура изменения численности выглядит разнообразной и сложной для каждого случая  $a$ , см., например, рис.2.

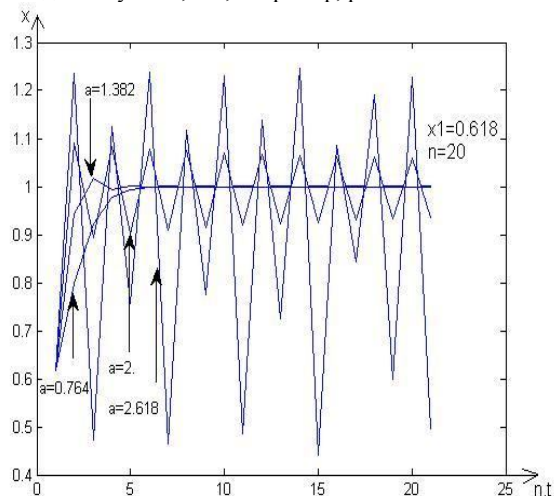


Рис. 2. Зависимость табличных значений  $x(n) = x_n$  во времени при

начальном условии  $x_1 = x_z$ ,  $n=20$  и  $a < 1$ ,  $1 < a < 2$ ,  $a = 2$ ,  $a = a_z$ .

В свою очередь особенности рис. 1 заключаются в своеобразных перемещениях по фазовой кривой для отдельных  $x_1 = x_1$ . Например, при  $x_1 = x_z$  и  $a_z = 1 / (1 - x_z)$  перемещения по фазовой кривой во времени происходят лишь на 2-х интервалах  $\delta x_1 \approx \{0.40 \div 0.85\}$  и  $\delta x_2 \approx \{1.05 \div 1.26\}$  согласно рис. 3. Со значениями переменной  $x_n = x_z = 0.618$  и  $a = a_z = 2.618$  в системе происходит бифуркация, а, именно, удвоение численности  $x_{n+1}$ , т.к. из (5) следует соотношение

$$x_{n+1} = x_z * (1 + a_z * (1 - x_z)) = 2 * x_z = 2 * x_n \quad (6)$$

Начальные значения  $x_1 = x_1$  вне интервалов  $\delta x_1$  и  $\delta x_2$ , но не более  $2 * x_z$ , переводят систему со временем в область «благоприятных» величин  $\delta x_1$  и  $\delta x_2$ . Эти области определяют диапазон динамических изменений численности при одновременно неравновесном и устойчивом состоянии.

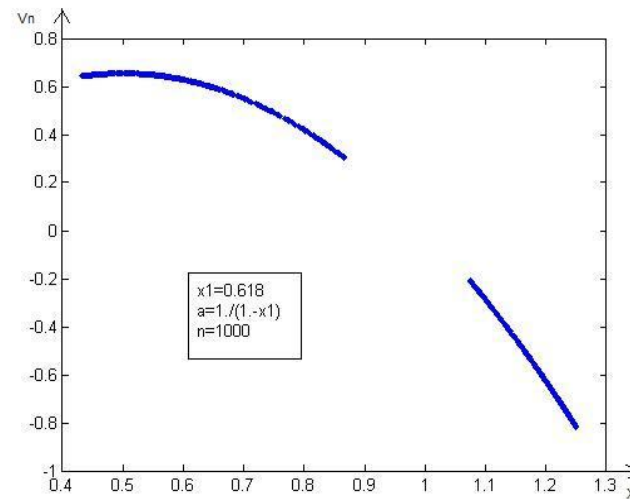


Рис. 3. Фазовая плоскость для переменных  $V_n = \frac{\Delta x_n}{\Delta t_n}$  и  $x_n$  при начальных значениях  $x_1 = x_z$ ,  $n=1000$  и  $a = a_z$ .

Таким образом, численные соотношения «золотого сечения» формируют в системах типа модели Ферхюльста интервалы гармонического изменения численности популяции.

**Литература**

1. Харитонов А.С. «Золотая пропорция» как критерий универсального равновесия и оптимальной связности частей в целом. Метафизика. Москва, Бином, 2006. — 251-255.
2. Светлосанов В.А., Кудин В.Н., Куликов А.Н. О понятиях: «устойчивость» и «устойчивое развитие». Журнал «Экологические системы и приборы», 2006, № 7, с. 11-16.
3. Кудин В.Н. О нарушении устойчивости решений численного логистического уравнения. Сборник научных трудов «Физические проблемы экологии». М. 2008, №15, с. 198-205.

ПРОЗРАЧНОСТЬ ВОД В ПРИБРЕЖНЫХ И ГЛУБОКОВОДНЫХ  
РАЙОНАХ ЧЕРНОГО МОРЯ

Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А., Шугаев А.В.

*Морской гидрофизический институт НАН Украины*

Рассмотрены основные особенности распределения показателя ослабления света в поверхностных прибрежных водах Черного моря и определены его числовые характеристики (диапазон изменений и среднее значение) на отдельных участках прибрежной зоны. Изучена многолетняя (1978 – 1995 гг.) сезонная изменчивость статистических оценок характерных значений показателя ослабления света, отражающих основные черты его вертикального распределения, в районах расположения стационарных циклонических (западного и восточного) и «севастопольского» антициклонического круговоротов.

Изучение оптического режима вод Черного моря в условиях их прогрессирующего загрязнения и эвтрофикации представляет несомненный интерес для контроля экологического состояния этих вод. Одна из важнейших гидрофизических характеристик – прозрачность воды, может служить индикатором распространения мутных (загрязнённых) вод в море из-за больших различий в концентрациях взвешенных и растворённых веществ в речных (промышленно-бытовых) и морских водах, сохраняющихся на значительных удалениях от источников загрязнения вод [1 – 3]. Резкое снижение прозрачности вод, наблюдавшееся в глубоководных районах моря в конце 1980-х – начале 1990-х годов, было связано с их эвтрофикацией из-за аномально высокой численности клеток фитопланктона [4].

В настоящей работе приводятся обобщенные результаты анализа измерений показателя ослабления направленного света (ПОС) (при десятичном основании логарифма и длине волны 420 нм), полученные в Морском гидрофизическом институте НАН Украины в течение 1977 – 1995 гг. Для анализа изменчивости прозрачности вод в прибрежной зоне моря использовались данные, полученные на глубине 4 – 5 м с помощью буксируемого прозрачномера МГИ-2201. Протяженность буксировок вдоль Анатолийского побережья составила 1830 миль, вдоль Кавказского побережья – более 4000 миль, вдоль юго-восточной части Крымского побережья ~ 1300 миль и западной его части до Одессы – 250 миль, вдоль западного побережья моря ~ 650 миль. В отдельных экспедициях в поверхностном слое моря определялись концентрации взвешенного вещества и хлорофилла «а». Измерения ПОС в глубоководных районах моря проводились до горизонта 300 м с помощью однотипных зондирующих прозрачномеров, созданных в отделе оптики МГИ. Всего было выполнено 1600 станций (весной – 414; летом – 365; осенью – 821) в 24 экспедиционных рейсах.

Для описания специфических особенностей вертикального распределения ПОС в верхнем слое моря использовался набор минимального числа его характерных значений ПОС, подробно описанный в работах [5,6]: 1)  $\epsilon_{10}$  – отсчет

на глубине 10 м; 2)  $\epsilon_{\min}$  – отсчет минимального значения ПОС на его вертикальном профиле в слое повышенной прозрачности; 3)  $\epsilon_{\max}$  – отсчет максимального значения ПОС в глубинном слое мутности; 4)  $Z\epsilon_{\min}$  и  $Z\epsilon_{\max}$  – глубины залегания  $\epsilon_{\min}$  и  $\epsilon_{\max}$ ; 5)  $\epsilon_{\text{ср}}$  – среднее значение ПОС в слое от поверхности моря до глубины залегания  $\epsilon_{\min}$ .

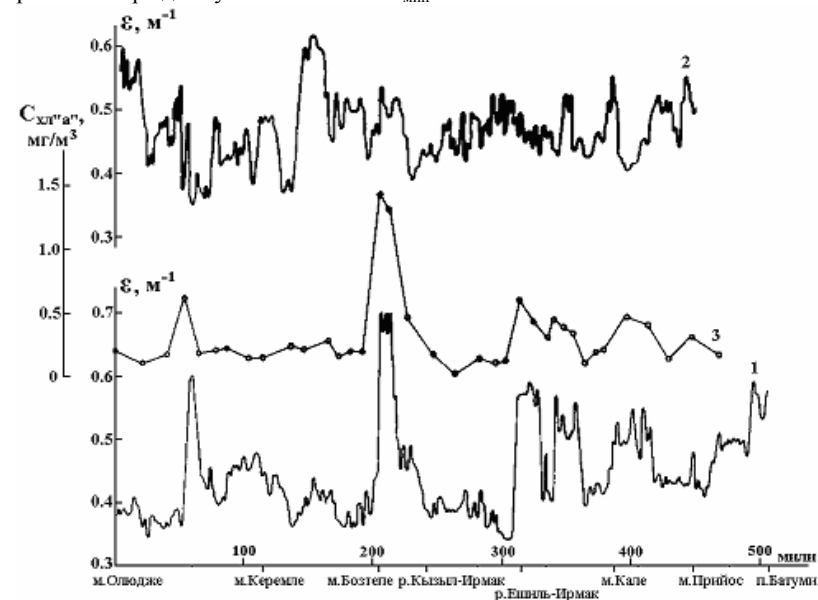


Рис. 1. Распределение ПОС в апреле 1981 (1) и 1982 (2) годов и содержание хлорофилла «а» (3) в апреле 1981 г. на трассе вдоль Анатолийского побережья.

### Результаты и обсуждение.

Анатолийское побережье (м. Олюдже – Батуми). Распределения прозрачности по этому маршруту, полученные с годичным сдвигом во времени (апрель 1981 и 1982 гг.), наглядно отражали характерные особенности в изменении ПОС, связанные с предустьевыми районами рек Кызыл-Ирмак, Ешиль-Ирмак и расположением портовых городов (рис. 1). Прослеживается сходство в абсолютных величинах и характере изменчивости ПОС. В апреле 1981 г. на всем протяжении от м. Олюдже до Батуми отмечалась хорошая корреляция в распределении ПОС и содержания хлорофилла «а» (рис. 1). На подходе к Батуми наблюдалось возрастание мутности, что, видимо, связано с выносом большого количества взвешенного материала в приустьевый район р. Чорох. Причиной сложного характера распределения ПОС, очевидно, могло также служить меандрирование стрежня ОЧТ, вихреобразование на его боковых границах, часто наблюдаемое в районах мысов Олюдже, Керемпе, Чам, Ишиклы, и связанное с ними перераспределение взвешенного вещества в поверхностных водах.

Таблица 1.  
Характеристики изменчивости показателя ослабления света ( $\epsilon$ ) в поверхностных прибрежных водах Черного моря.

Дата	Значение $\epsilon$ , $\text{м}^{-1}$		
	мин.	макс.	среднее
Анатолийское побережье			
апрель 1981	0,34	0,72	0,44
апрель 1982	0,35	0,62	0,47
июнь 1984	0,3	0,8	0,48
ноябрь 1980	0,28	0,36	0,3
Кавказское побережье			
октябрь 1977	0,18	0,65	0,35
март 1978	0,21	0,6	0,31
ноябрь 1978	0,22	0,6	0,34
июнь 1979	0,2	0,5	0,28
сентябрь 1978	0,4	1,2	0,7
Крымское побережье (юго-восточное)			
октябрь 1977	0,18	0,34	0,24
март 1978	0,16	0,26	0,21
ноябрь 1978	0,2	0,28	0,22
июнь 1979	0,13	0,24	0,22
сентябрь 1987	0,3	0,8	0,4
Крымское побережье (западное)			
март 1978	0,16	0,28	0,19
март 1984	0,34	0,5	0,38
Румелийское побережье			
ноябрь 1983	0,28	0,55	0,44
март 1984	0,4	2,2	–

В летний период (июнь 1984 г.) характер изменчивости распределения ПОС вдоль побережья в основном сохранил отмеченные для весеннего периода особенности. Это также подтверждается сравнением числовых характеристик ПОС в эти сезоны (таблица 1). Диапазон его изменений в эти периоды находился в пределах  $0,3 - 0,8 \text{ м}^{-1}$ . Также были близки средние значения ПОС, равные  $0,44 - 0,48 \text{ м}^{-1}$ .

Осенью (ноябрь 1980 г.) распределение ПОС было более однородным, диапазон изменения и его среднее значение – заметно ниже. Это, видимо, объясняется уменьшением влияния мутных прибрежных вод на прозрачность в районе измерений в связи с большей удаленностью трасс буксировки прозрачногомера от берега (в среднем на  $10 - 15$  миль) в осенний период. Пространственный размер оптических неоднородностей во все сезоны года был примерно одинаков ( $5 - 7$  миль).

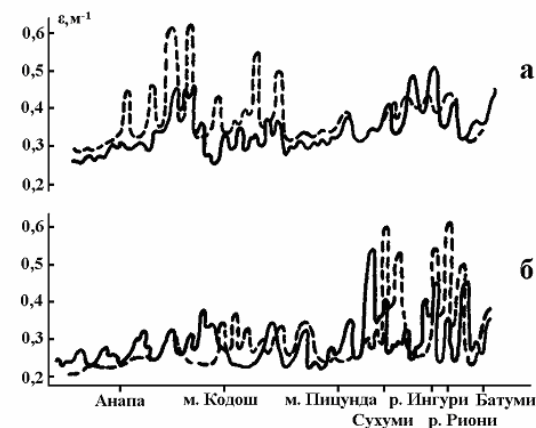


Рис. 2 – Распределение ПОС вдоль Кавказского побережья в осенний (а – ноябрь 1978 г.) и зимний (б – март 1978 г.) гидрологические сезоны (сплошная линия: Анапа – Батуми, штриховая: Батуми – Анапа).

Кавказское побережье. Характер распределений ПОС и диапазон его изменчивости на различных участках прибрежной зоны вдоль Кавказского побережья в осенне-зимний период 1978 г. показаны на рис.2. Области повышенных значений ПОС шириной  $5 - 20$  миль регистрировались в районах впадения крупных рек (Риони, Ингури, Кодори, Супса) и портово-промышленных городов (Батуми, Сухуми, Новороссийск и др.). Значения ПОС, как правило, увеличивались с севера в юго-восточном направлении. В весенне-летний период 1979 – 1983 гг. характер распределения ПОС [2] в общих чертах был близок к осенне-зимнему. Отличие заключалось в его более высоких значениях в весенний период, особенно в предустьевых районах рек. Помимо сезонной эти распределения показали наличие достаточно высокой кратковременной (единицы суток) изменчивости ПОС, в основном связанной с изменением динамических условий в прибрежной зоне. Измерениями на вдольбереговых трассах, расположенных на различных расстояниях от берега ( $2 - 13,5$  миль), отмечено, что при удалении от берега изрезанность распределений ПОС уменьшалась, а его значения и содержание взвеси снижались. Особенно заметно это наблюдалось в районах впадения рек (Ингури, Кодори, Хипста) и крупных портовых городов (Сухуми, Поти и др.) [2].

Диапазоны изменений ПОС ( $0,18 - 0,65 \text{ м}^{-1}$ ) в различные сезоны в 1977 – 1979 гг. были примерно одинаковы (таблица 1). Также были близки средние значения ( $0,28 - 0,35 \text{ м}^{-1}$ ). В основном они ниже, чем в районе Анатолийского побережья. Также меньше характерный размер оптических неоднородностей ( $2 - 4,5$  мили).

Детальные исследования распределений прозрачности и частиц взвешенного вещества, проведенные в сентябре 1987 г. в полосе прибрежной зоны (шириной до 11 миль) вдоль всего побережья на галсах, ориентированных перпендикулярно и параллельно береговой черте, показали хорошую их согласованность [2]. Области с повышенным содержанием частиц взвеси, расположенные в районах впадения крупных и средних рек и поргово-промышленных городов, характеризовались повышенными значениями ПОС. Прозрачность вод и число частиц взвеси уменьшались с удалением от берега. Это наиболее заметно было на участке Очамчира – Батуми, выделявшемся в прибрежной зоне максимальными значениями ПОС и содержания частиц взвеси. В сентябре 1987 г. по сравнению с концом 1970-х – началом 1980-х годов наблюдалось заметное увеличение ПОС вдоль всего побережья, что совпало с известным понижением прозрачности вод в Черном море в конце 80-х годов [4].

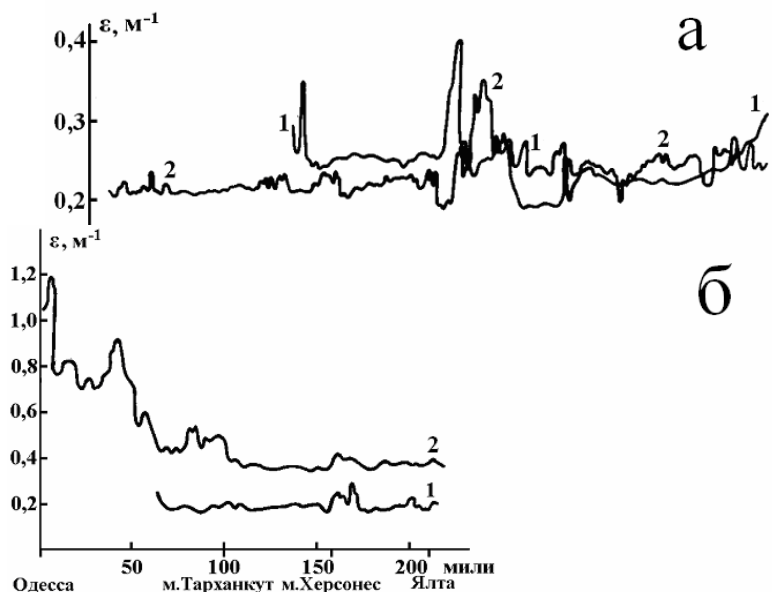


Рис. 3 – Распределение ПОС вдоль юго-восточной части (а – октябрь 1977 г., 1 – м. Херсонес – Керченский пролив, 2 – Керченский пролив – м. Херсонес) и юго-западной (б – март 1978 г. (1) и 1984 г. (2)) частей

Крымское побережье. Многолетние измерения ПОС на трассах вдоль Крымского побережья показали, что поверхностные прибрежные воды от м. Тарханкут до м. Киик-Атлама выделяются среди прибрежных вод большинства районов моря более высокой прозрачностью во все сезоны года, близкой к прозрачности поверхностных вод открытого моря [7]. Вдольбереговые изменения

ПОС в осенне-зимний период показаны на рис. 3. Для распределения ПОС характерна незначительная пространственная (вдольбереговая) и временная (межсуточная, сезонная) изменчивость его абсолютных величин. Диапазон их измененный в 1977 – 1979 гг. (см. таблицу 1) составляет  $0,16 - 0,34 \text{ м}^{-1}$ . Средние значения ПОС мало отличались и были равны  $0,19 - 0,24 \text{ м}^{-1}$ . Характерный размер оптических неоднородностей изменялся в диапазоне 2 – 3 мили. Отметим, что при сохранении характера вдольберегового распределения прозрачности вод в марте 1984 г. (рис. 3б) наблюдалось заметное увеличение ПОС (в 1,5 – 2 раза) по сравнению с мартом 1978 г. При этом значения прозрачности прибрежных вод и вод открытого моря, как и в прежние годы, были близки.

