

Московский государственный университет
Им. М.В. Ломоносова

Физический факультет

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ
(ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА)**

№ 6



Москва
2001

Физические проблемы экологии (экологическая физика). №6

Под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева. М.: Физический факультет МГУ, 2001.—

Сборник научных трудов третьей Всероссийской конференции “Физические проблемы экологии (экологическая физика)”. Рассмотрены вопросы экологии околоземного пространства и верхних слоев атмосферы, экологические проблемы геофизики, физические методы и средства мониторинга природных сред, воздействие физических факторов на биологические объекты.

Для специалистов, работающих в области физических проблем экологии, студентов и аспирантов, изучающих экологическую физику.

Издание осуществлено при поддержке Федеральной целевой программы “Интеграция”, гранты № 2.1-304, Р0029, РФФИ (грант 01-02-26030).

**ТРЕТЬЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
“ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ (ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ
ФИЗИКА)”**

22 –24 мая 2001 г. на физическом факультете МГУ прошла Третья Всероссийская конференция “Физические проблемы экологии (Экологическая физика)”. Конференция была организована физическим факультетом МГУ, Институтом проблем механики РАН, Пушинским научным центром РАН при поддержке Министерства образования РФ, Минпромнауки РФ, РФФИ, ФЦП “Интеграция”.

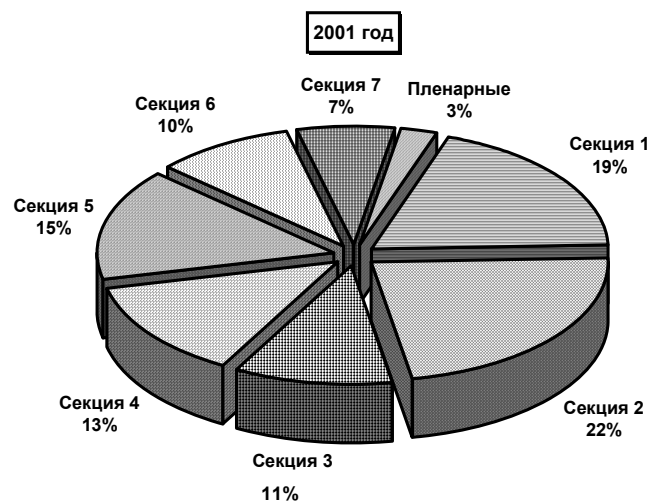
На конференции было представлено 400 докладов, число участников (докладчиков) составило около 800 человек, число гостей - более 200 человек. Хотя конференция носит статус Всероссийской, по сути, она была Всесоюзной, так как в ее работе приняли участие научные работники и преподаватели из ряда стран СНГ, зарубежные гости. Очень широка география участников конференции: тезисы докладов поступили с Сахалина, Алтая, Урала, Украины, Армении; из Владивостока, Иркутска, Новосибирска, Волгограда, Петрозаводска, Петербурга, Калининграда, Львова, Еревана и многих других регионов и городов. Конференция вызвала большой интерес среди ученых-физиков: на приглашение откликнулись сотрудники десятков НИИ РАН, более 50 вузов, другие организации. В работе конференции активное участие приняли сотрудники нескольких факультетов МГУ: географического, биологического, геологического, ВМК, мехмата и другие. Это подчеркивает междисциплинарный характер конференции.

С приветствием к участникам конференции обратились ректор Московского университета академик, сопредседатель Программного комитета конференции В.А. Садовничий и декан физического факультета, сопредседатель Программного комитета конференции В.И. Трухин. Ректор МГУ В. А Садовничий отметил важную роль, которую играет Московский университет в развитии экологического образования, координации экологических исследований в стране.

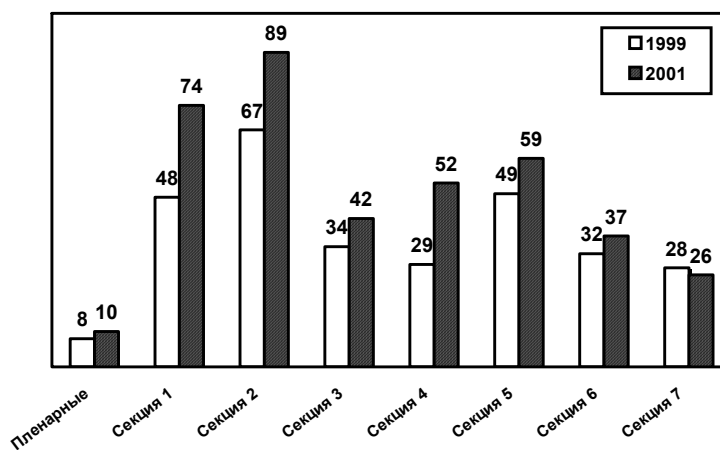
Работа конференции проходила на Пленарном заседании и в 7 секциях:

- Секция 1. Экология околоземного космического пространства и атмосферы.
- Секция 2. Физические проблемы экологии гидросферы.
- Секция 3. Экологические проблемы физики Земли.
- Секция 4. Биофизическая экология.
- Секция 5. Физические методы мониторинга природных сред.
- Секция 6. Прикладные аспекты экологической физики.
- Секция 7. Вопросы экологического образования.

Распределение докладов по секциям приведено ниже.



Работа предыдущей конференции (второй) в 1999 г. проходила по этим же секциям. Анализ докладов первой конференции в 1997 г. показал, что подобное распределение было и на ней. Приведенный ниже рисунок свидетельствует о росте числа докладов практически по всем направлениям и об устоявшемся соотношении между научными направлениями конференции.