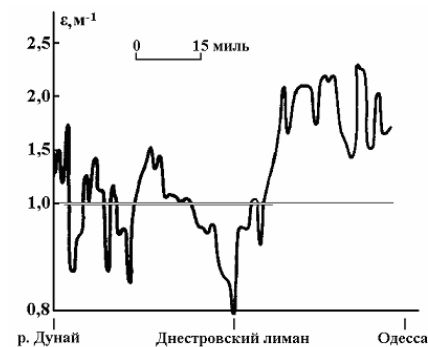


Рис. 4 – Распределение ПОС на вдольбереговом галсе п. Одесса – р. Дунай.

Небольшая изменчивость в распределении ПОС (рис. 3а), наблюдаемая на прямой и обратной вдольбереговых трассах через 7 – 10 сут, в основном объяснялась их различным удалением от береговой черты. Отдельные участки повышенной мутности протяженностью 0,5 – 5 миль находились, как правило, в районах портовых и курортных городов. Отмечено понижение прозрачности вод в районе Феодосийского залива и при приближении к Керченскому проливу, что объясняется влиянием азовоморских вод. Достаточно наглядно это проявилось при детальной съемке прибрежной зоны в сентябре 1987 г. на трех полигонах (м. Херсонес, Ялтинский залив, между м. Киик-Атлама и Керченским проливом) и трассах между ними. Измерения на полигонах позволили получить достаточно подробную и согласованную картину пространственного распределения прозрачности и частиц суммарной взвеси на значительной части прибрежной зоны Крыма [7]. От м. Херсонес до м. Киик-Атлама наблюдалось достаточно однородное распределение ПОС и частиц взвеси. Участки прибрежной зоны с пониженной прозрачностью вод (западнее м. Херсонес, район Феодосии) совпадали с областями повышенного содержания суммарной взвеси. При удалении от берега прозрачность вод повышалась, а число частиц взвеси уменьшалось.

Северо-западное побережье (м. Тарханкут – Одесса – м. Емине). Особенности распределения и формирования поля прозрачности вод вдоль северного и западного берегов северо-западной части моря и их изменчивость были рассмотрены в [1, 3, 7, 8]. На участке от м. Тарханкут до Одессы прозрачность вод, по данным измерений в марте 1984 г., заметно понижалась (рис. 3б), что, видимо, связано с влиянием трансформированных речных вод, поступающих из Днепробугского лимана. Распределение ПОС от Одессы до м. Емине в марте 1984 г.

имело сложный характер. На участке от Одессы до приустьевых районов Дуная горизонтальное распределение ПОС (рис. 4) достаточно неоднородно (хотя в целом наблюдалась тенденция повышения прозрачности вод в южном направлении). Оно имело одинаковые с температурными неоднородностями изменения с характерным масштабом  $\sim 16$  миль [3,7]. При этом более мутным водам соответствовали холодные и наоборот. Такие одновременные изменения прозрачности и температуры, скорее всего, можно объяснить прерывистым характером поступления больших по объему масс холодных и относительно мутных речных вод из Днепро-Бугского и Днестровского лиманов и связанным с этим усиливающимся меандрированием вдольберегового течения. В этом течении наблюдались также мелкомасштабные (1 – 5 миль) изменения прозрачности и температуры. Диапазон изменений ПОС составлял  $0,8 - 2,2 \text{ м}^{-1}$ . В осенний период (ноябрь 1983 г.), когда речной сток был ограниченным, на этом же участке побережья распределение ПОС не имело заметной изрезанности. В то же время наблюдались изменения ПОС и температуры с тем же масштабом ( $\sim 16$  миль), как и зимой [7]. На участке прибрежной зоны южнее устья Дуная изрезанный характер распределения ПОС сохранился. Диапазон его изменений, равный  $0,4 - 2,2 \text{ м}^{-1}$ , даже выше, чем на северном участке. Распределение ПОС (рис. 4) хорошо согласовывалось с распределением содержания хлорофилла «а» [1,8]. Его максимальные концентрации определены на участках прибрежной зоны с максимальными значениями ПОС (южнее Одессы, приустьевый район Дуная, восточнее Констанцы и у м. Емине). На других вдольбереговых участках наблюдалось почти пропорциональное изменение концентраций хлорофилла «а» и ПОС.

Глубоководная часть моря. Многолетние наблюдения за прозрачностью черноморских вод, определяемой по измерениям глубины видимости белого диска, показали, что до середины 1980-х годов оптическое состояние вод моря характеризовалось как квазистабильное. Резкое снижение прозрачности наблюдалось в конце 1980-х – начале 1990-х годов [4]. После 1992 г. прозрачность воды начала повышаться и в 1998 – 2002 гг. приблизилась к среднегодовым значениям, наблюдаемым во второй половине 80-х годов (перед ее резким снижением). Это также подтвердили результаты наших измерений ПОС в поверхностном ( $\epsilon_{10}$ ) и глубинном ( $\epsilon_{\text{макс}}$ ) слоях [6], полученные в период 1 (1978 – 1989 гг.) квазистабильного оптического состояния вод моря и в период 2 (1990 – 1993 гг.) резкого снижения их прозрачности. Результаты измерений ПОС в декабре 1994 г. и в апреле 1995 г. свидетельствуют о наметившейся тенденции уменьшения их значений (повышение прозрачности вод).

На первом этапе исследований по данным наблюдений были построены карты распределения характерных значений ПОС и рассчитаны их статистические оценки (среднее значение, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации) для отдельных рейсов и сезонов [9]. На рис. 5,6 показаны распределения ПОС в весенний и летний сезоны, осредненные по периоду 1. Сведения о статистических оценках ПОС в периоды 1 и 2 представлены в таблице 2.

Анализ табличных данных показал, что в период 1 сезонные изменения ПОС проявились в основном в поверхностном слое. Пониженная прозрачность в этом слое наблюдалась весной. К концу года она повышалась (ПОС уменьшался). В глубинных слоях ( $\epsilon_{\text{мин}}$ ,  $\epsilon_{\text{макс}}$ ) такой характер сезонных изменений сохранился, но

летом и осенью их величины отличались незначительно. Также незначительно изменялись глубины залегания  $\epsilon_{\text{мин}}$  (от  $(104 \pm 26)$  до  $(109 \pm 31)$  м) и  $\epsilon_{\text{макс}}$  (от  $(124 \pm 25)$  до  $(128 \pm 30)$  м). Межгодовые изменения ПОС заметно проявлялись и в поверхностном и в глубинном слоях. Так, летом в период 1  $\epsilon_{\text{макс}}$  изменялось в пределах  $0,08 - 0,17 \text{ м}^{-1}$ ,  $\epsilon_{\text{мин}}$  –  $0,05 - 0,11 \text{ м}^{-1}$ . Осенью пределы изменения  $\epsilon_{\text{макс}}$  равнялись  $0,05 - 0,16 \text{ м}^{-1}$ , а  $\epsilon_{\text{мин}}$  –  $0,03 - 0,09 \text{ м}^{-1}$ .

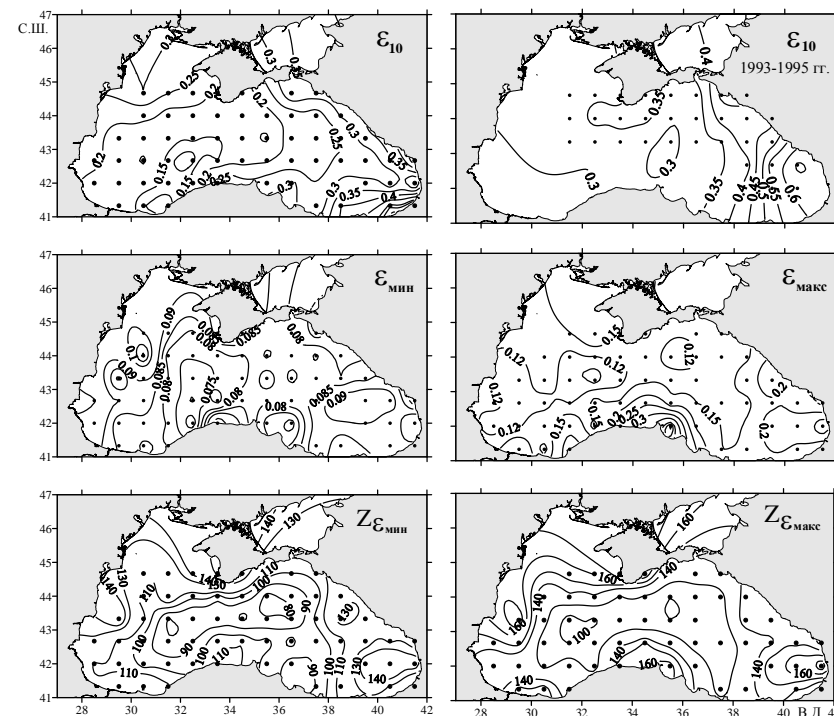


Рис. 5. Распределение характерных значений ПОС в весенний сезон в период 1 (1983 – 1989 гг.) и распределение  $\epsilon_{10}$  в 1993 – 1995 гг.

В период 2, совпавший с широким распространением в море гребневика-вселенца *Mnemiopsis leidyi*, наблюдались повышенные по сравнению с периодом 1 концентрации хлорофилла «а». Это свидетельствовало об интенсивном развитии фитопланктона (особенно его мелкоразмерных видов [4]), что привело к заметному понижению прозрачности (таблица 2). Так, в поверхностном слое ПОС увеличился весной в 1,5 раза, летом и осенью в 3 и более раз, в глубинном слое в эти сезоны – примерно в 1,5 раза. Минимальная прозрачность в поверхностном слое наблюдалась летом 1992 ( $\epsilon_{10} = 0,6 - 1,1 \text{ м}^{-1}$ ). Весной и осенью величины ПОС были близки ( $\epsilon_{10} = 0,35 - 0,6 \text{ м}^{-1}$ ). В глубинных слоях характер сезонных

изменений ПОС примерно такой же, как в период 1. В то же время положение глубин их залегания изменилось. Весной они находились глубже, чем в период 1, а осенью – ближе к поверхности моря.

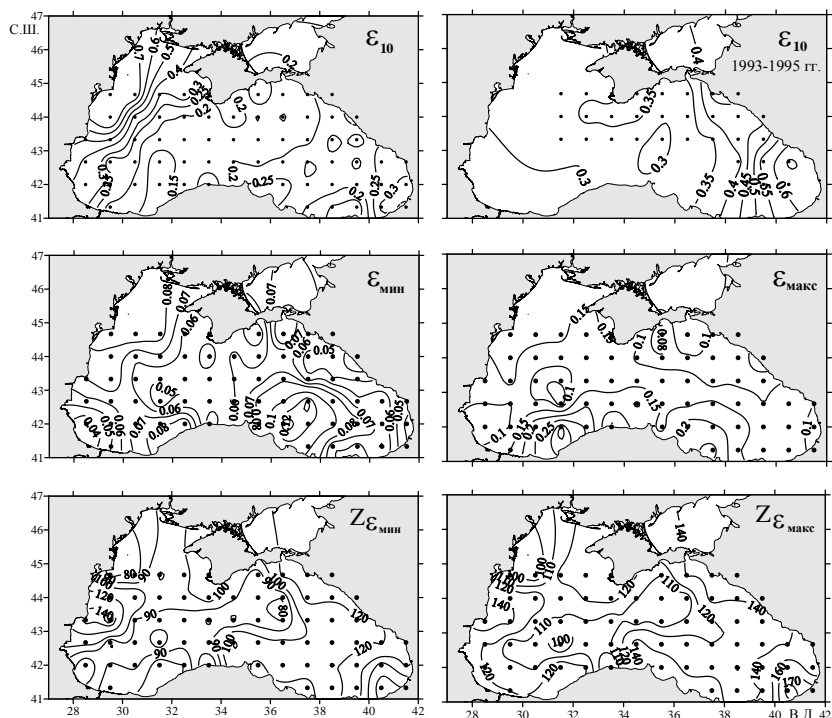


Рис. 6. Распределение характерных значений ПОС в летний сезон в период 1 (1978 – 1989 гг.) и распределение  $\epsilon_{10}$  в июле 1992 г.

Анализ карт с распределением значений ПОС показал, что в оба периода наблюдений общим являлась близость расположения отдельных областей пониженных и повышенных значений ПОС и глубин залегания прозрачного и мутного слоев с положением некоторых известных динамических образований в море, что косвенно подтверждало влияние динамики вод на распределение прозрачности. Так, в работе [5] отмечалось, что области с минимальными значениями этих характеристик в центральных районах западной и восточной частей моря совпадали с циклоническими круговоротами (ЦК). Участки моря с повышенными их значениями, расположенными большей частью в южных и восточных районах моря, совпадали с зонами конвергенций и антициклонических

круговоротов (АЦК). Отмеченные особенности в распределении прозрачности хорошо видны на рис. 5, 6.

Таблица 2.

Сезонные изменения математического ожидания ( $M$ ) и среднего квадратического отклонения ( $\sigma$ ) характерных значений ПОС в период 1978 - 1989 (1) и 1990 - 1993 (2).

Значение	Сезон	$M$		$\sigma$	
		1	2	1	2
$\epsilon_{10}, \text{ м}^{-1}$	Весна	0,27	0,40	0,08	0,07
	Лето	0,22	0,74	0,10	0,25
	Осень	0,15	0,43	0,05	0,07
$\epsilon_{\text{ср}}, \text{ м}^{-1}$	Весна	0,19	0,28	0,04	0,05
	Лето	0,16	0,30	0,06	0,08
	Осень	0,10	0,25	0,04	0,05
$\epsilon_{\text{мин}}, \text{ м}^{-1}$	Весна	0,09	0,18	0,02	0,06
	Лето	0,07	0,10	0,03	0,05
	Осень	0,07	0,11	0,03	0,03
$\epsilon_{\text{макс}}, \text{ м}^{-1}$	Весна	0,19	0,30	0,10	0,10
	Лето	0,13	0,18	0,07	0,08
	Осень	0,12	0,16	0,06	0,04
$Z_{\epsilon_{\text{мин}}}, \text{ м}$	Весна	109	128	31	40
	Лето	104	114	26	36
	Осень	106	92	24	23
$Z_{\epsilon_{\text{макс}}}, \text{ м}$	Весна	128	145	30	43
	Лето	124	130	25	35
	Осень	124	112	22	21

На втором этапе исследований влияние динамики вод на распределение прозрачности изучалось более детально. Для каждого экспедиционного рейса были построены карты динамической топографии поверхности моря, на которых с использованием данных по вертикальной гидрологической структуре идентифицированы стационарные ЦК (западный и восточный) и квазистационарные АЦК («севастопольский», в юго-восточной части моря, вдоль Кавказского и Анатолийского побережий). По данным измерений на станциях, пространственно совпадающих с этими динамическими образованиями, были рассчитаны статистические оценки характерных значений ПОС как для отдельных рейсов, так и осредненные по всему периоду наблюдений. Анализ их изменчивости показал следующее.

В западном ЦК (таблица 3) в период 1 прозрачность в поверхностном слое в течение года изменялась незначительно. Повышенные значения ПОС наблюдались в летне-осенний период. Низкая внутрисезонная изменчивость значений ПОС, в качестве оценки которой использован коэффициент вариации в процентах, была отмечена весной (6 – 15 %), более высокая (11 – 47 %) – летом и осенью. Во 2-м периоде характер внутрисезонных изменений ПОС изменился. Наиболее прозрачные поверхностные воды наблюдались весной (рис. 5, апрель 1993, 1995 гг.), а летом (рис. 6, июль 1992 г.) была зафиксирована аномально низкая

прозрачность. В то же время изменчивость была в среднем ниже (7 – 27 %), чем в период 1.

Таблица 3.

Сезонные изменения математического ожидания (М) и среднего квадратического отклонения ( $\sigma$ ) характерных значений ПОС в различных динамических образованиях в период 1978 – 1989 (1) и 1990 – 1993 (2).

Значение	Сезон	Величина	ЦК		ВЦК		АЦК Сев	
			1	2	1	2	1	2
$\epsilon_{10}, \text{ м}^{-1}$	Весна	М	0.14	0.35	0.21	0.33	0.22	0.36
		$\sigma$	0.03	0.09	0.04	0.11	0.07	0.09
	Лето	М	0.18	0.83	0.19	0.9	0.27	0.69
		$\sigma$	0.08	0.17	0.08	0.13	0.08	0.1
	Осень	М	0.19	0.49	0.18	0.41	0.22	0.55
		$\sigma$	0.09	0.09	0.05	0.07	0.07	0.14
$\epsilon_{\text{ср}}, \text{ м}^{-1}$	Весна	М	0.12	0.26	0.16	0.23	0.15	0.28
		$\sigma$	0.02	0.07	0.02	0.06	0.05	0.07
	Лето	М	0.15	0.37	0.15	0.34	0.12	0.31
		$\sigma$	0.06	0.13	0.05	0.08	0.04	0.02
	Осень	М	0.16	0.26	0.21	0.24	0.15	0.29
		$\sigma$	0.09	0.05	0.2	0.04	0.08	0.07
$\epsilon_{\text{мин}}, \text{ м}^{-1}$	Весна	М	0.08	0.16	0.08	0.15	0.09	0.2
		$\sigma$	0.01	0.04	0.01	0.04	0.02	0.06
	Лето	М	0.06	0.14	0.07	0.1	0.06	0.14
		$\sigma$	0.02	0.1	0.04	0.02	0.02	0.02
	Осень	М	0.07	0.11	0.09	0.1	0.08	0.13
		$\sigma$	0.03	0.02	0.04	0.02	0.04	0.03
$\epsilon_{\text{макс}}, \text{ м}^{-1}$	Весна	М	0.12	0.21	0.15	0.21	0.14	0.37
		$\sigma$	0.03	0.06	0.05	0.07	0.04	0.08
	Лето	М	0.11	0.22	0.1	0.17	0.11	0.23
		$\sigma$	0.07	0.12	0.04	0.04	0.02	0.09
	Осень	М	0.11	0.16	0.14	0.14	0.14	0.19
		$\sigma$	0.06	0.04	0.03	0.03	0.06	0.08
$Z_{\text{эмин}}, \text{ м}$	Весна	М	78	85	83	81	135	167
		$\sigma$	9	14	19	16	20	26
	Лето	М	81	66	84	85	145	120
		$\sigma$	11	13	15	17	11	21
	Осень	М	90	76	91	82	135	126
		$\sigma$	18	11	13	13	15	15
$Z_{\text{эмакс}}, \text{ м}$	Весна	М	96	94	104	100	155	197
		$\sigma$	8	12	17	23	17	26
	Лето	М	102	79	104	115	157	133
		$\sigma$	13	15	15	14	12	22
	Осень	М	110	88	110	98	154	140
		$\sigma$	19	11	11	15	18	14

В глубинном прозрачном ( $\epsilon_{\text{мин}}$ ) и мутном ( $\epsilon_{\text{макс}}$ ) оптическом слоях прозрачность в оба периода в течение года изменялась незначительно. Ее

внутрисезонная изменчивость, равная 6 – 24 % весной и 14 – 43% летом и осенью, была близка к такой изменчивости в поверхностном слое. Во 2-м периоде эти различные значения ПОС были в 1,1 – 1,8 раз выше, чем в период 1. Также различались глубины залегания этих слоев. В период 1 от весны к концу года эти глубины увеличивались. Весной (в мае) глубины залегания прозрачного и мутного слоев имели значения (71 ± 4) и (87 ± 7) м, а поздней осенью (в ноябре) – (92 ± 23) и (116 ± 24) м соответственно. Их изменчивость в течение года была не высокой (5 – 15 %). Во 2-м периоде характер сезонных изменений глубин залегания этих слоев изменился. Минимальное их заглубление ((66 ± 13) и (79 ± 15) м) наблюдалось в июле 1992 г. В среднем в течение года глубинные оптические слои находились на меньших глубинах, чем в 1-м периоде. Расстояние между слоями во 2-м периоде, весной в среднем равное 9 м, к концу года увеличилось до 11 м. В 1-м периоде это расстояние было большим и составляло 16 – 26 м.

В восточном ЦК (ВЦК) абсолютные величины и характер внутригодовых изменений значений ПОС в поверхностном и глубинном слоях в оба периода незначительно отличались от аналогичных характеристик в западном ЦК (таблица 3). Весной  $\epsilon_{10}$  и его изменчивость несколько выше, а в глубинном слое изменчивость  $\epsilon_{\text{мин}}$  и  $\epsilon_{\text{макс}}$  в среднем была ниже, чем в западном ЦК. Характер внутригодовых изменений глубин залегания этих слоев в обоих круговоротах в оба периода был одинаков (в период 1 эти глубины в течение года увеличивались, а в период 2 – уменьшались). В то же время в восточном ЦК эти слои были более заглублены. Расстояние между слоями в 1-м периоде во все сезоны не изменялось и равнялось в среднем 20 м. Во 2-м периоде это расстояние увеличилось до 23 – 31 м.

В «севастопольском» АЦК – АЦК Сев (таблица 3) в период 1 прозрачность в поверхностном слое летом была несколько ниже, чем весной и осенью, и заметно повысилась к концу года. Ее изменчивость во все сезоны была достаточно высокая (5 – 39 %). Во 2-м периоде величина ПОС ( $\epsilon_{10}$ ) увеличилась (особенно летом), а его внутрисезонная изменчивость уменьшилась (7 – 25 %) по сравнению в периодом 1. В глубинном слое в период 1 прозрачность в течение года изменялась незначительно, а ее изменчивость была несколько выше (2 – 46 %), чем в поверхностном слое.

Во 2-м периоде прозрачность вод в глубинном слое заметно понизилась (особенно весной), а ее внутрисезонная изменчивость в среднем сохранилась (9 – 41%). Средние значения глубин залегания этих слоев в 1-м периоде в течение года изменялись в пределах 129 – 143 м для прозрачного и 148 – 160 м для мутного слоев и их изменчивость была не высокой (5 – 18 %). Во 2-м периоде глубина залегания слоев весной заметно увеличилась в среднем на 37 м, а летом и осенью уменьшилась на 24 и 12 м соответственно. Расстояние между слоями в оба периода весной было максимальным (20 – 30м), а летом – минимальным (12 – 13 м). Осенью оно было несколько выше – 14 – 19 м.

В антициклоническом круговороте, расположенном в юго-восточной части моря, величины ПОС в поверхностном и глубинном слоях и их изменчивость несколько выше, чем в «севастопольском» АЦК, а характер сезонных изменений в этих круговоротах был одинаковым (ПОС уменьшался к концу года) [6].

Проведенный анализ показал, что изменения значений ПОС в циклонических и антициклонических круговоротах проявлялись не всегда одинаково. Это связано

с влиянием на формирование поля прозрачности в море различных гидрофизических, химических и биологических процессов. Так, прозрачность в поверхностном слое глубоководной части моря определяется главным образом количеством клеток фитопланктона и продуктов его деструкции (детрита). Поэтому наблюдаемое понижение прозрачности в отдельные месяцы, видимо, было связано с более интенсивным продуцированием фитопланктона. Во 2-м периоде, когда прозрачность во все сезоны заметно понизилась, обычный сезонный цикл его развития был нарушен из-за массового появления мелкоразмерных пиропитовых видов фитопланктона [4]. Наиболее заметно это проявилось в летний период 1992г., когда на большей части моря наблюдалось «цветение» фитопланктона.

Повышенные значения ПОС ( $\epsilon_{10}$ ) в антициклонических круговоротах по сравнению с циклоническими, возможно, связаны с условиями их образования. Квазистационарные АЦК (в том числе и «севастопольский») обычно возникают в районе между прибрежной зоной моря и струей Основного Черноморского течения при ее меандрировании. Поэтому в центральные области круговоротов могут попадать более мутные прибрежные воды, что приведет к загрязнению центральных районов моря.

#### Заключение

Результаты многолетних наблюдений позволили определить основные особенности распределения ПОС и установить некоторые факторы, влияющие на его изменчивость в прибрежных и глубоководных районах Черного моря.

На большинстве участков прибрежной зоны распределение ПОС неоднородно, а его профили имели сложный характер. При удалении от берега прозрачность вод, как правило, повышалась, а изрезанность профилей ПОС уменьшалась. Распределение ПОС в основном определялось распределением взвешенного вещества, которое, в свою очередь, зависело от расположения источников берегового стока (речного и промышленно-бытового), условий смешения этих стоков с морскими водами и их динамики, а также от развития фитопланктона.

Области повышенной мутности находились в основном в районах крупных портовых и курортных городов и приустьевых зонах рек, где также отмечалось повышенное содержание взвеси. Наблюдались случаи переноса мутных вод антициклоническими вихрями вдоль Анатолийского, Кавказского и западного побережий.

Наиболее прозрачные воды, близкие к прозрачности вод открытого моря, и невысокая пространственно-временная изменчивость ПОС отмечены в прибрежной зоне Крымского побережья. Наиболее мутные воды и высокая изменчивость распределения ПОС регистрировались вдоль северо-западного побережья.

По данным наблюдений в глубоководной части моря были рассчитаны статистические оценки характерных значений ПОС, отражающих основные черты его вертикального распределения, в районах расположения стационарных циклонических (западного и восточного) и «севастопольского» антициклонического круговоротов в период относительно стабильного оптического состояния вод Черного моря (1978 – 1989 гг.) и в период (1990 – 1993

гг.) резкого снижения их прозрачности. Изучена сезонная изменчивость статических оценок ПОС в этих динамических образованиях.

Показано что характер сезонных изменений ПОС в ЦК и АЦК примерно одинаков, а абсолютная величина ПОС выше в АЦК. В АЦК по сравнению с ЦК глубже находились прозрачный и мутный глубинные слои (в среднем на 50 м весной и летом и на 35 м осенью). В период 1990 – 1993 гг. эти слои наблюдались еще глубже (на 75 – 80 м весной, 55 – 60 м летом и 40 м осенью).

Представленные результаты подтверждают возможность использования оптических методов исследований для наблюдения за распространением загрязненных вод (речные и промышленно-бытовые стоки) в море, качественной оценки содержания взвеси в воде и, следовательно, для контроля экологического состояния прибрежных вод. Статистические оценки и карты распределений ПОС в глубоководных районах могут быть использованы в качестве опорных при проведении мониторинга гидрооптической ситуации в Черном море.

#### Литература

1. Агафонов Е. А., Кукушкин А. С., Прохоренко Ю. А. Исследование распространения речных вод в северо-западной части Черного моря в весенний гидрологический сезон // Метеорология и гидрология. – 2000. – №8. – С.93 -101.
2. Агафонов Е. А., Кукушкин А. С., Прохоренко Ю. А. Структура поля прозрачности и особенности ее формирования в поверхностном слое вод прибрежной зоны Кавказского побережья в весенне-летний период // Океанология. – 2001. – Т.41, №6. – С.815 - 826.
3. Кукушкин А.С. Агафонов Е.А., Прохоренко Ю.А. Распределение показателя ослабления направленного света в поверхностных прибрежных водах Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2006. – №5. – С.30 - 43.
4. Маньковский В. И., Владимиров В. Л., Афонин Е. А., Мишионов А.В., Соловьев М. В., Аннинский Б. Е., Георгиева Л. В., Юнев О. А. Многолетняя изменчивость прозрачности в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х – начале 90-х годов. – Севастополь, 1996. – 32с. – (Препринт / НАН Украины. МГИ)
5. Агафонов Е.А., Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А. Характерные значения вертикального распределения показателя ослабления света в верхнем слое глубоководной части Черного моря // Оптика атмосферы и океана.– 2002. – Т.15. – №4. – С.306-309.
6. Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А. Изменчивость распределения прозрачности в верхнем слое пелагиали Черного моря // Оптика атмосферы и океана.– 2008. – Т.21. – №4. – С.339-344.
7. Агафонов Е.А. Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А., Каминский С.Т. Пространственная структура и изменчивость полей течений, показателя ослабления света и температуры в поверхностном слое северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 1998. – №4. – С. 57 - 69.
8. Агафонов Е. А., Кукушкин А. С., Прохоренко Ю. А. Особенности формирования поля прозрачности поверхностных вод на шельфе северных районов Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2002. – №2. – С.65 - 77.



9. Агафонов Е.А., Прохоренко Ю.А., Богуславский С.Г., Кукушкин А.С. Атлас показателя ослабления света глубоководной части Черного моря // МГИ НАН Украины. Севастополь.– 2000. – 101 с. Деп. в ВИНТИ, 02.02.2000. – № 235-В00.

ОБ ОБРАЗОВАНИИ ОБЛАКА МАЛЫХ ВИХРЕЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

НЕСКОЛЬКИХ БОЛЕЕ КРУПНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВИХРЕЙ.

А.Д.Марголин\*, А.Э. Похил\*\*

\* Институт химической физики РАН, г. Москва.

\*\* Гидрометцентр России, г. Москва

Численное моделирование показывает, что взаимодействие вихрей сопровождается образованием вторичных меньших вихрей /1,2,3,4/. Оценим приближенно количество и суммарную массу образованных малых вихрей исходя из законов сохранения массы, момента импульса и энергии.

В реальных атмосферных вихрях число Рейнольдса велико ( $Re > 10^7$ ). Будем считать, что за время изучаемого здесь взаимодействия вихрей, диссипацией энергии можно пренебречь. Эффективная масса вихря пропорциональна  $\rho R^2$ , момент импульса  $\rho R^3 V$ , энергия пропорциональна  $\rho R^2 V^2$  ( $\rho$  – плотность). Вычисление энергии и момента импульса при достаточно сильной функции уменьшения скорости при  $r > R$ , например экспоненциальной, сводится к вычислению сходящихся интегралов. Эффективной массой вихря будем считать массу области, вносящей основной вклад в момент импульса вихря (например, 0.9). Будем также считать, что профиль скорости  $V(r)/V = f(r/R)$  у всех вихрей одинаковый. Если в результате сближения  $n_1$  одинаковых вихрей радиусом  $R_1$  одного знака остается (или образуется)  $n_2$  одинаковых вихрей того же знака радиусом  $R_2$  и образуется также  $n_3$  мелких вихрей другого знака радиусом  $R_3$ , то законы сохранения имеют вид

$$\begin{aligned} n_1 R_1^2 &= n_2 R_2^2 + n_3 R_3^2 \\ n_1 R_1^3 V_1 &= n_2 R_2^3 V_2 + n_3 R_3^3 V_3 \\ n_1 R_1^2 V_1^2 &= n_2 R_2^2 V_2^2 + n_3 R_3^2 V_3^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Предполагается, что скорость перемещения вихрей, как целого образования значительно меньше скорости их вращения вокруг собственного центра  $V$  и

радиус малых вихрей значительно меньше радиуса основных вихрей ( $R_3 \ll R_1$  и  $R_3 \ll R_2$ ).

Если скорости вращения малых вихрей малы ( $V_3 \ll V_1$ ,  $V_3 \ll V_2$ ), то эти вихри вносят лишь малый вклад в суммарную энергию и момент импульса системы.

Отбросив вторые слагаемые в правой части уравнений сохранения момента импульса и энергии, получим относительную массу  $m_3/m_1$  образовавшихся малых вихрей к массе исходных вихрей и их относительное число  $n_3/n_1$

$$m_3/m_1 = n_3 R_3^2 / n_1 R_1^2 = 1 - (n_2/n_1)^{1/2}; \quad n_3/n_1 = (1 - (n_2/n_1)^{1/2})(R_1/R_3)^2 \quad (2)$$

Радиус  $R_2$  и скорость вращения  $V_2$  получившихся больших вихрей слабо зависят от их количества, т.к.  $R_2/R_1 = V_2/V_1 = (n_1/n_2)^{1/4}$ . Относительная масса образовавшихся «больших» вихрей равна

$$m_2/m_1 = n_2 R_2^2 / n_1 R_1^2 = (n_2/n_1)^{1/2}.$$

Видно, что положительное решение получается только при  $n_2/n_1 < 1$ . При  $n_1=2$  и  $n_2=1$  в малые вихри переходит 0.3 от массы исходных вихрей.

Если  $V_3/V_1=1$ , то вклад малых вихрей в суммарную энергию сравним с полной энергией, а их вклад в момент импульса мал из-за того, что  $R_3 \ll R_1$ . Поэтому пренебрежем влиянием малых вихрей на момент импульса, но будем его учитывать в балансе энергии. В этом случае получим

$$m_3/m_1 = n_3 R_3^2 / n_1 R_1^2 = 1 - (n_2/n_1)^{1/3}; \quad n_3/n_1 = (1 - (n_2/n_1)^{1/3})(R_1/R_3)^2 \quad (3)$$

$$V_2/V_1=1; \quad R_2/R_1 = (n_1/n_2)^{1/3}$$

При  $n_1=2$  и  $n_2=1$  масса малых вихрей равна  $\sim 0.2$ .

Таким образом, общая масса малых вихрей слабо зависит от их максимальной скорости. Кроме того, все приведенные результаты практически не зависят от знака малых вихрей, оставаясь неизменными и в том случае, если одновременно имеются малые вихри разных знаков.

Можно предположить, что при взаимодействии нескольких одноименных вихрей, в ряде случаев они распадаются на две группы малых вихрей. При этом одна из групп образует «составной» центральный вихрь, состоящий из множества малых вихрей. Вторая группа – есть облако сравнительно малоподвижных вихрей по сравнению с максимальной скоростью вращения исходных вихрей /1,4/. Будем считать, что в образовавшемся центральном вихре малые вихри распределены равномерно, так что средняя плотность вещества в «составном» вихре постоянна  $\rho_2 < \rho_1$ , где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность вещества в исходных и в образовавшихся составных вихрях, соответственно. Кроме того, предположим, что скорость вращательного движения всех малых вихрей и скорость любого движения вихрей второй группы значительно меньше максимальной скорости вращения вокруг центра в образовавшихся «составных» вихрях первой группы. Легко убедиться, что при этих предположениях уравнения сохранения остаются такими же, как и (3), если заменить в этих уравнениях  $n_2$  на  $(n_2 \rho_2 / \rho_1)$ . Таким образом, радиус образовавшихся составных вихрей –  $R_2$ , максимальная скорость в них –  $V_2$ , а относительные масса и число малых вихрей будут равны

$$m_3/m_1 = n_3 R_3^2 / n_1 R_1^2 = 1 - \sqrt{(n_2 \rho_2) / (n_1 \rho_1)}; \quad R_2/R_1 = V_2/V_1 = (n_1 \rho_1 / n_2 \rho_2)^{1/4} \quad (4)$$

$$n_3/n_1 = (1 - \sqrt{(n_2 \rho_2) \cdot (n_1 \rho_1)}) (R_1/R_3)^2$$

Здесь, как и в предыдущем рассмотренном случае,  $n_1$  – число исходных вихрей,  $n_3$  – число малых вихрей второй группы,  $R_3$  – их радиус.

В рассматриваемом случае положительные решения имеют место при  $n_2 \rho_2 / n_1 \rho_1 < 1$ , т.е. допускают, чтобы число образовавшихся составных вихрей равнялось и даже превышало число исходных «сплошных» вихрей. Если из двух исходных вихрей образуется один «составной», то его масса составляет малую часть от массы исходных вихрей.

Отметим, что эффективная плотность  $\rho_2$  составного вихря слабо влияет на его диаметр и скорость. Выше предполагалось, что профиль скорости в образовавшихся и исходных вихрях одинаков.

Если профиль скоростей при взаимодействии одинаковых вихрей одного знака не изменяется, то облако малых вихрей ( $R_3/R_1 \ll 1$ ) может образоваться только, если после взаимодействия образуется меньшее, чем исходное, количество одинаковых вихрей. Однако, численное моделирование показывает, что при взаимодействии двух одинаковых вихрей одного знака, оба этих вихря могут сохраняться, одновременно образуя облако мелких вихрей  $/3/$ .

В связи с таким наблюдением рассмотрим взаимодействие  $n_1$  одинаковых вихрей одного знака, в результате которого образуются «большие» и «малые» вихри, причем профиль скорости вихрей после взаимодействия изменяется. В результате взаимодействия образуется  $n_2$  «крупных», сравнимых с исходными, вихрей и  $n_3$  «малых» вихрей, радиус которых мал по сравнению с первичными ( $R_3/R_1 \ll 1$ ). Кроме того, будем считать, что малые вихри имеют малую скорость  $V_3/V_1 \ll 1$ . Пусть масса, момент импульса и энергия исходных и образованных вихрей с учетом изменения профиля после взаимодействия есть

$$\alpha_i \rho R_i^2 \quad (5)$$

где  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  зависят от распределения скоростей.

Тогда законы сохранения при  $R_3/R_1 \ll 1$  и  $V_3/V_1 \ll 1$  имеют вид:

$$\alpha_1 n_1 R_1^2 = \alpha_2 n_2 R_2^2 + \alpha_3 n_3 R_3^2 \quad (6)$$

$$\beta_1 n_1 R_1^3 V_1 = \beta_2 n_2 R_2^3 V_2$$

$$\gamma_1 n_1 R_1^2 V_1^2 = \gamma_2 n_2 R_2^2 V_2^2$$

Из уравнения сохранения энергии и импульса получаем соотношение:

$$R_2/R_1 = (\gamma_2 / \gamma_1)^{1/4} (\beta_1 / \beta_2)^{1/2} (n_1 / n_2)^{1/4} \quad (7)$$

Подставив полученное соотношение  $R_2/R_1$  в закон сохранения массы, получим, что относительная масса образовавшихся «крупных» вихрей

$$m_2/m_1 = (\alpha_2/\alpha_1) (n_2/n_1) (R_2/R_1)^2 \quad \text{и малых вихрей} \quad m_3/m_1 = 1 - (\alpha_3/\alpha_1) (n_3/n_1) (R_3/R_1)^2$$

$$\text{равны:} \quad m_2/m_1 = (\alpha_2/\alpha_1) (\beta_1/\beta_2) (\gamma_2/\gamma_1)^{1/2} (n_2/n_1)^{1/2} \quad \text{и}$$

$$m_3/m_1 = 1 - (\alpha_2/\alpha_1) (\beta_1/\beta_2) (\gamma_2/\gamma_1)^{1/2} (n_2/n_1)^{1/2}; \quad (8)$$

Если коэффициент  $(\alpha_2/\alpha_1) (\beta_1/\beta_2) (\gamma_2/\gamma_1)^{1/2} < 1$ , то облако малых вихрей может образоваться при  $n_2/n_1 = 1$ , т.е. при образовании такого же, как в исходном случае, количества «больших» вихрей.