По мнению организаторов конференции, все физические и геофизические процессы, влияющие на функционирование экосистем и биосферы в целом, могут быть отнесены к области физических проблем экологии. В соответствии с таким представлением тематика сообщений была очень обширной - она охватывала физические явления от процессов в галактике и околоземном пространстве до молекулярного уровня. Важной чертой конференции явился ее междисциплинарный характер.

В решении конференции отмечена необходимость регулярного проведения таких конференций в дальнейшем и важность расширения экологической компоненты образования, в частности, физиков.

Труды Первой и Второй Всероссийских конференций “Физические проблемы экологии (Экологическая физика)” были опубликованы в специальном выпуске журнала “Вестник Московского университета, серия 3: физика, астрономия”, N4, 1998 и в пяти сборниках “Физическая экология (Физические проблемы экологии)” N1-5, Москва, МГУ, физический факультет, 1998, 1999 г.

Настоящий сборник “Физические проблемы экологии (Экологическая физика)” N6 открывает публикацию трудов Третьей Всероссийской конференции “Физические проблемы экологии (Экологическая физика)”.

Ответственные редакторы
профессор В.И. Трухин
профессор Ю.А. Пирогов
профессор К.В. Показеев

РЕШЕНИЕ ТРЕТЬЕЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ “ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ (ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА)”

22–24 мая 2001 г. на физическом факультете МГУ прошла Третья Всероссийская конференция “Физические проблемы экологии (Экологическая физика)”. Конференция была организована физическим факультетом МГУ, Институтом проблем механики РАН, Пушинским научным центром РАН при поддержке Министерства образования РФ, Минпромнауки РФ, РФФИ, ФЦП “Интеграция”.

Конференция вызвала большой интерес среди ученых-физиков: на приглашение откликнулись сотрудники десятков НИИ РАН, более 50 вузов, другие организации. В работе конференции активное участие приняли сотрудники нескольких факультетов МГУ: географического, биологического, геологического, ВМК, мехмата и другие. Очень широка география участников конференции: тезисы докладов поступили с Сахалина, Алтая, Урала; из Владивостока, Иркутска, Новосибирска, Волгограда, Петрозаводска, Петербурга, Калининграда и многих других регионов и городов, из стран СНГ.

Работа конференции проходила на Пленарном заседании и в 7 секциях:

- Экология околоземного космического пространства и атмосферы
- Физические проблемы экологии гидросферы
- Экологические проблемы физики Земли
- Биофизическая экология
- Физические методы мониторинга природных сред
- Прикладные аспекты экологической физики
- Вопросы экологического образования

На конференции было представлено 400 докладов, число участников (докладчиков) составило около 800 человек, число гостей - более 200 человек. Для всех секций характерен рост числа докладов, отражающих фундаментальные исследования, имеющие практическую направленность.

К началу конференции физический факультет издал труды предшествующей конференции, учебное пособие “Введение в экологическую геофизику” (авторы В.И. Трухин, К.В. Показеев, В.Е. Куницын, А.А. Шрейдер). Совместными усилиями Тверского госуниверситета и Московского университета им. М.В. Ломоносова развернут новый экологический полигон “Волговерховье”, основной целью создания поли-

гона является экологический контроль территории главного водораздела Русской равнины у истоков крупнейших европейских рек – Волги, Днепра, Западной Двины. В Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова создан Совет по экологии. Практически все решения предшествующей конференции выполнены.

Участники конференции отмечают актуальность и своевременность проведения широкого научного обсуждения проблем экологической физики. Анализ материалов конференции показывает, что в сфере экологических проблем существует обширная область, в решении задач которой физики должны принимать активное участие.

Успешной работе конференции способствовала большая предварительная работа Программного комитета, сотрудников лаборатории экологических проблем геофизики, помощь администрации, инженерно-технических и учебных служб физического факультета, четкая работа Рабочей группы.

Конференция постановила:

- продолжить регулярное проведение конференций по физическим проблемам экологии,
- расширить экологическую компоненту образования при подготовке студентов, в частности студентов-физиков,
- шире оповещать научную общественность о мероприятиях в области экологической физики, проводимых физическим факультетом,
- просить физический факультет МГУ продолжить разработку программы по экологическому обучению студентов физических специальностей,
- просить физический факультет МГУ выступить с инициативой проведения следующей конференции по экологической физике в 2004г.,
- просить физический факультет МГУ организовать издание избранных трудов конференции.

Сопредседатель Программного Комитета конференции
ректор МГУ, академик
В.А. Садовничий

Сопредседатель Программного комитета конференции
декан физического факультета, профессор
В.И. Трухин

Ученый секретарь Программного комитета конференции, профессор
К.В. Показеев

ФИЗИКА И ЭКОЛОГИЯ

Трухин В.И., Пирогов Ю.А., Показеев К. В.

*119899, Москва, Воробьевы горы, физический факультет
МГУ, тел.(095) 939-36-98, факс. (095) 932-88-32*

За время, прошедшее после 2-й научной конференции по экологической физике (январь 1999 года) прошло 2,5 года и за это время случилось немало важных событий. Наиболее знаменательное из них – переход нашего летоисчисления в 3-е тысячелетие. В такой момент принято подводить итоги прошедшего времени и надо отметить, что прошлый 20-й век оставил неизгладимый след в истории человечества. Это был век величайших поистине революционных преобразований в науке, технике, общественном устройстве, во всех областях человеческой деятельности. Обращаясь к теме нашей конференции, надо сказать, что многие из этих преобразований имели серьезные экологические последствия. Повсеместная урбанизация жизненного уклада изменила условия жизни людей далеко не в лучшую сторону. С одной стороны, появились неоспоримые удобства коллективного проживания, с другой, скученность людей и особенно транспорта привели к загрязнению атмосферы, почвы и водной среды. Изобретение автомобиля привело к сильнейшей загазованности выхлопными газами и пробкам на улицах больших городов. Решение энергетической проблемы за счет открытия атомной энергии откликнулось рядом экологических бедствий на атомных электростанциях. Распространение радио-, теле- и сотовых коммуникаций также чревато своеобразным электромагнитным загрязнением окружающей среды. Создание в последние годы трансгенных продуктов при неосмотрительном их использовании может привести к серьезным биологическим мутациям.

Только этих примеров уже достаточно, чтобы показать исключительную важность предмета обсуждений на конференции по экологической физике, где собрались пока, в основном, российские физики и ряд ученых из ближнего зарубежья. Очевидно, что в ближайшее время наш форум станет в полной мере международным – экологические проблемы не знают границ и требуют коллективных усилий для их решения.

Экологическая тема неизменно вызывает внимание большого числа ученых, работающих в области физических наук. И это не слу-

чайно. На базе открытий в области физики создан громадный научно-технический потенциал, который может как разрушать природу, так и сохранять ее при условии ориентации на рациональное природопользование. Широкий спектр физических методов изучения вещества должен найти применение в создании эффективных систем мониторинга экосистем различного уровня. Опыт разработки физико-математических моделей различных систем должен быть полезным в исследовании влияния антропогенных процессов на функционирование экосистем. Одна из целей усиления экологической компоненты образования при подготовке физиков как раз и заключается в том, чтобы сориентировать их мощный потенциал на решение экологических проблем, изменить сложившееся представление о взаимоотношении человека и природы.

Наряду с формированием представлений о глобальности взаимосвязи человека с природой и сущности экологического кризиса, охватившего планету, необходимо давать студентам-физикам глубокие знания по приоритетным экологическим проблемам, с которыми физическая наука в силу своей специфики наиболее тесно соприкасается. Именно физика и, прежде всего, геофизика, накопившая богатейший опыт исследования закономерностей физических процессов, протекающих в оболочках Земли, на границах которых и формируются жизненно-важные экосистемы, подверженные влиянию геоэволюционного и катастрофически возрастающего антропогенного факторов, может взять на себя решение ряда проблем, связанных с научным подходом к оздоровлению экологического климата.

На физическом факультете МГУ сформирована специальная учебно-научная программа “Физические проблемы экологии (Экологическая физика)”, в рамках которой действует около 20 кафедр различного научного профиля – от теоретических до экспериментально ориентированных. Основными направлениями этой программы являются:

- Экология околоземного космического пространства;
- Физические проблемы экологии гидросферы;
- Биофизическая экология;
- Экологические проблемы физики Земли;
- Физические методы мониторинга природных сред;
- Прикладные аспекты экологической физики;
- Вопросы экологического образования.

Научные исследования по этой Программе ведутся в тесном контакте с институтами Российской академии наук, другими вузами и отраслевыми НИИ. Всероссийские научные конференции, проводимые в

Московском университете и посвященные экологическим проблемам современной физики стали традиционными. На данную конференцию представлено около 400 докладов по самым актуальным направлениям. Интересные доклады посвящены проблеме сохранения озонового слоя Земли, экологическому мониторингу загрязнений атмосферы и водных сред, радиационно-ядерной безопасности, разработке физических приборов и устройств контроля окружающей среды, новым перспективным методам прогноза землетрясений, проблемам экологического образования физиков.

Последнее направление играет особую роль - экологическое обучение физиков имеет свою специфику, заключающуюся в том, что требования к знаниям специалиста-физика, предусмотренные Государственным образовательным стандартом, удовлетворяются на основе обширных и глубоких знаний физики и геофизики. Например, у студентов сформированы представления не только о термодинамике, но и понятия об основных положениях физики открытых систем. В дальнейшем необходимо организовать преподавание таким образом, чтобы студенты-физики получали общебиологическую подготовку (в настоящее время ее получают только студенты, специализирующиеся в биофизике). Отчасти поэтому в научной программе по экологической физике (так же, как и в программе упомянутой конференции) был специально выделен раздел "Биофизическая экология".

В университетских программах тесно переплетаются учебные занятия и научные исследования. Особую важность с позиций экологии приобретают экспедиционные разработки, развитие и укрепление приборной базы экологических исследований. В этой связи особенно ценным является создание учеными Московского и Тверского госуниверситетов в 1999-2000 годах при поддержке грантом Правительства Москвы нового учебно-научного экологического полигона "Волговерховье" в истоках великих европейских рек - Волги, Днепра, Западной Двины и притоков Невы. На полигоне организованы круглогодичные автоматизированные измерения параметров природной среды, проводятся студенческие практики, осуществляются международные научные проекты.

В промежутке между последними конференциями была проведена работа по консолидации экологического направления в физике. В МГУ был создан Координационный экологический совет под руководством академика РАН Д.С.Павлова, в составе которого по инициативе физического факультета МГУ организована секция Физических методов в экологии. Такая же секция создана в основанной академиком Янши-

ным Российской экологической академии: ряд сотрудников МГУ избраны в ее действительные члены и члены-корреспонденты. Уже начато активное взаимодействие действующих физических лабораторий МГУ и РАН с этими организациями, которые в дальнейшем должны шире привлекаться к участию в конференциях по экологической физике.