Такое положение возникает, если образующиеся «крупные» вихри имеют более крутой спад скорости, чем исходные вихри.

Характер изменения коэффициентов  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  при изменении профилей скоростей проиллюстрируем на примере.

Если от центра вихря до радиуса  $R$  скорость вращения в вихре растет пропорционально расстоянию от центра ( $r$ ), а при  $r > R$  спад скорости происходит по закону  $V = a/r^k$ , где  $a = R^k V$ ,  $k > 3$ , (при  $k < 3$  интеграл, выражающий момент импульса расходится), то  $\alpha = (40/k+1)^{2/(k-3)}$ ,

$$\beta = (\pi/2)(k+1)/(k-3), \quad \gamma = (\pi/2)(k+1)/(k-1). \quad (9)$$

Под массой вихря здесь понимается масса той части вихря, в которой находится 90% момента импульса.

По мере увеличения показателя  $K$  коэффициент  $\alpha$  быстро убывает (см. таблицу):

Таблица

K	4	5	7
$\alpha$	64	6.7	2.2

$\beta$	7.8	4.7	3.1
$\gamma$	2.6	2.3	2.1
$\alpha \beta \gamma^{1/2}$	1.3	2.1	1.5

Комбинация коэффициентов  $\alpha \beta \gamma^{1/2}$ , которая определяет массу образовавшихся вихрей, также уменьшается с ростом  $K$  (см. таблицу).

Если же взаимодействуют вихри разных знаков  $/5/$ , имеющие суммарный момент импульса равный нулю, то законы сохранения меньше ограничивают параметры образовавшихся вихрей, чем при взаимодействии вихрей одного знака.

Законы сохранения в случае образования малоподвижных ( $V_3/V_1 \ll 1$ ) малых вихрей такие же как (6) с той разницей, что суммарный момент импульса равен нулю.

Остановимся на одном простейшем случае, когда из 2-х исходных вихрей разного знака образуются два одинаковых вихря разного знака, причем характерные радиусы всех четырех вихрей одинаковы, и, кроме того, в результате взаимодействия образуются малые вихри с  $R_3/R_1 \ll 1$  и  $V_3/V_1 \ll 1$ . В этом случае

$$2 \alpha_1 R_1^2 = 2 \alpha_2 R_2^2 + n_3 \alpha_3 R_3^2$$

$$m_2/m_1 = (\alpha_2/\alpha_1) (R_2/R_1)^2 = \alpha_2/\alpha_1,$$

$$\text{Учитывая, что по условию (8) имеем} \quad m_3/m_1 = (\alpha_3/\alpha_1) (n_3/n_1) (R_3/R_1)^2 = 1 - \alpha_2/\alpha_1,$$

т.о. при увеличении крутизны спада скорости образуется облако малых вихрей.

Впервые на основании аналитических расчетов, основанных на уравнениях сохранения массы, момента импульса и энергии, сделана приближенная оценка количества и суммарной массы малых вихрей, образованных при взаимодействии нескольких более крупных вихрей.

### Литература

1. Похил А.Э. О возникновении и разрушении вторичных вихрей в процессе взаимодействия двух тропических циклонов. Метеорология и гидрология, 1991, № 9, 34-41.
2. Похил А.Э., Полякова И.В. О влиянии структуры взаимодействующих вихрей на их перемещение. Метеорология и гидрология, 1994, № 7, 17-23.
3. Похил А.Э. О некоторых условиях возникновения большого вихря и особенностях взаимодействия вихрей. Метеорология и гидрология, 1996, № 2, 24-32.
4. Похил А.Э., Ситников И.Г., Галкин С.А. Взаимодействие трех идеальных вихрей в численной модели и поведение группы реальных тропических циклонов Тихого океана. Метеорология и гидрология, 1997, № 2, 28-32.
5. Похил А.Э., Ситников И.Г., Зленко В.А. О поведении уединенных циклонических и антициклонических вихрей и их взаимодействии в однородных полях с учетом и без учета бета-эффекта. Метеорология и гидрология, 2000, № 9, 39-48.

## ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИРОДНОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Михневич Г.С., Грищенко В.А.

*Российский государственный университет им. И. Канта,  
факультет географии и геоэкологии, кафедра географии океана,*

Калининградская область располагает значительными и хорошо освоенными запасами подземных вод с высокой обеспеченностью населения разведанными запасами подземных вод - 0,56 м<sup>3</sup>/сут на человека и прогнозными ресурсами – 1,9 м<sup>3</sup>/сут на одного человека [10,15]. В области организовано централизованное водоснабжение на 26 крупных водозаборах практически во всех административных центрах. 857 одиночных скважин обеспечивают водой мелких потребителей [6]. Однако, на некоторых водозаборах уже зафиксированы случаи загрязнения подземных вод нефтепродуктами, двуокисью кремния, нитратами и аммонием, марганцем, а из компонент чрезвычайно опасного и высоко опасного класса - бериллием и бромидом [10]. С течением времени использование подземных вод в водоснабжении должно увеличиться, а это означает необходимость проведения оценки защищенности подземных вод Калининградской области.

Под **защищенностью** подземных вод принято понимать свойство природной системы, позволяющее сохранить на прогнозируемый период состав и качество подземных вод соответствующими требованиям их практического использования [9]. Термину «защищенность» по смыслу противоположен термин «уязвимость»: чем меньше защищенность, тем больше уязвимость и наоборот. Комитет по Технологии при Национальном Исследовательском Комитете США определил уязвимость подземных вод как «тенденцию или вероятность достижения загрязнителями определенной концентрации в подземных водах после попадания в зону над верхним водоносным горизонтом». Позже Комитет выделил два основных типа уязвимости: **специфической** - к какому либо загрязнителю или их группе и **присущей** - не зависящей от свойств и поведения специфических загрязнителей [9,16].

В основе концепции защищенности (уязвимости) подземных вод, возникшей в середине 60-х гг. во Франции, лежит понимание того обстоятельства, что в одних районах, благодаря сочетанию различных природных, в особенности, гидрогеологических, условий подземные воды имеют большую степень риска загрязнения, а, следовательно, потенциально более уязвимы, а в других – меньшую степень риска и меньшую уязвимость. Поэтому главным моментом при оценке защищенности или уязвимости подземных вод является анализ конкретных **природных особенностей** изучаемого региона [5,9,12]. Большинство стран проводит оценку защищенности подземных вод в качестве обоснования

гидрогеологических мер по их защите от различных видов загрязнения. Различие в природных условиях, в качестве и количестве информации, возможности проведения мониторинга состояния подземных вод дало основание для создания большого количества основных и модифицированных методик оценки защищенности [1,2,7,9,12,16]. Результат исследований природной защищенности обычно выражается в виде карт природной защищенности, составляемых для горизонта грунтовых вод и первого от поверхности основного горизонта [1,2,9,12].

При получении полуэмпирической оценки защищенности подземных вод Калининградской области были использованы следующие предположения.

1. Предложенный подход носит сугубо региональный характер, охватывая территорию всей Калининградской области, и предполагает использование большого объема фактического геологического материала.

2. Ввиду большого разнообразия загрязняющих веществ, их свойств и особенностей поведения, недостаточности знаний о характере сорбируемости этих веществ на первом этапе исследования защитных свойств природной системы региона оценка **присущей защищенности** выполнена без учета конкретных видов загрязнения.

3. В работе рассматривается природная защищенность первого от поверхности напорного горизонта среднерусско-валдайского межморенного водоносного горизонта, агII-IIIsg-v. Защищенность грунтовых вод не рассматривается, поскольку данный вопрос был подробно исследован еще в 80-х гг. прошлого века [1,7].

Известно [3,14], что водоупорные отложения области принадлежат ледниковой инженерно-геологической формации и их физико-механические свойства могут сильно изменяться не только по площади, но и в вертикальном направлении. Для иллюстрации данного обстоятельства в табл. 1 приведено распределение коэффициента фильтрации ( $k_f$ ) на водозаборе г. Гусева (табл. 1). Очевидна слоистость отложений. Для легких суглинков коэффициент фильтрации имеет значения 0,02-0,3 м/сут, тяжелые супеси характеризуются значениями  $k_f=0,2$  м/сут, супеси легкие - 0,3-3,6 м/сут. Глины оценены как нефилтрующие.

Целью данной работы является анализ влияния основных природных факторов - литологии, суммарной мощности слабопроницаемых отложений, глубины залегания подземных вод, фильтрационных свойств и др. - на защищенность подземных вод Калининградской области. Для оценки защищенности подземных вод среднерусско-валдайского межморенного водоносного горизонта использован полуэмпирический подход, сочетающий данные бурений по региону и известные локальные фильтрационные свойства соответствующих слоев. В частности, в работе были использованы материалы из фондов Калининградской гидрогеологической экспедиции, ОАО «Заповодпроект», проектного бюро «Нимб», давшие необходимый объем фактического материала (описания около 2000 буровых скважин).

Известно [2,4,5,12], что время проникновения загрязняющих веществ рассчитывается по формулам, связывающим значения пористости пород, величины инфильтрации, коэффициента фильтрации и др. Вместе с тем необходимый набор данных, как правило, неполон или отсутствует полностью, что делает данный способ расчета времени достижения загрязняющими веществами водоносного горизонта труднореализуемым. Для получения конкретных

количественных оценок защищенности подземных вод в конце 80-х гг. Г.Н. Ельциной была предложена оригинальная методика, ориентированная на параметризацию защитных свойств породы через мощность и литологический состав зоны аэрации [1,7,8]. Природная защищенность определялась при помощи показателя приведенной мощности верхнего водоупора ( $M_c'$ ), оцениваемой в метрах и характеризующей его надежность. Очевидно, что большая приведенная мощность верхнего водоупора обеспечивает большую степень защищенности вод первого водоносного горизонта. Приведенная мощность характеризует в своей совокупности мощность верхнего водоупора, его литологию и фильтрационные свойства.

Таблица 1.

Пример распределения коэффициентов фильтрации в вертикальном разрезе (скв. 12, ВНС «Центральный», г. Гусев)

Интервал отбора пробы, м	Коэффициент фильтрации, м/сут	Коэффициент неоднородности	Возраст	Название породы
3-5	0,04	>40	g III v	Суглинки легкие
7-10	не филт.	>44		Глины пылеватые
20-22	0,3	>75		Суглинки легкие
24-26	0,1	>90		Суглинки легкие
30-32	0,02	>100		Суглинки легкие
36-38	0,2	22		Супеси тяжелые
42-44	0,5	17		Супеси легкие
47-49	0,2	9		Пески
54-56	2,4	9		Супеси легкие
56-58	3,6	5		Супеси легкие
58-60	0,4	13		Супеси легкие
60-62	0,5	24		Супеси легкие
62-64	0,8	14		Супеси легкие
64-66	0,3	18		Супеси легкие
67-68,4	11,6	2		ag II-III sr-v
68,4-69	0,1	10	Супеси легкие	
69-71	8,7	6	Пески мкз	
71-72	7,9	2	Пески срз	
72-74,4	2,1	28	Супеси легкие	
75-77	0,9	19	Супеси легкие	
77-79	2,2	20	Пески мкз	
80-82	7,3	11	Пески мкз	
84-86	2,2	>13	Пески	
87-89	1,0	21	g II sr	
90-92	не филт.	29		Суглинки тяжелые
92-92,4	0,06	38		Супеси тяжелые

Анализ всего объема геологических данных по региону показал, что для расчета величины  $M_c'$  в разрезах скважин в зоне аэрации можно ограничиться

тремя типами литологические разновидностей пород: «а» - слабопроницаемые породы: супеси, песчаные глины, легкие суглинки ( $k_{\phi} \sim 0,1-0,01$ ); «в» - чередование непроницаемых и слабопроницаемых пород и средние суглинки; «с» - непроницаемые породы: ледниковые глины и тяжелые суглинки ( $k_{\phi} \sim 0,001$  и менее).

Приведенная мощность верхнего водоупора рассчитывается по формуле:

$$M_c' = M_c + 0,5M_v + 0,1M_a,$$

где  $M_c'$  - приведенная мощность верхнего водоупора;  $M_c$  - мощность пород группы «с»;  $M_v$  - мощность пород группы «в»;  $M_a$  - мощность пород группы «а» [1,7,8]. Очевидно, что данный подход основан на введении локально постоянных свойств грунта и переход от уравнений механики сплошных сред к простым интегральным оценкам [11].

По результатам расчетов была составлена карта распределения значений приведенной мощности верхнего водоупорного горизонта для территории Калининградской области (масштаб 1: 200000). В упрощенном виде она представлена на рис. 1. Анализ карты показал, что приведенная мощность верхнего водоупора среднерусско-валдайского горизонта составляет, как правило, 10 и более метров. На большей части Калининградской области значения  $M_c'$  составляют 10-20 м, демонстрируя слабую тенденцию к увеличению при продвижении на юг области, вслед за увеличением мощности ледниковых отложений, слагающих верхний водоупор. Максимальные значения  $M_c'$  наблюдаются в районах развития конечно-моренных отложений и могут достигать: на Виштынецкой возвышенности - 50-70 м, на Вармийской возвышенности - 30-50 м, на Инстрочской гряде и Самбийском полуострове - 30-35 м (рис. 1). Объясняется это наличием многометровой толщи слабопроницаемых отложений ледникового происхождения. Примерно пятая часть области характеризуется величиной  $M_c'$  менее 10 м, свойственной для плоских аллювиальных, аллювиально-морских, морских, озерных и волнистых флювиогляциальных равнин. Разрез отложений представлен песчаными глинами, супеями и легкими суглинками с включением валунов, гальки, гравия, песка разнозернистого. Характерно наличие гидрогеологических окон. Вместе с малой мощностью верхнего водоупора это создает условия для легкой фильтрации в горизонт и приводит к его загрязнению.

В распределении ареалов со слабой защищенностью наблюдается ряд закономерностей. **Первая группа ареалов** со слабой природной защищенностью располагается в зоне развития конечно-моренных отложений (центральная часть Самбийского полуострова, ареалы близ г. Багратионовска, Озерска, Гусева, западнее Виштынецкого озера). Их существование обусловлено присутствием флювиогляциальных отложений, образующих гидрогеологические окна и допускающие беспрепятственную фильтрацию загрязняющих веществ от поверхности к среднерусско-валдайскому горизонту. Районы со слабой защищенностью обычно не занимают больших площадей, за исключением Виштынецкой возвышенности, где наиболее опасными представляются ареалы южнее г. Гусева (здесь располагается водонасосная станция, снабжающая город) (рис. 1).

**Вторая группа ареалов** слабой защищенности приурочена к долинам рек: Преголи, Немана, Лавы и др. Уменьшение мощности слабопроницаемых ледниковых отложений или их полное уничтожение вследствие эрозийной деятельности рек, накопление в долинах хорошо фильтрующих отложений (как правило, супесчаных, песчано-гравийных, торфяных) способствует активному взаимодействию речных и подземных вод. Во время половодий возможно проникновение загрязненных речных вод в среднерусско-валдайский горизонт. Особого внимания заслуживает ареал между г. Калининградом и г. Гвардейском (рис. 1). Здесь располагается одна из водонасосных станций, обеспечивающая г. Калининград.

**Третья группа ареалов** приурочена к берегам морей и заливов, часто включает устьевые участки рек – Деймы, Мамоновки, Нельмы, Приморской (рис. 1). Слабая защищенность этих районов обусловлена активной переработкой прибрежных районов в ходе неоднократных трансгрессий (особенно литориновой). Среднерусско-валдайский горизонт перекрывается маломощным слоем слабопроницаемых пород (ледниковых или озерно-ледниковых по происхождению) и (или) непосредственно морскими и озерно-морскими песчаными образованиями.

**Взаимосвязь между литологией водоупора и азотным загрязнением.** Еще в конце 80-х гг. была установлена взаимосвязь между значением приведенной мощности и азотным загрязнением [1,7]. Как оказалось, при значении  $M'c$  менее 10 м будут свойственны следующие виды загрязнения.

- При мощности водоупора менее 10 м в случае монолитности водоупора воды могут быть грязными по содержанию нитритов. Водоупор обеспечивает умеренную инфильтрацию, но более быструю, чем в местах развития водоупора с мощностью более 10 м. Времени оказывается достаточно для осуществления начального этапа нитрификации:  $NH_4^+$  окисляется до  $NO_2^-$ . Формируется преимущественно нитритный тип загрязнения [1,7].

- При наличии окон отмечается значительное аммонийно-нитритное загрязнение. Происходит самое быстрое проникновение загрязнителей в водоносный горизонт и формируется аммонийно-нитритный тип загрязнения [1,7].

В случае значения  $M'c$  более 10 м возможны следующие особенности состояния подземных вод:

- Наилучшая защищенность свойственна территориям с приведенной мощностью водоупора 10,0 м и более, причем максимально чистые воды приурочены к площадям без литологических окон. Водоупор обеспечивает медленную инфильтрацию загрязняющих веществ. Почвенно-растительный комплекс усваивает максимальное количество удобрений, а процесс нитрификации оказывается более законченным:  $NH_4^+$  успевает окислиться до  $NO_3^-$ . Нитраты, как наиболее легко растворимая форма, выносятся грунтовыми водами, а воды среднерусско-валдайского горизонта остаются **чистыми** [1,7].

- В случае наличия литологических окон защищенность снижается, и на сельскохозяйственных площадях воды часто в значительной мере загрязнены аммонием. Скорость фильтрация загрязнителей ускорена. Почвенно-растительный комплекс усваивает меньше удобрений, а время фильтрации через зону аэрации недостаточно для завершения нитрификации. Ион аммония  $NH_4^+$  легко проникает через окна, формируя преимущественно **аммонийный тип** загрязнения [1,7].

Поскольку главным критерием защищенности является время движения загрязнителей до уровня подземных вод, необходимо попытаться определить его хотя бы и приближенно. Значения приведенной мощности верхнего водоупора может быть использовано для определения *условного времени* попадания загрязнения с поверхности земли в подземные воды:  $t = M'c / k_c$ . Значение  $M'c = 10$  м при  $k_c = 0,001$  м/сутки обеспечивает время проникновения загрязняющих веществ равное 10000 суток или 27 годам, т.е. стандартному расчетному сроку службы водозабора. При построении карт защищенности целесообразно использовать градации  $M'c$  кратные 10: 10, 20, 30 м и т.д., что примерно соответствует изохронам 30, 60, 90 лет и т.д. Кроме того, внутри ареалов, очерченных изохроной 30 лет необходимо выделить более мелкие интервалы условного времени попадания загрязнения в водоносный горизонт (1, 5, 10, 15 лет). В результате была построена карта изохрон условного времени проникновения загрязняющих веществ в агII-IIIг-в водоносный горизонт. Выделенные на карте градации позволили в первом приближении выделить территории, склонные к различным видам загрязнения, например, к микробиологическому загрязнению ( $t < 1$  года), к загрязнению пестицидами ( $t = 5-10$  лет). В то же время большая часть территории области характеризуется низкой вероятностью загрязнения в пределах расчетного срока эксплуатации водозаборов ( $t > 30$  лет) (рис. 2).