Наряду с физическим факультетом МГУ организаторами конференций по экологической физике являются Институт проблем механики и Пушинский научный центр РАН, с которыми сложились прочные учебно-научные связи в этой области. В институте проблем механики РАН создан филиал кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ. В Пушинском научном центре на базе ряда институтов РАН и филиала МГУ организуются студенческие практики, проводятся совместные научные исследования по биофизической экологии, разработке радиоастрономических методов мониторинга озона и других экологически важных составляющих атмосферы, создания моделей взаимодействия электромагнитных излучений с биологическими объектами и др.

Существенную поддержку конференции оказали такие федеральные организации, как Министерство образования РФ, Министерство промышленности, науки и технологий РФ, Российский фонд фундаментальных исследований и ФЦП "Интеграция". Без этой поддержки проведение конференции было бы весьма затруднительным.

Программа развития образования и научных исследований в области экологической физики, развернутая на физическом факультете МГУ, потребует, конечно, значительных усилий для подготовки новых учебных программ, разработки новых научных направлений, обеспечения учебно-научного процесса экспериментальной аппаратурой и финансами, но с другой стороны, послужит хорошим примером для развития экологического образования физиков в других российских университетах.

Литература

1. *Садовничий В.А.* Образование как фактор национальной безопасности России. М.: Физический факультет МГУ, 1997. 16 с.
2. *Трухин В.И., Показеев К.В., Пирогов Ю.А.* Изучение физических проблем экологии и экологическое образование на физическом факультете МГУ. Вестн. Моск. ун-та, сер.3, Физика, астрономия, 1998, № 4, с. 4-6.

СЕКЦИЯ 1

**ЭКОЛОГИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И АТМОСФЕРЫ*****МОНИТОРИНГ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ
НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ В МАКСИМУМЕ
23-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

Иванова Т.А.¹, Павлов Н.Н.¹, Рейзман С.Я.¹, Рубинштейн И.А.¹,
Сосновец Э.Н.¹, Тверская Л.В.¹, Тельцов М.В.¹, Балашов С.В.²,
Иванов В.В.², Максимов И.А.², Хартов В.В.², Зубарев А.И.³

¹НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына МГУ

²Научно-производственное объединение "Прикладная механика" им.

М.Ф.Решетнева,

³Военно-космические силы МО

Введение

Космическая среда оказывает целый ряд нежелательных воздействий на космические аппараты. В магнитосфере Земли к числу таких воздействий относятся радиационные повреждения, вызываемые частицами радиационных поясов и солнечных вспышек. В НИИЯФ МГУ совместно с НПО «Прикладная механика» в начале 90-х годов была разработана концепция мониторинга радиационной обстановки непосредственно на борту космических аппаратов и создана специальная мониторинговая аппаратура ДИЭРА. Эта аппаратура, начиная с 1993 года и по настоящее время, устанавливается на космические аппараты, предназначенные для обеспечения связи, ТВ-вещания и навигации (КА серий «Горизонт», «Глонасс», «Экспресс», «Молния») [1,2]. Наличие такой аппаратуры на борту КА позволяет делать оценку реального уровня воздействия радиации на космические аппараты, проводить апробацию существующих модельных представлений о параметрах космической среды и получать информацию о физических процессах, протекающих в магнитосфере Земли, в межпланетной среде и на Солнце.

В настоящем сообщении рассматриваются результаты измерений с помощью аппаратуры ДИЭРА на геостационарных ИСЗ «Экспресс-А2 и А3» с марта 2000 г. по февраль 2001 года релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли с энергией $E_e=0.8-6.0$ МэВ, протонов солнечных космических лучей с энергией $E_p=12-350$ МэВ и интегральной дозы радиации от протонов с $E_p>50$ МэВ и электронов с $E_e>2$ МэВ. Рассматриваемый период приходится на максимум 23-го цикла солнечной активности и представляет интерес с точки зрения сравнения реальных измерений с модельными представлениями.

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 00-15-96623, 01-02-17908 и программы «Университеты России»

Аппаратура

ИСЗ «Экспресс-А2» был запущен 14.03.2000 г. на геостационарную орбиту (высота 36,6 тыс. км) на долготу 80° в.д., а ИСЗ «Экспресс-А3» — 24 июня 2000 г. на долготу 14° з.д. На обоих аппаратах была установлена аппаратура ДИЭРА.

Основными факторами, вызывающими радиационные повреждения бортовых систем КА на этой орбите, являются потоки релятивистских электронов ($E_e \geq 1$ МэВ) внешнего радиационного пояса Земли и протоны солнечных вспышек ($E_p \geq 10$ МэВ). Характеристики детекторов, измерявших эти параметры, представлены в таблице 1.

Таблица 1
Характеристики детекторов аппаратуры ДИЭРА

№ п/п	Тип регистрируемых частиц	Энергия регистрируемых частиц	Детектор, геометрический фактор
1	Электроны	0.8–1.0 МэВ	Полупроводниковый детектор, $G \approx 10^{-3} \text{ см}^2 \text{ ср}$
2	Электроны	1.0–1.2 МэВ	
3	Протоны	> 12 МэВ	
4	Электроны	2.0–4.0 МэВ	Черенковский детектор, $G \approx 4 \text{ см}^2 \text{ ср}$
5	Электроны	4–6 МэВ	
6	Электроны Протоны	> 6 МэВ > 350 МэВ	
7	Электроны Протоны	> 2 МэВ > 50 МэВ	Ионизационная камера, $K = 8.12 \text{ мрад/имп}$

Для регистрации электронов радиационного пояса с энергией $E_e = 0.8–1.2$ МэВ и солнечных протонов с $E_p > 12$ МэВ использовался полупроводниковый детектор с толщиной ~1 мм Si, электронов с энергией $E_e = 2–6$ МэВ и протонов с $E_p > 350$ МэВ – черенковский детектор с радиатором из кварцевого стекла, интегральной дозы радиации внутри гермоконтейнера спутника – ионизационная камера с чувствительностью $K = 8.12$ мрад/имп. Полупроводниковый детектор и черенковский счетчик были ориентированы своей главной осью по радиус-вектору из центра Земли в сторону от Земли, т.е. примерно под углом ~80° к силовой линии на ИСЗ «Экспресс-А2» и под углом ~90° на ИСЗ «Экспресс-А3» (с учетом долготы спутников и наклона оси земного магнитного диполя к географической оси Земли). Ионизационная камера (дозиметр) располагалась внутри гермоконтейнера спутника с минимальной толщиной окружающего вещества ~2 г/см² Al, что соответствует пробегу электронов с $E_e \sim 2$ МэВ и протонов с $E_p \sim 50$ МэВ. Усреднение данных в каждом цикле измерений осуществлялось за 6 минут.

Экспериментальные результаты

За рассматриваемый период на Солнце произошло большое количество вспышек, две из которых (14.07.2000 г. и 09.11.2000 г.) по классификации факторов космической погоды отнесены к экстремальным радиационным штормам. Наблюдались также сильные геомагнитные возмущения. В апреле (07.04.2000 г.) и июле (16.07.2000 г.) зарегистрированы магнитные бури с амплитудой Dst-вариации ~300 нТ (по шкале космической погоды эти бури относятся к экстремальным). Предшествующая буря с такой амплитудой Dst, была зарегистрирована 8 лет назад в мае 1992 года.

Динамика потоков релятивистских электронов

Релятивистские электроны являются одной из самых «старых» по времени открытия компонент радиационных поясов Земли. Однако до настоящего времени проблема ускорения этих частиц, особенно с энергией более нескольких МэВ, остается нерешенной [3-6]. Вариации потоков электронов на геостационарной орбите сложны, так как обусловлены несколькими процессами: диффузией с границы магнитосферы благодаря возмущениям магнитного поля типа внезапных импульсов, диффузией из внутренних областей магнитосферы, куда релятивистские электроны инжектируются непосредственно во время магнитных бурь, инжекцией в периоды высокоширотных магнитосферных суббурь, вариациями геомагнитного поля и связанных с этим перемещениями границ области захваченной вариации и т.д. Некоторые из этих типов вариаций иллюстрируются на рис. 1 и 2.

На рис.1 представлены результаты наблюдений на ИСЗ «Экспресс-А2» потоков электронов с энергией 0.8-1.0, 1.0-1.2, 4.0-6.0 и >6 МэВ за 10-дневный период с 03.04. по 13.04.2000 г. В нижней части рисунка показаны индексы геомагнитной возмущенности (Dst-вариация и Kp-индекс) и скорость солнечного ветра Vsw. Этот период характерен тем, что 06.07-08.07.2000 г. развивалась сильнейшая за последние годы магнитная буря с $(Dst)_{\max} = -310$ нТл. Как видно из рисунка, наблюдаются значительные (до 3-х порядков величины) колебания интенсивности электронов всех энергий. Можно выделить два основных типа вариаций потоков электронов, характерных для геостационарной орбиты: су-

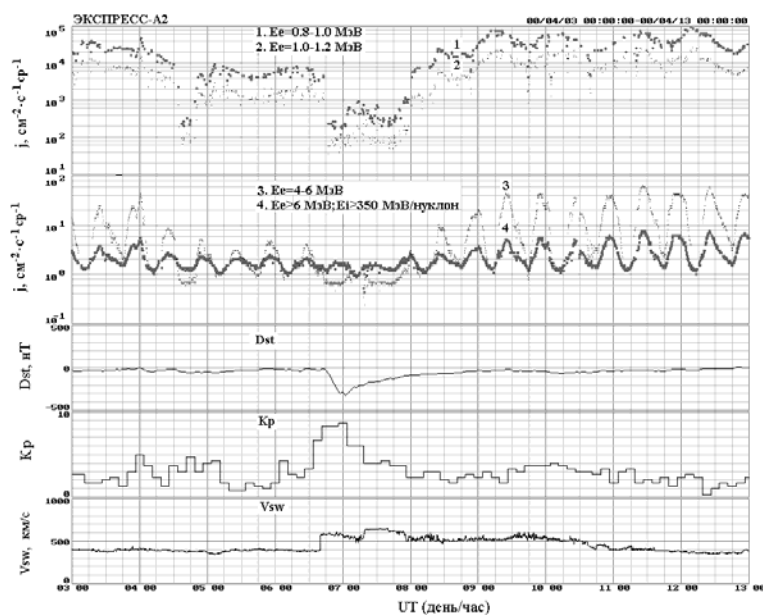


Рис.1. Вариации потоков электронов различных энергий по данным ИСЗ «Экспресс-А2» во время магнитной бури 07.04.2000 г.

точные вариации вдоль орбиты, обусловленные особенностями долгого дрейфа электронов в асимметричном по местному времени геомагнитном поле [7], и вариации, связанные с геомагнитными возмущениями.