**Анализ соотношения уровней грунтовых и напорных вод.** Очень важным показателем защищенности напорных вод является соотношение уровней напорных и вышележащих грунтовых вод. Уровни безнапорных грунтовых вод Калининградской области расположены на глубине в пределах первых метров от поверхности. Более глубокое залегание уровня грунтовых вод возможно лишь для вод эоловых отложений и вод отложений донной морены. Среднерусско-валдайский межморенный водоносный горизонт характеризуется слабым напором, а в местах питания горизонта и его отсутствием. Пьезометрические уровни среднерусско-валдайского горизонта в сглаженном виде повторяют рельеф местности, имея наибольшие абсолютные отметки на возвышенностях (до 140-160 м). Глубина нахождения пьезометрического уровня может составлять в среднем от -30 до первых метров от поверхности земли.

Незначительная величина напора среднерусско-валдайского водоносного горизонта и неглубокое расположение уровней грунтовых вод делают возможным перелив безнапорных вод в слабонапорный. Практически повсеместно будет развито вертикальное движение грунтовых вод в среднерусско-валдайский водоносный горизонт. В тех районах, где было выявлено превосходство уровня напорных вод среднерусско-валдайского водоносного горизонта над уровнем грунтовых безнапорных, величина доминирования как правило составляет от 0,5 до 7 м.

Данное соотношение в условиях активной эксплуатации среднерусско-валдайского водоносного горизонта означает потенциальную возможность загрязнения напорного горизонта за счет перетока грунтовых вод. Отбор вод среднерусско-валдайского горизонта может вызвать понижение пьезометрического уровня, а как следствие спровоцирует процесс вертикального перемещения грунтовых вод. На участках интенсивной и продолжительной эксплуатации подземных вод образуются депрессионные воронки с глубиной понижения уровня от нескольких до 20 и более метров [10,15].

Специалистами Калининградского управления Роспотребнадзора отмечается ухудшение их качества, в особенности по микробиологическим и органолептическим показателям [6]. Резкое увеличение питания грунтовых вод за счет большого количества выпавших атмосферных осадков, быстрого снеготаяния, происходящее как напрямую, так и опосредованно, через связь с речными водами, приводит к значительному повышению уровня грунтовых вод. При близком расположении уровней грунтовых и межпластовых вод результирующее соотношение уровней в половодье или паводок может оказаться не в пользу межпластовых вод.

В ряде случаев в долинах рек Преголи, Писсы, Лавы и др. аллювиальные грунтовые воды и воды среднерусско-валдайского водоносного горизонта образуют единый в гидравлическом отношении водоносный горизонт. Отсутствие водоупора, безнапорный характер подземных вод, наличие многочисленных источников загрязнения, активная эксплуатация подземных вод привели к их загрязнению на месторождениях Светлое, Озерковское, Знаменское, Черняховское и др. [10,15].

Подводя итоги исследований можно констатировать следующие положения. Для территории Калининградской области характерны следующие особенности соотношения уровня межпластовых напорных (в частности, среднерусско-валдайских) и грунтовых безнапорных вод. В речных долинах и на склонах возвышенностей нижележащие водоносные горизонты могут в ряде случаев иметь более высокую пьезометрическую поверхность - наблюдается перелив, питание грунтовых вод за счет нижележащих. На водораздельных пространствах напоры в водоносных горизонтах уменьшаются с глубиной, происходит переток вод из грунтовых в межпластовые горизонты. В целом, гидродинамические условия, вызывая активное движение загрязненных грунтовых вод вертикально вниз в межпластовые воды, не способствуют защищенности подземных вод среднерусско-валдайского водоносного горизонта.

**Выводы.** Проведенный анализ соотношения уровней грунтовых и напорных вод среднерусско-валдайского водоносного горизонта позволяет предположить, что установленные величины условного времени проникновения загрязняющих веществ окажутся несколько больше, чем реальный срок инфильтрации. Поэтому, аналогично выводам, сделанным В.М. Гольдбергом [5,12], предполагается целесообразным выделение следующих категорий защищенности по отношению к напорным водам среднерусско-валдайского горизонта:

- Незащищенные – водоупор небольшой мощности ( $M_c < 10$  м), невыдержанный по площади, имеются нарушения сплошности (литологические «окна»), на отдельных участках водоупор отсутствует, уровни напорных вод располагаются ниже уровня грунтовых вод ( $H_2 < H_1$ ). Условное время проникновения загрязняющих веществ ( $t$ ) составляет менее 30 лет.

- Условно защищенные – напорные воды перекрыты выдержанным по мощности и без нарушения сплошности водоупором, величина  $M_c = 10-20$  м, уровни напорных вод расположены ниже или примерно на одной отметке с уровнями грунтовых вод ( $H_2 \leq H_1$ ). Условное время проникновения загрязняющих веществ ( $t$ ) составляет 30-60 лет.

- Защищенные – напорные воды перекрыты выдержанным по мощности ( $M_c > 20$  м) и без нарушения сплошности водоупором; уровни напорных вод ( $H_2$ ) выше уровня грунтовых вод ( $H_1$ ).  $t > 60$  лет.

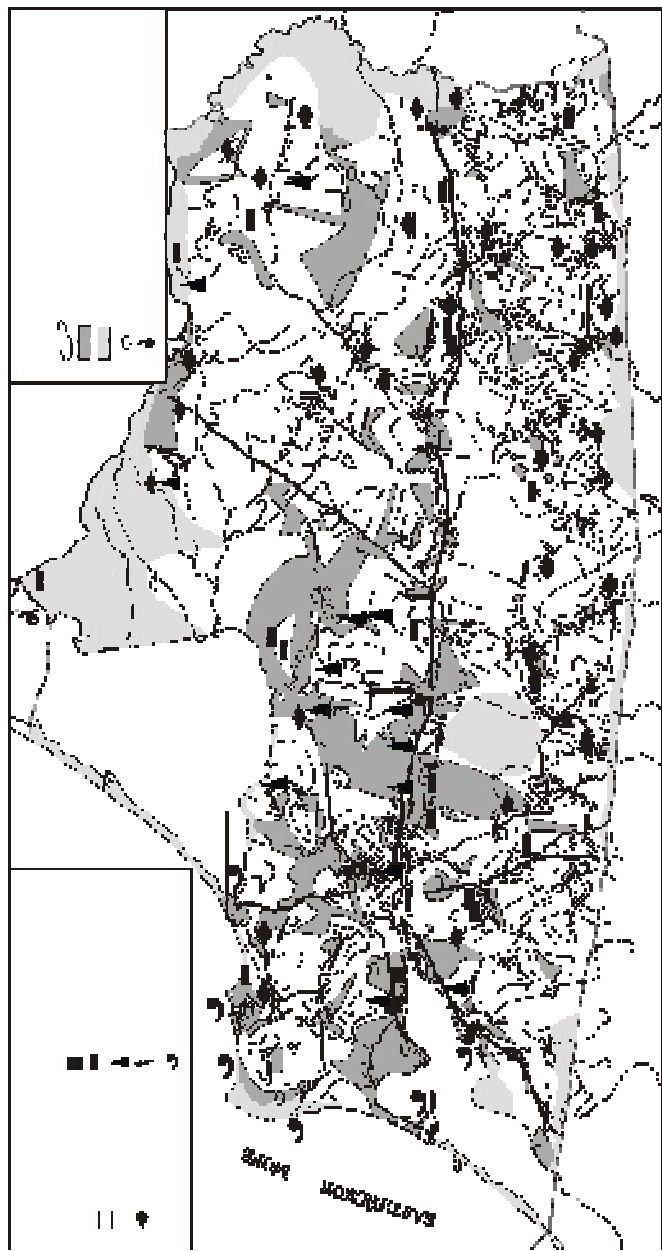


Рис. 1. Схема распределения значений приведенной мощности верхнего водоупора среднерусско-валдайского водоносного горизонта Калининградской области

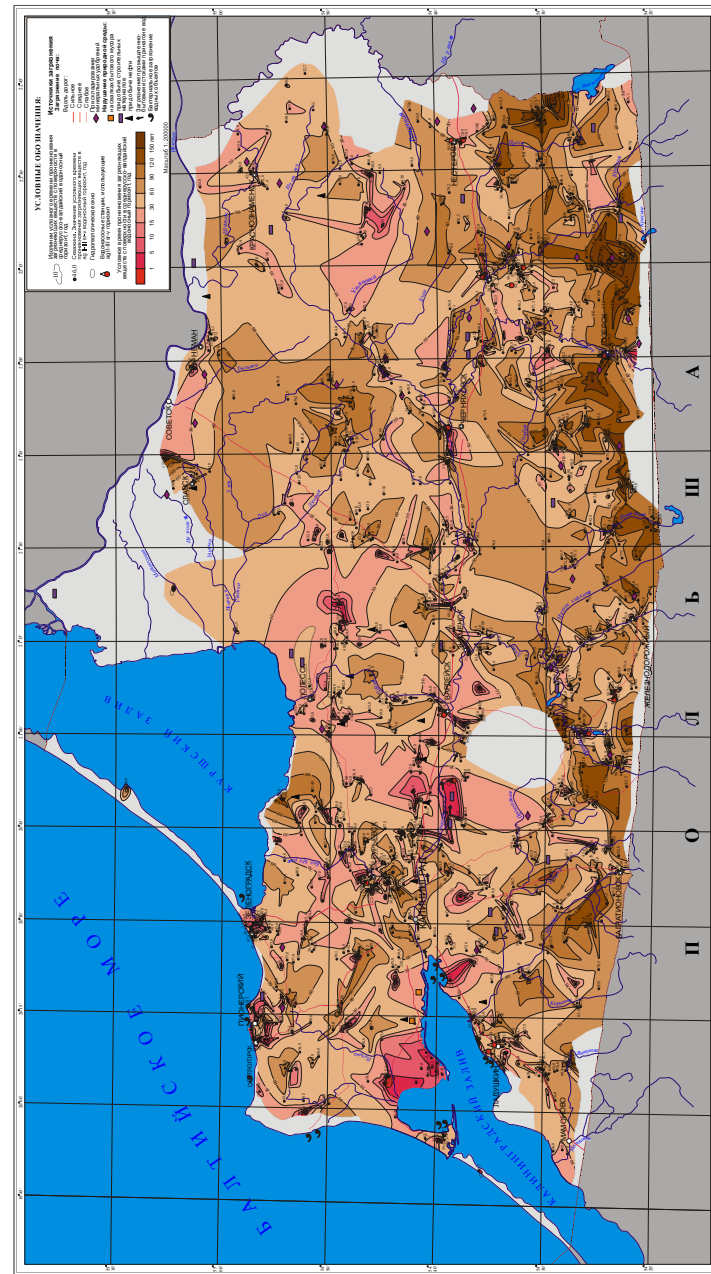


Рис. 2. Карта изохрон условного времени проникновения загрязняющих веществ с поверхности в среднерусско-валдайский водоносный горизонт

Косвенным подтверждением правильности сделанных выводов служит тот факт, что все водозаборы, на которых проявляются признаки загрязнения подземных вод, расположены в районах, охарактеризованных нами как незащищенные. В целом, предложенная методика, по-видимому, корректно усваивает имеющиеся региональные гидрогеологические данные и позволяет вполне успешно выполнить районирование территории области по степени защищенности подземных вод. Вместе с тем, очевидно, что для дальнейшего улучшения качества оценок и репрезентативности прогноза необходимы погружение всех гидрогеологических данных в геоинформационную систему и переход к дифференциальным моделям на основе классических уравнений механики сплошных сред.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Федеральной программы «Развитие научного потенциала высшей школы», проект 3714.

#### Литература

1. Барнинова Г.М., Ельцина Г.Н., Зотов С.И., Сергин С.Я. Об оценке и прогнозировании состояния подземных вод в связи с хозяйственной деятельностью. // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. VIII, Л.: Гидрометеоздат, 1985. С. 240–245.
2. Белоусова А.П. Качество подземных вод. Современные подходы к оценке. М.: Наука, 2001. 342 с.
3. Географический Атлас Калининградской области / Гл. ред. Орленок В.В. Калининград: Изд-во КГУ; ЦНИТ, 2002. 276 с.
4. Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 228 с.
5. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. 262 с.
6. Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Калининградской области в 2008 году». Калининград: Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Калининградской области, 2009. 399 с. (<http://39.rosпотребнадзор.ru/s/39>)
7. Ельцина Г.Н. Подземные воды. Оценка и прогнозирование их качества в связи с хозяйственной деятельностью // Основные направления научно-технического обеспечения развития Калининградской области. Тез. докл. Калининград, 1994. С. 29.
8. Ельцина Г.Н., Михневич Г.С. Мониторинг качества подземных вод // Геоэкология и природопользование. Тр. XII съезда РГО. Т.4. СПб.: РГО, 2005. С. 176-179.
9. Зекцер И.С. Подземные воды как компонент окружающей среды. М.: Научный мир, 2001. 328 с.
10. Информационная сводка о состоянии подземных вод на территории Северо-Западного федерального округа за 2007 год. С-Пб.: Северо-Западный филиал ФГУ НПП «Росгеолфонд», 2008. (<http://sevzapnedra.nw.ru>)
11. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: Наука. 1988. 788с.
12. Методическое руководство по охране подземных вод от загрязнения. СЭВ: Постоянная комиссия по геологии. М.: 1979. 63 с.

13. Михневич Г.С. Природная защищенность подземных вод и возможность ее оценки для Калининградской области // Проблемы географических наук. Материалы постоянных научных семинаров. Калининград: Изд-во. КГУ, 2002. С. 27-30.
14. Михневич Г.С., Гриценко В.А. Прогноз изменений качества подземных вод Калининградской области / Естественные и технические науки. М.: «Компания Спутник+», 2008, №4 (36). С. 246-250.
15. Региональный информационный бюллетень «Состояние недр территории Северо-Западного федерального округа Российской Федерации за 2008 год» С-Пб.: Северо-Западный филиал ФГУ НПП «Росгеолфонд», 2009. (<http://sevzapnedra.nw.ru>)
16. Vrba J., Zaporozec A. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. Int. Association Hydrogeologists // Hannover. Heise. 1994. V. 16, 131 p.

#### ОЦЕНКА КЛИМАТА КАРЕЛИИ КАК РЕКРЕАЦИОННОГО РЕСУРСА

Л.Е.Назарова

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Экологическая оценка климата требует учета множества параметров, сочетание которых обуславливает интегральный эффект его воздействия на человека. Для оценки влияния климата на человека предложены многочисленные биоклиматические коэффициенты, которые должны отражать совместное действие различных гидрометеорологических факторов. При этом климат, эффективность его влияния на здоровье человека зависят от сочетания с другими компонентами ландшафта - водоемами, растительным покровом, рельефом, почвой (Исаченко, 2003). Но именно климат играет роль прямого экологического, лимитирующего фактора, непосредственно обуславливающего степень комфортности среды обитания.

Оценки влияния среды обитания, в том числе и климата, на условия проживания населения были выполнены в СССР, в результате Республика Карелия была отнесена к северным территориям, на которые распространяются определенные социально-экономические льготы в связи со специфическими природными условиями. Первые исследования особенностей влияния среды обитания на здоровье населения Карелии (Олонецкой губернии) можно отнести к XVIII веку – времени создания первого в России курорта "Марциальные воды". Ряд работ, которые были выполнены в XVIII-XIX веке свидетельствуют о том, что в Олонецкой губернии эпидемическая ситуация была крайне неблагоприятной (Медико-географический справочник, 1990) в том числе из-за природных особенностей. В XX веке в СССР были выполнены исследования природных и социально-экономических особенностей, а также состояния здоровья населения КАССР, направленные на выявление региональных медико-географических закономерностей. В результате обобщения, выполненного коллективом авторов, был выпущен "Медико-географический справочник КАССР" (1990).



Одним из определяющих экологических факторов для климата Карелии является недостаточное количество поступающей солнечной радиации. В зимние месяцы максимальная высота солнца над горизонтом в районах Карелии не превышает 5°, в то время как ультрафиолетовые лучи с длиной волны короче 302–305 нм, благотворно влияющие на организм человека, достигают поверхности Земли только при высоте солнца над горизонтом не менее 25–30°. Повторяемость пасмурного состояния неба (8-10 баллов общей облачности) в осенне-зимний период составляет 83-88%, что приводит к уменьшению продолжительности солнечного сияния (ПСС) в Карелии до 34-37% от возможного. Теоретически возможная ПСС в Карелии составляет 4530 часов в год. Однако, действительное ее значение из-за пасмурной погоды уменьшается до 37 % от возможного и равно в среднем 1674 час/год. В Петрозаводске за год наблюдается в среднем 119 дней без солнца. Самыми «пасмурными» за период наблюдений за ПСС (1951-1990) был 1952 г., когда солнце не наблюдалось 151 день. Наибольшее число дней без солнца на юге Карелии отмечается в декабре (в среднем – 26 дней, в отдельные годы – 30 дней.).

Количество поступающей солнечной радиации определяет продолжительность холодного периода (со средними суточными температурами ниже 0°C), который в Карелии повсеместно превышает 200 суток. Продолжительность отопительного периода в среднем 250-270 дней. Лето (устойчивый переход среднесуточных температур воздуха через 10°C) наступает в конце мая на юге и в середине июня на севере республики. Устойчивый же период времени с температурами воздуха выше 15°C по северу Карелии бывает только в теплые годы (обеспеченность менее 50%).

Для решения многочисленных практических задач, в частности, связанных с оценкой воздействия климатических условий на здоровье населения, необходимы комплексные климатические характеристики. Простое суммирование отдельно действующих на человека температуры воздуха, давления, влажности и т.д. не идентично действию на него всего погодного комплекса. Комфортной можно считать погоду, когда сочетание метеорологических величин таково, что здоровый человек не испытывает ни жары, ни холода, ни духоты, т.е. чувствует себя наилучшим образом (Исаев, 2003). Обычно выделяют несколько типов погоды с различными сочетаниями температуры воздуха, скорости ветра и количества облачности. Н.А. Данилова (1980), взяв за основу физиолого-климатическую типизацию И.С. Кандрора, разработала оценочную шкалу для определения типа и благоприятности рекреационной погоды для летнего отдыха. В зависимости от сочетания величин метеорологических параметров (температура воздуха, облачность в баллах, скорость ветра, а также количество и интенсивность выпадения атмосферных осадков, туманы) выделяются пять типов погоды: холодная дискомфортная, прохладная субкомфортная, комфортная, жаркая субкомфортная и жаркая дискомфортная. Подробнее методика оценки типов погоды изложена в работе (Данилова, 1980).

Для определения типа погоды в районе г. Петрозаводска были использованы современные данные наблюдений на метеорологической станции Петрозаводск-Сулажгора за 1999-2008 гг. Рассматривалось сочетание указанных выше величин метеорологических параметров для каждого из восьми сроков наблюдения в сутки в течение рассматриваемого периода. Исследование

современных данных позволит оценить климатические условия района именно за тот период времени, когда во всем мире фиксируются наиболее значимые изменения в климатических системах различного масштаба.