Во время магнитных бурь обычно наблюдается (рис.1) спад интенсивности электронов в период главной фазы и последующее восстановление до уровня, часто превышающего добуриевой. После бури 06-08.04.2000 г. потоки электронов превысили добуриевой уровень при энергиях $E_e=1-4$ МэВ на порядок величины. Даже в самом высокоэнергичном канале ($E_e>6$ МэВ) произошло возрастание потока электронов в ~ 3 раза.

Значительный вклад в возрастание интенсивности релятивистских электронов на фазе восстановления магнитных бурь дает адиабатическое ускорение инжектированных во время бури электронов при восстановлении поля [8]. Однако из приведенных данных видно, что возрастание интенсивности на фазе восстановления идет неравномерно, что скорее всего связано с дополнительным ускорением электронов, обусловленным другими механизмами. С этими механизмами связаны, по-видимому, вариации интенсивности электронов на геостационарной орбите, которые происходят не только во время магнитных бурь, но и в относительно спокойных условиях.

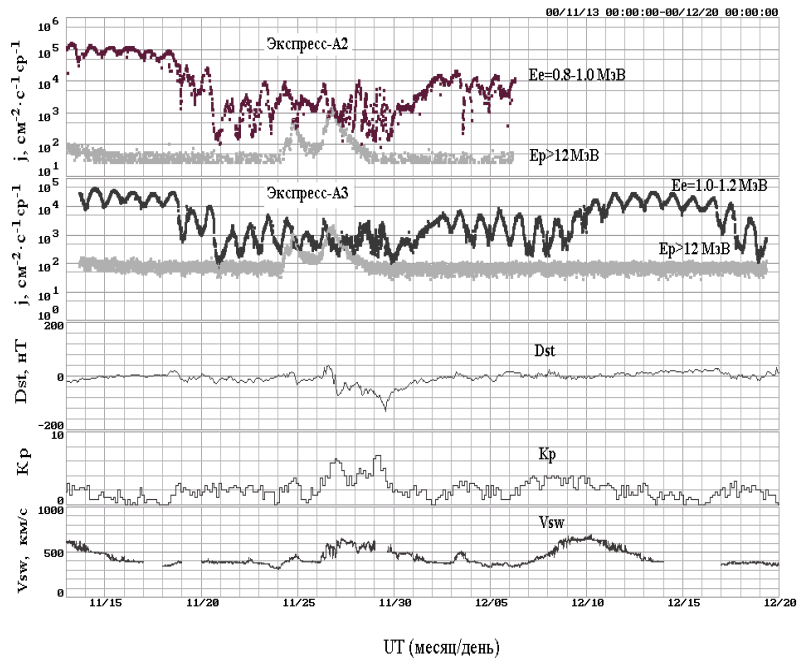


Рис.2. Вариации потоков электронов различных энергий по данным ИСЗ «Экспресс-А2 и А3» во время солнечной вспышки 24.11.2000 г.

На рис.2 представлен период в пределах которого с 19.11 по 09.12.2000 г. регистрировались пониженные более чем на порядок величины потоки электронов при всех энергиях. Изменения интенсивности электронов наблюдались синхронно на ИСЗ «Экспресс-А2» и «Экспресс-А3», разнесенных по местному времени на 6 часов. Спад интенсивности произошел 19.11.2000 г. после достижения скорости солнечного ветра минимального значения ~ 350 км/с, а восстановление до прежнего уровня (после 10.12.2000 г.) возможно связано с увеличением скорости солнечного ветра, наблюдавшееся 09-10.12.2000 г. Одним из механизмов, обеспечивающих ускорение электронов до энергий в несколько МэВ, может быть ускорение электронов во внешней магнитосфере альвеновскими волнами[9].

«Экспресс-А2» примерно за год наблюдений с 13.03.2000 г. по 13.02.2001 г. для потоков электронов в 3-х диапазонах энергий, их усредненные значения за 27-дневные интервалы (сплошные линии) и модельные значения потоков электронов (точечные линии) для тех же интервалов по энергии и по времени [10,11], рассчитанные по модели магнитного поля [12]. На рисунке показаны также значения Dst-вариации и скорости солнечного ветра V_{sw} .

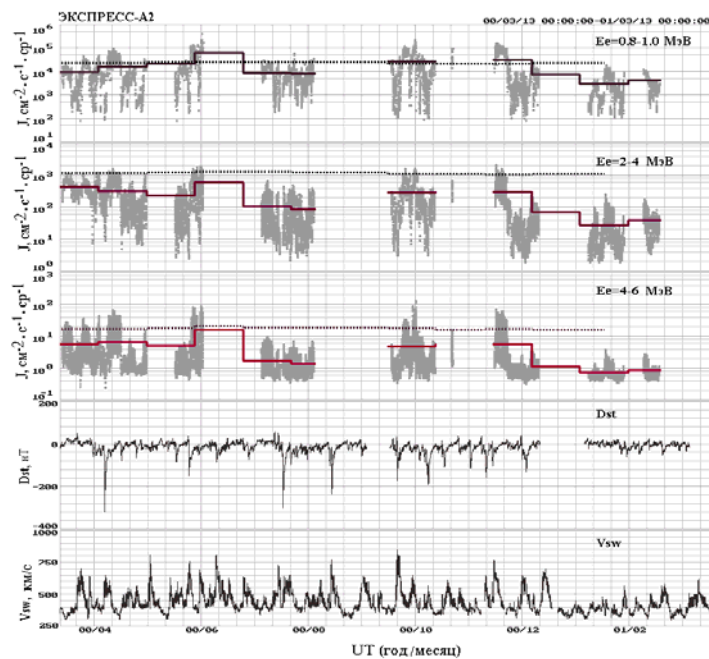


Рис.3. Потоки электронов на геостационарной орбите по данным ИСЗ «Экспресс-А2» за период с 13.03.2000 г. по 13.02.2001 г. Приведены усредненные 27-дневные значения потоков электронов (сплошные линии) и результаты модельных расчетов (точечные линии)

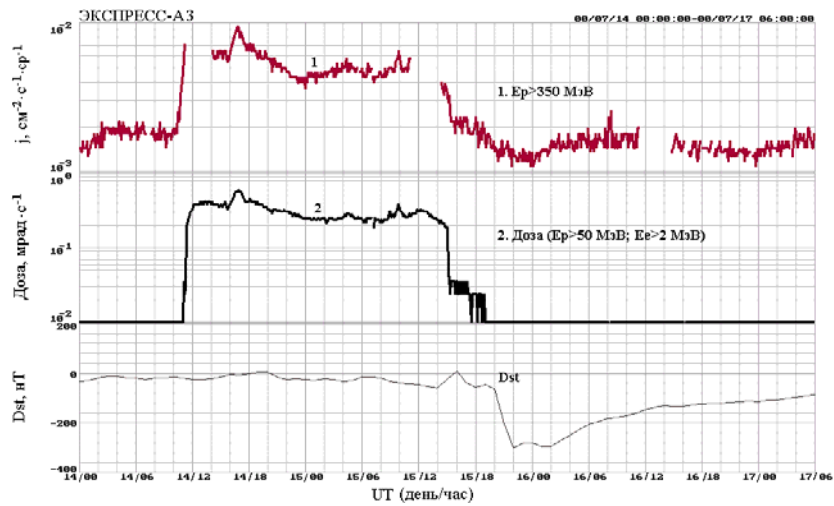


Рис.4. Поток протонов и доза радиации от солнечной вспышки 14.07.2000 г.

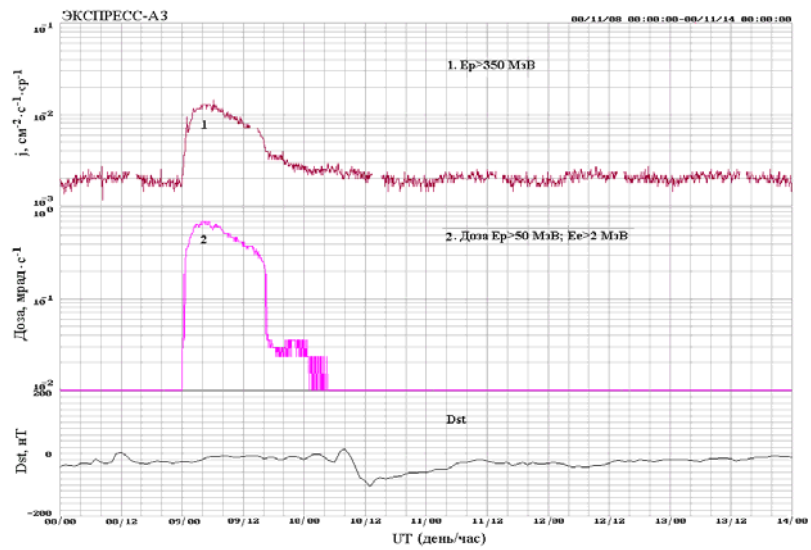


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, для солнечной вспышки 09.11.2000 г.

фоне вариаций потоков электронов, обусловленных структурными изменениями магнитного поля на геостационарной орбите, видно два типа вариаций, связанных, по-видимому, с источником (или механизмом ускорения) электронов: возрастание потока электронов после большинства магнитных бурь и значительный спад интенсивности электронов в конце 2000 – начале 2001 гг., совпадающий с периодом уменьшения скорости солнечного ветра. Сравнение с модельными расчетами показывает удовлетворительное согласие усредненных данных при энергии электронов с $E_e \sim 1$ МэВ и расхождение в несколько раз при более высоких энергиях. Также следует отметить, что существующие модели не отражают реальную динамику потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли.

Солнечные вспышки и дозы радиации

Вторым по важности фактором после релятивистских электронов, оказывающим радиационное воздействие на ИСЗ на геостационарной орбите, являются потоки протонов солнечных вспышек. В 2000 г. наблюдалось два мощных возрастания солнечных космических лучей (СКЛ) с жестким спектром протонов до энергий в несколько сотен МэВ. На рис.4 и 5 представлены временные профили потока протонов СКЛ с энергией $E_p > 350$ МэВ для вспышек 14.07.2000 г. и 09.11.2000 г. и мощность дозы для этих вспышек внутри гермоконтейнера ИСЗ «Экспресс-А3» (пороговая энергия составляла $E_p > 50$ МэВ и $E_e > 2$ МэВ).

В отсутствие вспыхивающих возрастаний СКЛ мощность дозы от электронов внешнего пояса составляла ~ 6.5 мрад/час. Во время первой вспышки мощность дозы составляла ~ 1 рад/час, а во время второй - ~ 2 рад/час т.е. мощность дозы возросла более, чем в 100 раз. За счет этих двух вспышек аппарат получил дозу ~ 20 рад от первой и ~ 28 рад от второй вспышки, т.е. в сумме ~ 48 рад, что соответствует дозе за 12 солнечных 27-дневных оборотов от электронов радиационного пояса и галактических космических лучей (~ 50 рад). Отметим, что речь идет о наиболее жесткой части радиации, проникающей через защиту ~ 2 г/см² Al и более.