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы.

Устойчивого периода комфортных климатических условий в районе Петрозаводска, так же, как и на всей территории Карелии, нет. В среднем за год наблюдается 12 дней, когда в течение целых суток погода остается комфортной. За 10 лет наблюдений в мае такой случай был отмечен только 1 раз. Наибольшее количество дней с комфортным типом погоды в течение суток возможно в июле и составляет в среднем 6,9 дней (рис. 1). Дискомфортность климата определяется в основном низкими температурами в сочетании со значительным количеством облачности и высокой влажностью воздуха. В среднем для Карелии число дней с относительной влажностью воздуха более 80% в течение суток составляет за год 150-170 дней, а с влажностью менее 30% - всего 3-9 дней.

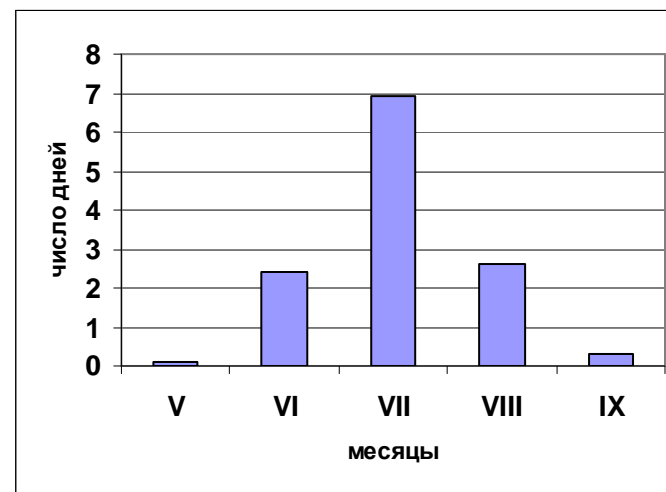


Рис. 1. Среднее число дней с комфортным типом погоды в течение суток в районе г. Петрозаводска за 1999-2008 гг.

Далее, как рекомендовано в методике (Данилова, 1980) и принято в биоклиматических исследованиях, определение рекреационного типа погоды производилось по ежедневным данным за 12 часовую срок наблюдений.

Установлено, что дни с комфортным типом погоды в дневные часы могут отмечаться в исследуемом районе в период с мая по сентябрь, достигая максимума в июле – августе (до 27 дней). Однако следует заметить, что комфортные условия в 12 часов дня не означают, что такая же погода будет наблюдаться в вечерние и, особенно, в ночные часы. Средняя минимальная температура июля 11.4 °C (абсолютный минимум -0.1 °C, 1958 г.), августа – +10.5°C (абсолютный минимум -1.7°C, 1980 г.). С октября по апрель погода холодная дискомфортная даже в дневные часы (рис. 2). В июне - августе в течение 1999-2008 гг. было отмечено в среднем 2-3 дня (максимальное количество 8 дней в июле 2003 г.), когда в полдень

наблюдалась жаркая субкомфортная погода (температура воздуха выше 24.0°C) и в среднем 1 день с жаркой дискомфортной погодой (температура воздуха выше 30°C). Таким образом, планируя провести свой отпуск в Карелии, необходимо помнить, что климатические условия республики ограничивают проведение тех или иных видов рекреационной деятельности, в данном случае, летнего отдыха.

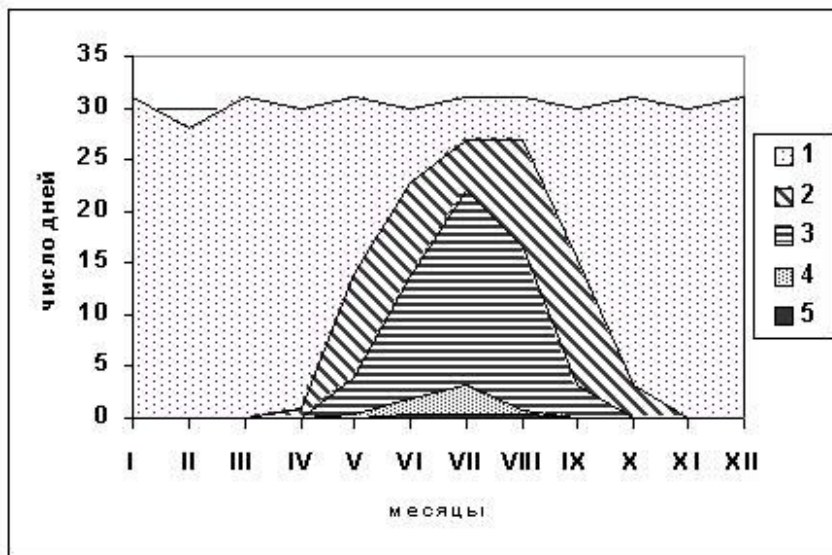


Рис.2. Распределение типов погоды по месяцам в районе г. Петрозаводска в 12 часов (1999-2008 гг.).

1 – холодная дискомфортная, 2 – прохладная субкомфортная, 3 – комфортная, 4 – жаркая субкомфортная, 5 – жаркая дискомфортная.

Почему именно район г. Петрозаводска интересен с точки зрения проведения летнего отдыха и туризма. Прежде всего, город расположен на берегу Онежского озера – второго по величине в Европе. В Онежском озере множество островов. Самый известный – Киж. Кижский погост включен в список ЮНЕСКО как выдающийся памятник цивилизации человечества. Но если об историко-архитектурном и этнографическом музее-заповеднике слышаны все, то окружающие его острова («Кижское ожерелье») с их старинными храмами и постройками менее известны. А об уникальном острове Радколье знают совсем немногие. Радколье – это скала, древнее языческое капище. Центр капища – громадный каменный идол. Рядом – остатки лабиринтов, поваленные на землю сейды. От северных шхер Заонежья можно направиться в противоположную часть Онежского озера – в край вепсов. Вепсы – потомки древнего народа, летописной веси. Вепсская земля богата природными дарами. Один из них – уникален. Это малиновый кварцит, или, как его называли раньше «шокшинский порфир». Из вепского порфира сделан саркофаг Наполеона. Близ Шокши восстанавливается

старинный Ионно-Яшезерский монастырь, основанный в 16 веке. На запад от Петрозаводска в местечках Лососинное и Машезеро до сих под можно найти следы старых дамб, построенных во времена Петра Великого для нужд оружейного завода, давшего имя столице Карелии – «Петрозаводск». Дорога на Кончезеро и Укшезеро тоже связана с именем Петра I. С 1719 г. царь неоднократно проезжал здесь, направляясь на лечение к минеральным источникам – «Марциальным водам». Это первый курорт в России. На небольшом расстоянии от Марциальных вод – природный заповедник, главная достопримечательность которого – водопад Кивач. Река Суна, за тысячелетия пробившая себе русло в древнем диабазе, в узком месте каньона с ревом сбрасывает со скал всю громаду своих вод. Даже простое перечисление достопримечательностей района г. Петрозаводска может занять не одну страницу.

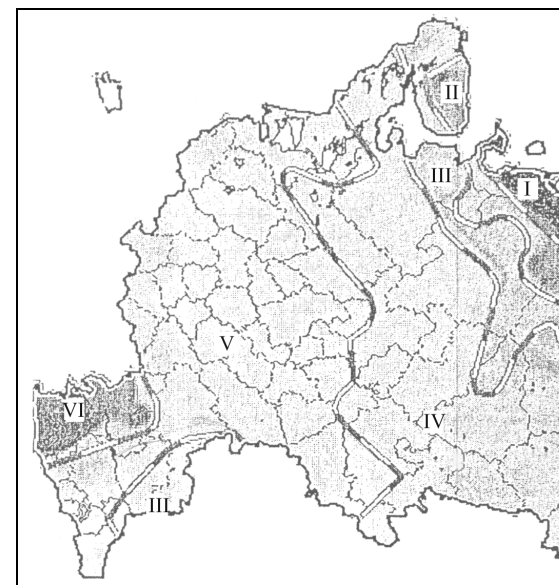


Рис. 3. Зоны природной дискомфортности, рассчитанные по интегральным показателям (Критерии и методические подходы, 2003).

I - Очень неблагоприятная, II - Неблагоприятная, III- Относительно неблагоприятная, IV- Относительно благоприятная, V-Умеренно благоприятная, VI- Зона климатического оптимума.

В последние годы предпринимаются попытки новых классификаций территорий России по уровню комфортности проживания населения по природно-климатическим факторам, дискомфортности жизнедеятельности населения с выделением новой географической границы Севера (Критерии и методические подходы, 2003). В этом документе сделана попытка использования интегрального принципа оценки зон комфортности и/или дискомфортности территории для проживания населения и районирования территории РФ. Авторы методики

предложили что, «этап получения интегральной оценки состоит в вычислении в каждой точке градусной сетки среднего балла показателей зональных факторов и суммы баллов показателей азональных факторов и их суммировании». В результате вычисления интегральных показателей было выполнено районирование территории России (Рис. 3).

Отметим, что при таком подходе к классификации территории России отсутствие таких неблагоприятных, опасных явлений как тайфуны, цунами, штормовые нагоны, оползни и т.д., типичных для одних регионов, и не характерных для других, например, для Карелии, может иметь большой «вес» в интегральной характеристике. В этом случае, Карелия попадает в одну зону комфортности с Москвой, Московской, Калининградской областью, частью Краснодарского края. Очевидно, такое сравнение ошибочно.

#### Литература

- Данилова Н.А. Климат и отдых в нашей стране – М.: Мысль. 1980. – 155 с.  
Исаев А.А. Экологическая климатология – М.: Научный мир, 2003. – 472 с.  
Исаченко А.Г. Введение в экологическую географию // Изд. СПб. Университета. 2003, 191 с.  
Медико-географический справочник Карельской АССР // Под ред. А.А.Келлера. Петрозаводск. 1990. 120 с.  
Критерии и методические подходы для районирования территории РФ по природным условиям жизнедеятельности населения, Минэкономразвития, 2003.

#### МЕХАНИЗМ ТОКСИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ И ИОНОВ КАЛИЯ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Петрова Г.П., Петрусевич Ю.М., Сергеева И.А., Сергеев С.Е., Федорова К.В., Тихонова Т.Н.

*Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет*

С помощью ряда физических методов показано, что малые концентрации ионов тяжелых металлов, таких как цезий, рубидий, свинец, кадмий, медь, и др., в том числе ионы калия, обладающих большими ионными радиусами, при взаимодействии с поверхностью различных белков и ферментов вызывают образование дипольных наноструктур. В результате происходит нарушение нормального метаболизма в организме человека с последующим возникновением патологических состояний.

Физический механизм токсического воздействия тяжелых металлов на живые организмы может быть связан с образованием надмолекулярных структур – дипольных белковых кластеров в плазме крови и лимфе. Этот чисто физический механизм кластеризации белков и ферментов открытый в нашей лаборатории,

позволяет объяснить токсическое действие малых концентраций тяжелых металлов на живые организмы.

Это явление может быть изучено в сыворотке крови или в модельных системах таких, как водные растворы альбуминов и глобулинов.

В наших работах [1,2,3,4] было исследовано взаимодействие ряда белков – альбуминов (яичного, человеческого и бычьего), гамма - глобулина, лизоцима, коллагена с тяжелыми металлами - *Cs*, *Rb*, *Cu*, *Cd*, *Pb* и др. оптическими методами: рассеяния света Рэлея-Дебая, фотонно-корреляционной спектроскопии и поляризации флуоресценции.

Как показали наши исследования, особую роль играет взаимодействие с перечисленными выше белками такого важного для жизнедеятельности организма элемента, как калий. Наличие в растворах белков ионов калия *K* также приводит к возникновению дипольных нанокластеров.

Таблица  
Металлы и их ионные радиусы

МЕТАЛЛ	Na	K	Cs	Rb	Cu	Cd	Pb
ВЕЛИЧИНА ИОННОГО РАДИУСА	0,87 Å	1,33 Å	1,67 Å	1,47 Å	0,96 Å	1,14 Å	1,2 Å

Выявлено, что на процесс кластерообразования влияет величина ионного радиуса металла. В случаях, когда в растворах белков имеются малые ионы типа *Na*, образование дипольных кластеров не наблюдается, поскольку ион натрия находится у поверхности белка в окружении молекул воды и не может соединиться с противоположным зарядом на поверхности белка. Ионы с большим радиусом (смотри таблицу), такие как *Cs*, *Rb*, *Cd*, *Pb*, а также *K*, не могут удерживать на своей поверхности воду, т.к. энергия взаимодействия заряд иона – дипольная молекула воды обратно пропорциональна четвертой степени ионного радиуса и может быть сравнима с тепловой энергией.

Поэтому ионы присоединяются к отрицательным зарядам на поверхности белка непосредственно без водной оболочки. Энергия взаимодействия диполей воды с зарядом иона становится меньше энергии кулоновского притяжения ион и противоион поверхности белка. Если концентрация перечисленных выше ионов увеличивается, то наступит момент электрической разрядки поверхности белка, когда кулоновское отталкивание между макромолекулами белка сменится диполь-дипольным притяжением между ними. Результатом будет образование белковых дипольных кластеров. Этот

процесс возможен только для белков и ферментов, поскольку только у них наблюдаются гигантские дипольные моменты, достигающие величины в тысячу D (дебай).

В наших работах [1,2] с помощью метода интегрального рассеяния света Рэлея-Дебая в соответствии с формулой :

$$\frac{cH}{R_{90}} = \frac{1}{M} + 2Bc + \dots$$

определялись два независимых молекулярных параметра  $M$  и  $B$  (здесь  $R_{90}$ ,  $M$ ,  $c$  – соответственно, рэлеевский коэффициент рассеяния раствора, масса рассеивающих частиц и концентрация). Было показано, что коэффициент межмолекулярного взаимодействия ( $B$ ) белков в растворах, содержащих малые ионы, имеет классическую (параболическую) зависимость от  $pH$  с минимумом в изоэлектрической точке. При наличии в растворах белков ионов тяжелых металлов, характер межмолекулярного взаимодействия резко изменяется. Вместо кулоновского отталкивания наблюдается диполь-дипольное притяжение. Зависимости  $B$  от  $pH$  вместо минимума имеют максимум вблизи изоэлектрической точки, причем величина максимума увеличивается с ростом концентрации тяжелых ионов.

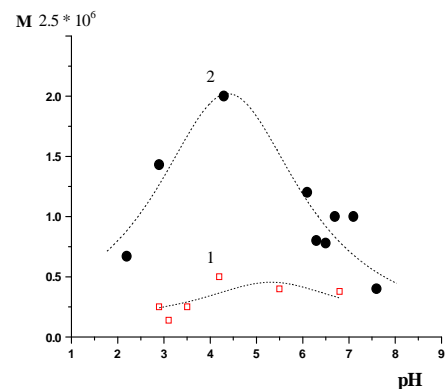
Смена характера межмолекулярного взаимодействия приводит к появлению в растворах белков надмолекулярных наноструктур – дипольных белковых кластеров, масса которых растет в области изоэлектрической точки белка с ростом концентрации тяжелых ионов. На рис.1 (а и б) приведены  $pH$  зависимости массы рассеивающих частиц в растворах яичного и сывороточного (BSA) альбуминов, содержащих ионы цезия и свинца.

Роль калия и натрия в жизнедеятельности организма очень важна. Как известно, натрий, в основном, содержится в крови, в плазматической жидкости межклеточного пространства, в то время как калий находится преимущественно внутри клеток. Электрические свойства (потенциал покоя – потенциал действия) большинства клеток определяются этими двумя ионами, а также ионом  $Ca$ , поэтому они называются потенциалом - образующими. До сих пор нет ясного понимания механизмов взаимодействия этих ионов с различными белками, включая белки плазмы крови, такие, как альбумин и  $\gamma$ -глобулин.

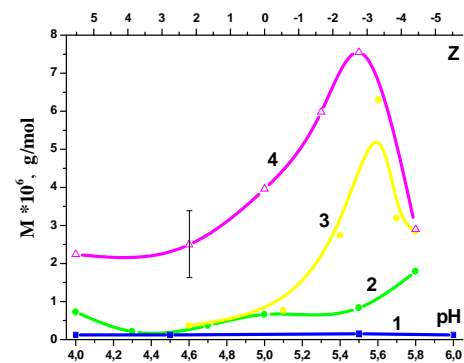
Эти кривые указывают на эффект кластеризации белков, аналогично тому, что наблюдается для растворов, содержащих тяжелые металлы. Однако в данном случае максимальная масса образующихся наночастиц наблюдается в области несколько смещенной от изоэлектрических точек альбумина и глобулина в сторону физиологических значений  $pH$ .

Безусловный интерес представляют собой исследования свойств водных растворов белков, являющихся основными структурными элементами тканей живых организмов, к которым относится фибриллярный белок – коллаген.

Методами фотонно-корреляционной спектроскопии и поляризации флуоресценции были получены  $pH$  зависимости коэффициентов трансляционной и вращательной диффузии белков коллагена и бычьего сывороточного альбумина в растворах, содержащих ионы различных ионных радиусов.



а)



б)

Рис. 1а) и 1 б)

а) Рост массы рассеивающих частиц в водном растворе яичного альбумина в присутствии соли CsCl: 1 -  $\mu = 0.1$ , 2-  $\mu = 0.2$

б) Зависимости массы рассеивающих частиц  $M$  от поверхностного заряда BSA в растворе ацетата свинца при различных концентрациях. 1 – без соли, 2 –  $\mu=0,00075$ , 3 –  $\mu=0,00105$ , 4 –  $\mu=0,0015$  моль/л

На рис.2(а и б) показаны зависимости эффективной массы рассеивающих частиц для растворов, содержащих ионы калия, а) - альбумина и б)  $\gamma$  - глобулина.

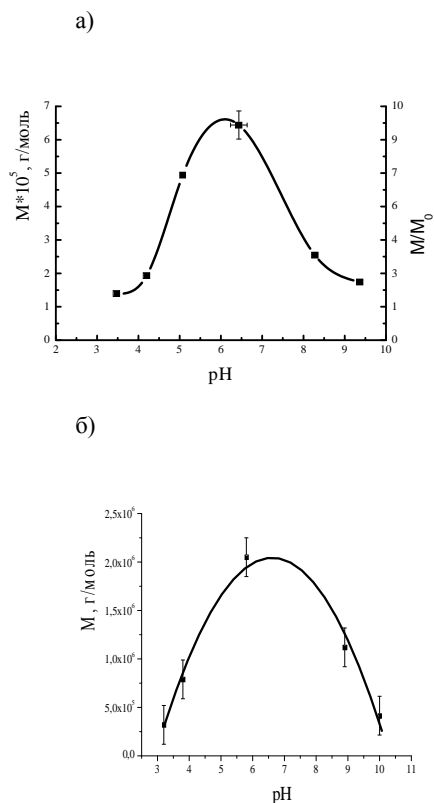


Рис.2. Зависимости эффективной массы рассеивающих частиц для растворов, содержащих ионы калия, а) - альбумина и б)  $\gamma$  - глобулина

Обнаружено, что размер ионного радиуса металла влияет на межмолекулярные взаимодействия и подвижность молекул белков в растворе. Воздействие ионов калия, имеющих больший ионный радиус по сравнению с ионами натрия, аналогично воздействию ионов тяжелых металлов, т.к. приводит к агрегации молекул белка коллагена вблизи изоэлектрической точки. Это проявляется в уменьшении в два раза величины коэффициента трансляционной подвижности, при этом масса рассеивающих частиц увеличивается на порядок.

Метод поляризации флуоресценции основан на том эффекте, что за время жизни возбужденного состояния флуорофора за счет вращательной диффузии изменяется направление испускающего диполя, что уменьшает измеряемую анизотропию. Угол поворота диполя за время жизни возбужденного состояния молекулы в растворителе определяется температурой и вязкостью растворителя, объемом молекулы и длительностью возбужденного состояния.

Если связать время корреляции вращательной диффузии  $\tau_{вр}$  с молекулярными параметрами флуоресцирующего объекта, то можно получить зависимость для степени поляризации флуоресценции:

$$\tau_{вр} = \frac{V\eta}{kT} = \frac{M\eta}{\rho kT}$$

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{P_0} + \left( \frac{1}{P_0} - \frac{1}{3} \right) \frac{\tau_{фл}}{\tau_{вр}}$$

Здесь  $P$  — наблюдаемая степень поляризации;  $P_0$  — ее предельное значение в отсутствие деполяризации;  $V, M$  — объем и масса вращающейся молекулы;  $\rho$  — ее плотность;  $\tau_{фл}$  — время жизни возбужденного состояния;  $\tau_{вр}$  — время корреляции вращательной подвижности (переориентации) молекулы;  $k$  — константа Больцмана,  $\eta$  — вязкость раствора,  $T$  — абсолютная температура. Степень поляризации убывает с увеличением подвижности излучающей молекулы и может служить мерой вращательного движения.

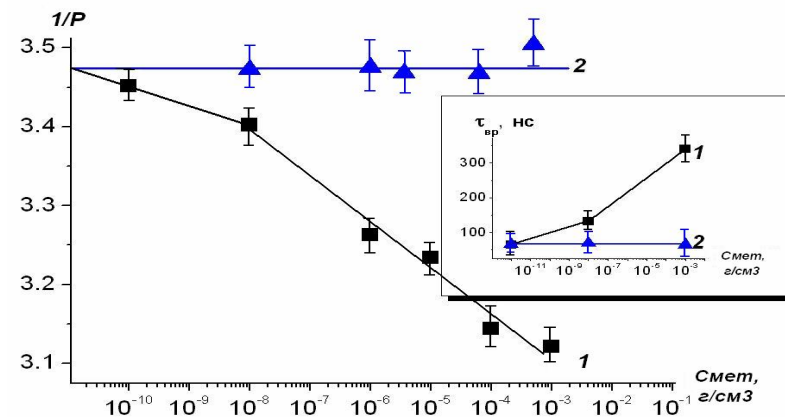


Рис.3 Зависимость обратной величины степени поляризации флуоресценции альбумина в растворах, содержащих калий и натрий от концентрации соли металла (калия (кривая 1) и натрия (кривая 2)).

Из рис. 3 видно, что даже очень малые концентрации калия существенно меняют коэффициент поляризации флуоресценции альбумина, что, вероятно, связано с усилением процесса кластеризации белка. Это подтверждается также ростом времени корреляции вращательной подвижности (правый график на рис. 3), которое увеличивается с ростом концентрации калия в растворе белка.

Таким образом, нами обнаружен и объяснен механизм образования наноразмерных белковых кластеров в растворах белка, содержащих ионы тяжелых металлов и калия.

В клетках организма человека калий, в основном, находится внутри клеток. Так в мышечных клетках калия почти в 50 раз больше, чем снаружи. Для

поддержания такой концентрационной неравновесности затрачивается большая энергия. С помощью молекулярных машин – АТФаз - натрий из клеток выкачивается, и в клетки закачивается калий. При патологическом состоянии у человека может происходить разрушение клеточных мембран (лизис клеток), когда выходящий из клеток калий нарушает процесс синтеза белков и ферментов и приводит к кластеризации макромолекул.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (грант 09-02-00438-а)

### Литература

1. G.P. Petrova, Yu.M. Petrusevich, A.N. Evseevicheva. // Gen. Phys. and Biophys., 1998, V.17(2), С.97
2. Петрова Г.П., Петрусевич Ю.М. // Биомед. радиоэлектроника. 2000. №3. С. 41.
3. Петрова Г.П., Петрусевич Ю.М., Тен Д.И. // Квант. Электроника. 2002. 32, №10. С. 897.
4. И.А. Сергеева<sup>1,а</sup>, Н.В. Сокол<sup>1,б</sup>, М.С. Иванова<sup>1</sup>, Г.П. Петрова<sup>1</sup>, Ю.М. Петрусевич<sup>2</sup> // ВМУ. Серия 3 Физика. Астрономия. 2009. №4. С. 85

## ОЦЕНКА МИКРО- И МАКРОПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПРИРОДНЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕДАХ В СВЯЗИ С ПРОБЛЕМОЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

Г.И. Петрунин, В.Г. Попов

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова,

Физический факультет

В работе приводятся и обсуждаются результаты комплексного экспериментального определения микро- и макроскопических параметров процесса кондуктивной теплопередачи (длина свободного пробега фононов, температуропроводность, удельная теплоемкость, теплопроводность) в образцах вулканических стекол, в структурных (аморфно-кристаллических) разновидностях природного кремнезема и в искусственных стеклах (плавленый кварц и ситалл СО115М). Полученный материал, вместе с ранее опубликованными по кристаллическим и аморфнокристаллическим породам, дает возможность оценить тепловые свойства вещества магматических (вулканических) очагов и других зон в недрах Земли с повышенным содержанием аморфной (стекловатой) фазы. Показано, что в астеносферном слое кондуктивные теплопроводность и

температуропроводность достигают своего минимума ( $a=5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda=2.0 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ), способствуя возникновению первичных магматических очагов. Полученные результаты необходимы для изучения поведения и термического режима вулканических зон, прогнозирования их активности и воздействия на климат и биосферу.

### ВВЕДЕНИЕ

Вулканическая активность Земли, несомненно, является одним из важнейших факторов, влияющих на климат и эволюционные процессы в ее биосфере. Огромное количество флюидов, выбрасываемых в атмосферу магмой во время извержений, неоднократно приводило к длительным периодам перемены климата, которые, по-видимому, имели иногда и катастрофические последствия для отдельных или многих биологических видов, в том числе и для человека.

В свою очередь, вулканическая активность Земли определяется многими геолого-геофизическими факторами, но, в первую очередь, тепловой подпиткой, прежде всего, из верхних горизонтов мантии Земли, где температура пород приближается к температуре их плавления [1]. Таким образом, изучение вулканической деятельности и прогнозирование извержений тесно связано с изучением термического режима магматических очагов и всей толщи пород от очага до кальдеры. В связи с этим возникает вопрос оценки макро- и микропараметров процесса теплопередачи в аморфных и аморфно-кристаллических средах, большая часть которых является продуктами вулканической деятельности, входящими в состав вещества литосферы. Они встречаются как в виде вулканических стекол, так и выполняют роль цемента в широко распространенных эффузивных породах (базальтах), достигая по содержанию 50% и более от объема породы.

Как известно, основными факторами, контролирующими интенсивность теплопередачи в минералах и горных породах при неизменных термодинамических условиях, являются их структура и химический состав. Под структурой породы, как правило, понимается степень ее раскристаллизации или, точнее, кристалличности, в зависимости от которой породы могут быть аморфной (стекловатой), аморфно-кристаллической и кристаллической структуры и достаточно сильно различаться по своим теплопереносным свойствам.

Тем не менее, анализ литературных источников показал, что процесс теплопередачи в стекловатых (аморфных) породах, к настоящему времени, изучен явно недостаточно и, как правило, информация о нем базируется на отдельных измерениях и носит чисто феноменологический характер.

Особенности кондуктивного теплопереноса в твердых разупорядоченных средах обусловлены, прежде всего, отсутствием дальнего порядка в расположении ионов и атомов. С одной стороны, этот беспорядок препятствует формированию фононных длинноволновых пакетов, а с другой – упругие волны смещений, переносящие тепловую энергию, более интенсивно рассеиваются на флуктуациях масс и упругих модулей, плотность которых значительно выше в аморфных структурах по сравнению с кристаллами. Существует предположение, что средняя длина свободного пробега упругой волны смещений, для геофизических разупорядоченных сред, уже при комнатных температурах очень мала и сравнима с удвоенным межатомным расстоянием /плавленый кварц/, чем и объясняется их аномально

низкие значения температуропроводности и теплопроводности. Что касается других физических параметров, определяющих величину теплопроводности твердых тел: теплоемкости и скорости звука / скорости распространения волн смещений между актами рассеяния/, то поскольку средние значения масс и упругих констант, определяющих эти величины, практически одинаковы при данных термодинамических условиях для аморфных структур и их кристаллических аналогов, указанные параметры должны отличаться незначительно. Таким образом, при исследовании процесса теплопередачи в аморфных и аморфно-кристаллических структурах, как и в кристаллах, наиболее информативным микропараметром является средняя длина свободного пробега волн смещений (фононов), которая может быть рассчитана из экспериментальных определений температуропроводности и скорости звука. Ее величина и характер поведения от различных петрографических и термодинамических параметров несет информацию о процессе теплопередачи на кинетическом уровне, позволяет перейти в исследовании от феноменологического к микроскопическому подходу и дать ответы на вопросы, связанные с особенностями механизма кондуктивного теплопереноса в стекловатых, стекловатокристаллических и скрытокристаллических средах.

#### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. АППАРАТУРА. МЕТОД.

В настоящей публикации приводятся и обсуждаются результаты по комплексному определению микро- и макроскопических параметров процесса кондуктивной теплопередачи, средней эффективной ( $\bar{l}$ ) и минимальной ( $l_{min}$ ) длины свободного пробега фононов, температуропроводности ( $a$ ) удельной теплоемкости ( $C_p$ ) и теплопроводности ( $\lambda$ ) в образцах вулканических стекол (обсидианах), в структурных разновидностях природного кремнезема и в искусственных стеклах: плавленом кварце (марки KB) и ситалле (марки СО 115М). Полученный материал, вместе с ранее опубликованным по аморфно-кристаллическим породам (базальтам) [2 - 4], дает возможность, как нам кажется, приступить к выработке рекомендаций по оценке тепловых свойств вещества магматических (вулканических) очагов и других зон в недрах Земли с повышенным содержанием аморфной (стекловатой) фазы. В качестве примера приводится расчет теплофизических характеристик астеносферного слоя где, как предполагают, и находятся первичные магматические очаги, а теплопроводность достигает своего минимума, способствуя накоплению тепловой энергии, созданию повышенных надиабатических температурных градиентов и, как следствие, частичному подплавлению астеносферного вещества.

Были изучены 6 образцов вулканических стекол кислого состава (75–80% SiO<sub>2</sub>), отобранных в различных регионах Евроазиатского континента (Малый Кавказ, Армения, Камчатка), которые отличались достаточно широким диапазоном пористости (5 -17%), 12 образцов структурных разновидностей природного кремнезема (4 образца опаловых гейзеритов, 2 образца халцедонов и 6 образцов кварцитов).

В силу своей исключительной распространенности в осадочных, метаморфических и эффузивных породах земной коры, при экспериментальном изучении влияния структурного фактора породы на распространение тепловой энергии, наиболее удобным объектом является кремнезем. Кремнезем пород данного

типа разнообразен, но, в основном, принадлежит трем минералогическим типам: аморфный опал, скрытокристаллический халцедон и кристаллический кварц.

Опалы представляют собой типичные твердые гидрогели, возникшие в результате дегидратации богатых водой гелей кремнезема. Такие гели в земной коре отлагаются гидротермальными растворами зоны гипергенеза и называются гейзеритами (кремнистыми туфами). Существенно опаловые камчатские гейзериты отличаются тождественностью составов и на 85 – 92% состоят из кремниескислоты [5]. Опал SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O также выполняет трещины и миндалины в эффузивных породах (реолитах, трахитах, андезитах), в осадочных породах и корках выветривания на серпентинах. Считается, что благородный опал имеет упорядоченную структуру, которая не является в строгом смысле кристаллической структурой, а построена плотноупакованными шариками кремнезема диаметром до 0.1 мкм, расположенными по гексагональной или кубической плотнейшей упаковке. Размеры плотноупакованных доменов могут быть весьма значительными или отсутствовать вообще, как у гейзеритов. Пустоты между шариками заполнены воздухом или водой. Таким образом, можно считать, что опалы занимают некоторое промежуточное положение между сугубо аморфными и кристаллическими структурами [6].

В отличие от опалов – гейзеритов, халцедоны имеют скрытокристаллическую структуру. Они плотные и сложены блоками кремнезема, средний размер которых приблизительно тот же, что и шарика гейзеритов, но не содержат жидкой или газовой фазы. Степень их кристалличности так же, как и третьей распространенной модификации кварца, определяется размером и ориентацией структурных блоков относительно друг друга. В кристаллическом кварце, который на 99% слагает метаморфические породы – кварциты, размеры блоков на 2-3 порядка больше, чем в халцедонах, а размеры зерен кварца, сложенных этими блоками могут достигать нескольких миллиметров [7]. Нужно отметить, что в научной литературе нами не обнаружено данных по измерениям тепловых свойств гейзеритов и халцедонов и вполне вероятно, что они исследуются впервые. Наконец, по-видимому, также впервые был изучен комплекс теплофизических параметров искусственного стеклокристаллического материала – оптического ситалла СО 115М и выполнены измерения температуропроводности плавленого кварца (марки KB) абсолютным методом, без использования эталона. В этом случае, небольшая инерционность измерительной схемы, которая вводится в виде поправки в фазу при измерении температуропроводности, определяется непосредственно путем проведения измерений на тонкой медной фольге, которая не дает ощутимого вклада в измеряемый фазовый сдвиг или во временное запаздывание между вводимой в образец мощностью и изменениями температуры на противоположной от нагреваемой стороне плоского образца. Что касается удельной теплоемкости кварцевого стекла марки KB, то, к сожалению, в виду отсутствия прецизионного калориметра, в качестве эталона для расчета вводимой в образец мощности при измерениях теплоемкости для всех изучаемых объектов было использовано, как всегда, усредненное значение  $C_p$  плавленого кварца из литературных источников [8, 9].

Химический состав исследованных образцов, представленный в таблице 1, был получен нами на микронзондовом измерительном комплексе на базе растрового электронного микроскопа «Jeol» ISM-64801,V в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии геологического факультета МГУ с

относительной ошибкой не более 2% для концентраций свыше 10 массовых процентов и не более 5% для концентраций в диапазоне 5 – 10 массовых процентов.

По химическому составу рассчитывался средний атомный вес  $\bar{M}$  вещества образцов обсидианов и ситалла, который в пределах ошибки измерений оказался постоянным ( $\bar{M} = 21$ ) и не намного отличающимся от  $\bar{M}$  кремнезема ( $\bar{M} = 20$ ).

Таблица 1.

Средний химический состав исследованных образцов (массовые %)

	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	FeO
CO115M	66,8	2,6	0,4	0,2	21,5	4,2		
обсидианы	75,9	4,3		4,2	13,8		0,8	0,8

Измерения тепловых свойств проведены на установке с плоским вариантом температурного поля (пластина) и оптическим (бесконтактным) источником тепловой энергии методом регулярного теплового режима 2-го рода (РТР II-го рода) в интервале температур 300 – 370К. Кроме того, температуропроводность ( $a$ ) образцов измерялась также в температурном диапазоне 350 – 750К в регулярном тепловом режиме III-го рода (температурные «волны»), позволяющем исключить искажающее влияние теплообмена излучением с поверхности образцов на результаты измерений, которое может быть существенным для плохих проводников тепла уже при повышенных температурах [10]. Для предотвращения прямого просвечивания и надежного определения вводимой в образец мощности образцы покрывались тонким слоем сажи. При повышенных температурах, с целью исключения нежелательной конвекции воздуха и возможного искажения получаемых результатов, измерения проводились в вакууме. Относительная погрешность определения коэффициента температуропроводности и удельной теплоемкости при работе на данной установке составляла  $\Delta a/a \approx 3\%$  и  $\Delta C_p/C_p \approx 5\%$ , соответственно. Подробное описание аппаратуры и методики изложены в [11 - 13].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средние значения макро- и микропараметров процесса теплопередачи в изученных объектах, а также их петрофизические характеристики: плотность –  $\rho$ ; размеры кристаллических блоков –  $d$ ; средняя скорость звука –  $\bar{V}$ , оцененная по измеренным продольной –  $V_p$  поперечной  $V_s$  компонентам, вместе с данными заимствованными из работы [14], представлены в таблице 2. В круглых скобках (табл.2) для пористых обсидианов и гейзеритов приведены результаты линейной экстраполяции на нулевую пористость  $\rho$  и  $\bar{V}$ , которые необходимы при расчете средней и

минимальной длины свободного пробега фононов  $\bar{l}$  и  $l_{min}$ , а также характеристических температур ( $\theta_D$ ).

Таблица 2.

Средние значения теплофизических параметров исследованных материалов при 300К.

Образец	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\bar{V}$ , км/с	$a$ , 10 <sup>-7</sup> м <sup>2</sup> /с	$C_p$ , Дж/кг·К	$\lambda$ , Вт/м·К	$\bar{l}$ , Å	$l_{min}$ , Å	$\theta_D$ , К	$\langle \bar{l} \rangle$ , Å	$d$ , мкм [7]
Обсидиан	2400 (2500)	3.75 (4.02)	6.2 (7.2)	790	1.18 (1.37)	5.0 (5.4)	3.6	511	4.8	-
Гейзерит	2080 (2240)	(3.9)	7.0	765	1.20 1.21 [15]	5.4	3.6	521	4.8	~0.15
*Гялит (опал)										
Халцедон	2590 2618	4.0	15.2	760	3.00 3.70 [15]	11.4	3.4	560	4.5	~0.20
**Кремень										
Кварцит	2600	4.2	22.8	755	4.5	15.2	3.4	590	4.5	50
Плавный кварц (KB)	2200 2205 2210 2206	4.0 - - -	7.6 8.2 - -	760 - -	1.27 1.37 1.36 [15] 1.15 [16] 1.37 [17] 1.35 [18]	5.7 6.1	3.6 3.6	530	4.8	-
Ситалл CO 115M	2415 2460	3.75	10.4	800	2.00 1.98 [25]	8.32	3.6	490	4.8	<0.20

\*Гялит – бесцветная разновидность обычного опала, имеющего стекловатую структуру.

\*\*Кремень (флинт) – твердая, полустекловатая, скрытокристаллическая порода, состоящая преимущественно из кремнезема (волоконистого халцедона).

Полученные из экспериментальных данных по температуропроводности значения  $\bar{l}$  сравнивались с минимально возможными  $l_{min}$ , которые, рассчитывались теоретически по формуле, предложенной в [19]:



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

где  $N$  – число Авогадро,  $\bar{M}$  – средний атомный вес.

Вывод формулы (1) основан на том факте, что в твердом теле с дискретной структурой длина волны упругих распространяющихся колебаний не может быть меньше удвоенного расстояния между соседними атомами в веществе. Другими словами, согласно теории теплопроводности твердых тел,  $l_{\min}$  фононов определяется максимальной частотой – частотой обрезания дебаевского спектра  $\nu_{\max}$  и средней скоростью волн смещений  $\bar{V}$ . Тогда период (время жизни) самой короткой волны будет равен  $\tau_{\min} = l / \nu_{\max}$ , и, следовательно

$$l_{\min} = \tau_{\min} \cdot \bar{V} \quad (2)$$

по определению. Подставляя в (2)  $\tau_{\min}$  и учитывая, что  $h\nu_{\max} = k\theta$ , а характеристическая температура  $\theta$  в акустическом приближении вычисляется по формуле:

$$\theta = \frac{h}{k} \left( \frac{3 N \rho}{4 \pi \bar{M}} \right)^{\frac{1}{3}} \bar{V}, \quad (3)$$

окончательно получим приведенное соотношение (1).

Из таблицы 2 видно, что средняя длина свободного пробега фононов в ряду природного кремнезема, к которому, наравне с гейзеритами, халцедонами и кварцитами, с небольшой натяжкой можно отнести и обсидианы (75% SiO<sub>2</sub>) – растет с увеличением степени кристалличности (размеров кристаллитов). Она возрастает от значений 5-6Å, близких к расчетным минимальным значениям у обсидианов и аморфно-кристаллических гейзеритов до 11.4Å и 15.2Å – у скрытокристаллического халцедона и крупнозернистого кварцита, соответственно. Аналогичным образом ведут себя температуропроводность и теплопроводность, превосходя у кварцитов более чем в 4 раза указанные параметры по отношению к аморфному обсидиану.

Тем не менее, теплопереносные параметры кварцитов в 1.5 – 2 раза ниже температуропроводности и теплопроводности монокристаллического кварца и обычно это объясняется рассеянием тепловой энергии на границах зерен в кварцитах и влиянием примесей. Однако, на наш взгляд, основной вклад в теплосопротивление кварцитов вносят не границы зерен, число которых на толщине исследуемого образца (~6 мм) не превосходит двух десятков /средний размер зерен изученных кварцитов ~0.3 мм/, а границы кристаллических блоков, из которых эти зерна сложены. Количество таких блоков, по крайней мере, на два порядка больше (табл. 2). В пользу высказанного предположения свидетельствуют и более низкие, по сравнению с кварцитом,  $a$ ,  $\lambda$  и  $\bar{l}$  халцедонов, средние размеры кристаллитов в которых еще на два порядка меньше, чем в кварце, слагающем

кварцита [7]. Что касается гейзеритов, экстраполяционные значения плотности, температуропроводности и средней длины свободного пробега фононов которых не намного выше, чем у обсидианов, несмотря на то, что размер шарообразных кристаллитов у них примерно такой же, как и у халцедонов, то, по всей видимости, это связано с влиянием двух факторов. Во-первых, шарообразных кристаллитов не бывает и, скорее всего, они сложены из еще более мелких блоков, что существенно увеличивает число рассеивающих границ. Во-вторых, сами границы между шарообразными образованиями в слабо консолидированных гейзеритах иного качества, чем в халцедонах: они включают значительно протяженные участки фазовых границ типа твердая – газообразная, где более интенсивно рассеивается тепловая энергия. Не исключены и большие ошибки в определении температуропроводности гейзеритов за счет линейной экстраполяции на нулевую пористость. В литературе мы нашли единственную работу, где приводится более высокое значение  $\lambda$  для обычного опала – гиалита (табл. 2). Вполне возможно, что в благородных опалах значения теплопереносных параметров еще несколько увеличатся, но чтобы определенно ответить на этот вопрос, нужны дополнительные исследования.

Искусственные силикатные стекла – ситалл и плавленный кварц, как следует из таблицы 2, не нарушают описанной тенденции и прекрасно вписываются в указанную зависимость микро- и макропараметров природного кремнезема от структурного фактора. Так, тепловые характеристики ( $a$ ,  $\lambda$ ,  $\bar{l}$ ) плавленного кварца ненамного отличаются от полностью аморфных обсидианов, а оптически прозрачный ситалл, который представляет собой уникальную модель аморфно-кристаллической природной структуры, по своим свойствам располагается между гейзеритами и скрытокристаллическими халцедонами. Действительно, если размер кристаллитов в подобных структурах не превышает длину полуволны видимого света (7500 - 4000Å), то они сохраняют прозрачность. Это означает, что размер кристаллитов в изучаемом ситалле СО 115М не должен превышать 2000Å (0.20 мкм), то есть он занимает место в таблице 2 между халцедонами и гейзеритами.

Итак, в полностью аморфных структурах (обсидианы, плавленный кварц), как и предполагалось, уже при комнатных температурах средняя длина свободного пробега фононов ( $\bar{l}$ ) близка к минимально возможной ( $l_{\min}$ ). Не вызывает сомнений, что это является следствием дефектности структуры. Отсутствие дальнего порядка затрудняет формирование длинноволновых фононных волновых пакетов и ограничивает их длину волны практически удвоенным расстоянием между атомами, что предельно сокращает интенсивность теплопередачи в аморфной структуре. Отсюда следует как низкая температуропроводность, так и теплопроводность стекловатых структур. Однако, нетрудно видеть, что  $\bar{l}$  обсидианов и плавленного кварца хоть и близка к  $l_{\min}$ , но отнюдь ее не достигают. Возникает вопрос – почему? Вопрос этот не простой, но попытаемся его обсудить.

Полученное расхождение  $\bar{l}$  и  $l_{\min}$  можно связать с неточностью оценки минимальной длины свободного пробега фононов  $l_{\min}$  по формуле (1), когда сознательно закладывается крайний случай, что  $l_{\min}$  строго равна среднему удвоенному расстоянию между атомами в твердом теле. Это возможно при полном беспорядке расположения атомов в структуре. Но в силикатных стеклах такого

полного беспорядка нет, есть ближний порядок, по крайней мере в кремнекислородной сетке, составленной из тетраэдров  $\text{SiO}_4^{4-}$ . В таком случае, вполне вероятно, что могут присутствовать и длинноволновые колебания, определяя тем самым и несколько большее время жизни  $a$  и длину свободного пробега в высоко энергетическом фононном газе.

Можно попытаться учесть распределение фононов по спектру, используя обычное усреднение и ввести эффективную частоту  $\langle \nu \rangle$ :

$$\langle \nu \rangle = \frac{\int_0^{\nu_{\max}} \nu G(\nu) d\nu}{\int_0^{\nu_{\max}} G(\nu) d\nu} = \frac{3}{4} \nu_{\max}, \quad (4)$$

где  $G(\nu)$  – функция плотности вероятности частот  $\sim \nu^2$ . Если  $l_{\min}$  связать с этой оценкой, то ее значение увеличится в 1,33 раза (Табл. 2). Полученное значение  $\langle \nu \rangle = 4.8 \text{ \AA}$  не намного ниже расчетной  $\bar{l}$  для обсидианов, но по-прежнему все же существенно меньше, чем для плавленного кварца, у которого  $\bar{l} \approx 6 \text{ \AA}$ . Кроме того,

низкие значения  $\bar{l}$  в обсидианах по сравнению с плавленным кварцем (КВ) можно объяснить с позиций его химического состава. Проведенный химический анализ образцов показал, что природные вулканические стекла (обсидианы) близки по составу и являются продуктами стеклования кислой магмы, содержащей около 75% окиси кремния, а оставшиеся 25% приходится на окислы, такие как  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  и др. Таким образом, в обсидианах, по сравнению с плавленным кварцем ( $\sim 100\% \text{ SiO}_2$ ), к позиционной разупорядоченности добавляется химическая, связанная с присутствием в кислом стекле атомов различной химической природы (К, Na, Ca, Al, Ti, Fe,...), а это – дополнительные флюктуации масс и упругих констант, которые активно рассеивают фононы и снижают среднюю длину их свободного пробега. Именно поэтому полученные значения  $\bar{l}$ ,  $a$ ,  $\lambda$  для обсидианов ниже, чем для плавленного кварца при 300К. Учитывая, что для кристаллических твердых тел (минералов и горных пород)  $l_{\min}$  достигается при температурах  $\sim 1000\text{K}$  [19], можно предположить, что и для аморфных структур  $l_{\min}$  реализуется при более высоких температурах, чем комнатные, и с ростом температуры температуропроводность и далее, хотя и очень медленно, должна уменьшаться. Механизм такого уменьшения известен – это температурное фонон-фононное рассеяние, которое является доминирующим в идеальном кристалле и определяется ростом ангармоничности колебаний атомов с ростом температуры. На рисунке 1 представлена зависимость температуропроводности от температуры для исследованных обсидианов, стекла КВ и ситалла на интервале температур 300 – 370К. Как и следовало ожидать, наблюдается тенденция к уменьшению  $a$ , наиболее резко выраженная для аморфно-кристаллического ситалла, и едва заметная для обсидианов.

Тем не менее, грубая линейная экстраполяция на температуру  $\sim 1000\text{K}$  должна дать слегка заниженный результат для значений температуропроводности и средней длины свободного пробега фононов, что и оказалось в действительности

( $\bar{l} \sim 3.2 \text{ \AA}$ ), как для обсидианов, так и для плавленного кварца. Таким образом, проведенный анализ, по-видимому, подтверждает точку зрения, что соотношение (1) дает наиболее надежное значение для  $l_{\min}$ , чем усредненное по спектру частот  $\langle l \rangle$ .

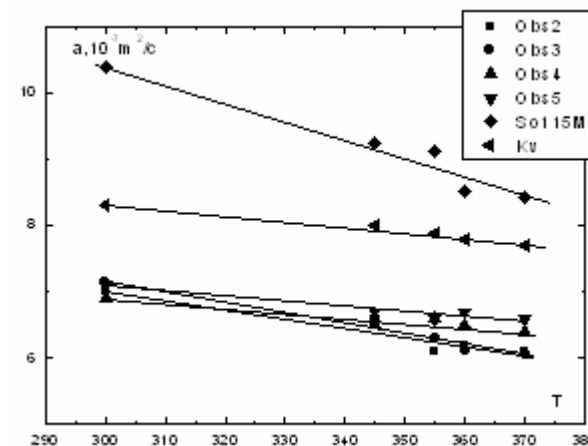


Рис. 1. Зависимость температуропроводности исследованных обсидианов, ситалла и плавленного кварца от температуры.

Тот факт, что для кристаллических и аморфных пород средняя длина свободного пробега фононов достигает минимума при  $T \approx 1000\text{K}$ , дает возможность провести оценку кондуктивной теплопроводности и температуропроводности в недрах Земли на глубинах от 40 - 60км и вплоть до ядра [20]. С точки зрения экологических проблем, связанных с вулканической деятельностью Земли, особенно интересно провести такую оценку в верхней мантии, захватив астеносферный слой (слой пониженных скоростей), где, как предполагают, и находятся первичные магматические очаги, питающие вулканы и где какая-то часть вещества вполне может находиться и в аморфном состоянии. Как выясняется из проведенного нами анализа, основной микропараметр процесса теплопередачи аморфнокристаллической смеси  $\bar{l}$  при  $T > 1000\text{K}$  может быть достаточно надежно оценен по формуле (1). Тогда, подставив это выражение в классическую формулу Дебая:

$$\lambda = a \cdot C_p \cdot \rho \quad (5)$$

и, учитывая, что  $a = \frac{1}{3} \cdot \bar{V} \cdot \bar{l}$ , а на глубинах 40 – 60км и больше  $\bar{l} = l_{\min}$ , и

удельная теплоемкость при постоянном объеме достигает насыщения ( $T > \theta_D$ ), перепишем (5) в виде:

$$\lambda = \frac{1}{3} C_p \cdot I_{\min} \cdot \rho \cdot \bar{V} \quad (6)$$

Учитывая, что  $(C_p - C_v)$  для твердых тел составляет доли процента, в качестве упрощения примем  $C_p \cong C_v$ , которое легко вычисляется, если известен средний атомный вес  $\bar{M}$  [21], окончательно получим выражение:

$$\lambda = \frac{1}{3} C_p \left( \frac{4 \pi \bar{M}}{3 N \rho} \right)^{\frac{1}{3}} \rho \bar{V} \quad (7)$$

Плотность и средняя скорость берутся из сейсмических механических моделей Земли и, таким образом, влияние температуры и давления на эти параметры на различных глубинах учитываются автоматически.

Для расчета температуропроводности получается аналогичное соотношение:

$$a = \frac{1}{3} \left( \frac{4 \pi \bar{M}}{3 N \rho} \right)^{\frac{1}{3}} \bar{V} \quad (8)$$

В таблице 3, в качестве примера, приведен расчет макропараметров процесса теплопередачи в верхней мантии, в том числе и в слое пониженных скоростей, согласно сейсмической модели PREM – средняя [22], а в качестве  $\bar{M}$  принято значение  $\bar{M} = 21$ .

Таблица 3.

Микро- и макропараметры процесса кондуктивной теплопередачи в верхней мантии

Глубина $h$ , км	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\bar{V}$ , км/с	$l_{\min}$ , Å	$a$ , $10^{-7}$ м <sup>2</sup> /с	$C_p$ , Дж/кг·К	$\lambda$ , Вт/м·К
40	3379	4.983	3.200	5.28	1200	2.142
80	3375	4.880	3.185	5.17	-	2.10
150	3367	4.850	3.184	5.15	-	2.08
220 (выше)	3359	4.820	3.186	5.14	-	2.06
220 (ниже)	3440	5.130	3.180	5.40	-	2.23

В частности, расчет по этой модели дает значения  $a = 5.7 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с и  $\lambda = 2.6$  Вт/м·К для глубины 450 км и  $a = 9 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с и  $\lambda = 5.15$  Вт/м·К для горизонта  $h = 1371$  км. Как следует из [23, 24], при расчете с использованием экспериментальных данных теплопроводность у подошвы континентальной и океанической коры со стороны мантии  $\lambda \approx 3.5$  Вт/м·К. Для температуропроводности получаются значения  $a = (8-10) \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с.

Всё говорит о том, что в слое пониженных скоростей кондуктивные теплопроводность и температуропроводность достигают минимума ( $\lambda \approx 2.0$

Вт/м·К,  $a \approx 5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с), соответственно происходит накопление тепловой энергии за счет теплового потока, идущего из недр, рост температурных градиентов и температуры, которая может достигнуть значения температур плавления [1], порождая локальные магматические очаги. На основе предложенной методики оценки тепловых свойств, расчет может быть выполнен более корректно не для средней Земли, а с использованием региональных сейсмических моделей.

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

### Литература

- Петрунин Г.И., Лупачик В.В., Шульгин А.А. О глубине залегания первичных магматических очагов, питающих вулканы. Сборник «Физические проблемы экологии», №15, Москва, МГУ. 2008, с. 240-251.
- Мегахед А., Петрунин Г.И., Попов В.Г., Ладыгин В.М. Тепловые характеристики эффузивных пород Малого Кавказа. Изв. АН СССР, Физика Земли, №12, 1985, с.81-87.
- Петрунин Г.И., Попов В.Г., Ладыгин В.М. Тепловые свойства базальтов тройственного сочленения Буве и их связь с петрофизическими характеристиками. Физика Земли. №6, 2001, с. 3-13
- Петрунин Г.И., Попов В.Г.. Влияние петрофизических факторов на тепловые свойства эффузивных горных пород континентальной и океанической коры. Сборник «Физические проблемы экологии», №15, Москва, МГУ. 2008, с. 252-271.
- Устинова Т.И. Камчатские гейзериты. Гос. изд-во географической литературы. М., 1955, с. 15-20.
- Хёрблат К., Клейн К. Минералогия по системе Дена. Недра, М., 1982, 728 с.
- Плюснина И.И. Метаморфические реакции низкотемпературного кремнезема. Изд. Моск. ун-та, М., 1983, 225 с.
- Буллах А.Г., Буллах. К.Г. Физико-химические свойства минералов и компонентов гидротермальных растворов. Л. «Недра». Ленинградское отделение. 1978.167 с.
- Краткий справочник физико-химических величин. Под ред. Равделя А.А. и Пономаревой А.М., Л., Химия, 1983, 232 с.
- Петрунин Г.И., Юрчак Р.П. Учёт влияния теплообмена при измерении температуропроводности методом плоских температурных волн. М., Вестник МГУ, серия 3 (физика, астрономия), том 12, №5, 1971, с.613-614.
- Петрунин Г.И., Юрчак Р.П. Установка для измерения температуропроводности минералов методом плоских температурных волн. ТВТ, №3, 1970, с.622-626.
- Попов В.Г., Петрунин Г.И., Нестеров А.Г. Установка для измерений температуропроводности и теплоемкости горных пород и минералов в интервале температур 300-1000К. Рукопись депонирована в ВИНТИ, №4744-81 Деп., М., 1981, 29 с.
- Петрунин Г.И., Попов В.Г. Метод и аппаратура высокоточных измерений теплофизических характеристик океанических осадков. Физика Земли, № 11, 1994, с. 78-85.

14. Беликов Б.П., Александров К.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. Наука, М., 1970, 276 с.
15. Horai K. Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Jour. Geophys. Res.*, 1971, vol. 76, № 5, p. 1278-1808.
16. Kanamori H., Fujii N., Mizutani H. Thermal diffusivity measurement of rock-forming minerals from 300K to 1100K. . *Jour. Geophys. Res.*, 1968, vol. 73, № 2, p. 595-605.
17. Девяткова Е. Д., Смирнов А. В. и др. Плавленый кварц как образцовый материал при измерении теплопроводности. ТВТ, том 11, № 4, 1960, с. 738-746.
18. Popov Yu., Korobkov D., Miklashevskiy D. Thermal diffusivity measurements: new experimental and theoretical background and results. Proceeding of the international conference «THE EARTH'S THERMAL FIELD AND RELATED RESEARCH METHODS», June 17-20, 2002, Moscow, RUSSIA, p. 214-218.
19. Петрунин Г. И., В. Г. Попов. Особенности температурного поведения решеточной теплопроводности минерального вещества Земли. *Физика Земли*, 1994, № 7-8, с. 35-41.
20. Петрунин Г.И., Орлик Е.В. Кондуктивный теплоперенос в мантии. *ДАН СССР*, 1988, т. 299, № 2, с. 336-341.
21. Петрунин Г. И. Связь теплоемкости породообразующих минералов со средним атомным весом. *Вестник Моск. Ун-та, Сер. 3, Физика. Астрономия*. 1981, т. 22, № 4, с. 66-68.
22. Dzevonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth model. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1981, v. 25, p.297.
23. Петрунин Г.И., Попов В.Г. Тепловые свойства вещества литосферы. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, 1985, № 10, с. 63-70.
24. Петрунин Г.И. Теплофизические характеристики вещества оболочки Земли и кондуктивный теплоперенос в мантию. Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. Наук, Москва, МГУ, 1996, 88 с.
25. Лыткаринский завод оптического стекла. [http: //Lzos. ru/glass pocolor cat.htm](http://Lzos.ru/glass_pocolor_cat.htm)