В таблице 2 представлены расчетные и реальные интегральные потоки электронов различных энергий и доза радиации от них за 12 солнечных 27-дневных оборотов. Экспериментальное значение дозы радиации уменьшено на 5 мрад, что соответствует дозе от галактических космических лучей (по данным наблюдений на станции «Мир» [13]).

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные потоки электронов различных энергий (см⁻²ср⁻¹) и доза радиации от них (рад) за 12 солнечных оборотов

	Потоки электронов с энергией:			Доза	Примечание
	~ 0.8 МэВ	~ 2 МэВ	~ 4 МэВ		
Эксперимент	$5.6 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^9$	$1.3 \cdot 10^8$	45	
Расчет по модели	$6.2 \cdot 10^{11}$	$2.8 \cdot 10^{10}$	$5.6 \cdot 10^8$	110	Защита 2.0 г/см ² Al

Из данных таблицы 2 видно, что в период максимума 23 цикла солнечной активности интегральные потоки электронов с энергией $E_e > 2$ МэВ и доза

радиации оказались в 2-4 раза ниже расчетных. В то же время отмечается хорошее совпадение потоков электронов с модельными значениями при энергии $E_e \sim 1$ МэВ. Таким образом, можно сделать вывод, что основной вклад в дозу радиации на геостационарной орбите в этот период давали электроны радиационного пояса с $E_e > 2$ МэВ за счет их прямого проникновения через оболочку гермоконтейнера.

Заключение

Результаты мониторинга радиационной обстановки на геостационарной орбите в период максимума 23-го цикла солнечной активности позволяют сделать следующие выводы:

1. Вариации потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли в диапазоне энергий $E_e = 1-6$ МэВ составляют 2-3 порядка величины и обусловлены как геомагнитными возмущениями, так и вариациями параметров межпланетной среды, в частности, скорости солнечного ветра.
2. Различный характер динамики потоков электронов при энергиях $E_e < 1$ МэВ и $E_e > 1$ МэВ указывает на различие механизмов генерации электронов в этих диапазонах энергий.
3. Получено хорошее совпадение среднегодовых интегральных потоков электронов при энергии $E_e \sim 1$ МэВ с расчетными модельными потоками и расхождение потоков более чем в 4 раза при энергиях $E_e > 2$ МэВ.
4. Доза радиации внутри гермоконтейнера (~ 50 рад) определяется в основном потоками электронов с энергией $E_e > 2$ МэВ, проникающими непосредственно через оболочку внутрь гермоконтейнера спутника.
5. Доза радиации от двух мощных солнечных вспышек, зарегистрированных в 2000 году, составила ~ 48 рад, т.е. $\sim 100\%$ от среднегодовой дозы радиации за счет электронов радиационного пояса Земли.
6. Существующие модели электронов внешнего радиационного пояса Земли не отражают динамику радиации на геостационарной орбите и нуждаются в дальнейшем развитии.

Литература

1. M.I.Panasyuk, E.N.Sosnovets, O.S.Grafodatsky et al. *First results and perspectives monitoring radiation belts*. – Geophys Monograph, 1996, v.97, p.211-216.
 2. Н.А.Власова, Е.В.Горчаков, Т.А.Иванова и др. Система мониторинга радиационных условий в магнитосфере Земли на российских космических аппаратах связи, навигации и телевидения. – Космические исследования, 1999, т.37, №3, с.245-255
 3. Л.В.Тверская. Диагностика магнитосферных процессов по данным о релятивистских электронах радиационных поясов. – Геомагнетизм и аэрномия, т.38, №5, с.22-32, 1998.
 4. Т.А.Иванова, Н.Н.Павлов, С.Я.Рейзман и др. Динамика внешнего радиационного пояса релятивистских электронов в минимуме солнечной активности. – Геомагнетизм и аэрномия, т.40, №1, с.13-18, 2000.
 5. D.N.Baker, T. Pulkkinen, X.Li et al. Coronal mass ejections, magnetic clouds, and relativistic magnetospheric electron events: ISTP. – J. Geophys. Res., v.103, №17, p.279, 1998.
-

6. Xinlin Li, D.N.Baker, M. Temerin et al. Rapid enhancements of relativistic electrons deep in the magnetosphere during the May 15, 1997, magnetic storm. – J. Geophys. Res., v.104, №A3, p.4467-4476, 1999.
7. Х.Редерер. Динамика радиации, захваченной геомагнитным полем.(пер. с англ.) – М.: Мир, 1972, 192 с.
8. Б.А.Тверской. *Динамика радиационных поясов Земли*. – М.:Мир, 1968, 268 с.
9. Бахарева М.Ф., Дмитриев А.В. Статистическое альвеновское ускорение электронов во внешней магнитосфере Земли. – Геомагнетизм и аэрономия, 2001, (в печати).
10. J.I.Vette. The AE-8 trapped electron model environment.- NSSDC/-WDC-A-R&S 1-24, 1991.
11. И.В.Гецелев, А.Н.Гусев, Л.А.Дарчиева и др. Модель пространственного энергетического распределения потоков захваченных частиц (протонов и электронов) в радиационных поясах Земли. – Препринт НИИЯФ МГУ – 91/37/241. М., 1991.
12. Tsyganenko N.A., Usmanov A.V. and Malkov M.V. *A Large Magnetosphere Magnetic Field Database*. – J. Geophys. Res., V.99, p.11319-11326, 1994.
13. Тельцов М.В., М.И.Панасюк, В.И.Шумшуров, В.В.Цетлин. – *Вариации доз радиации на станции «Мир»*. – Космические исследования, т.35, №5, с.555-558, 1997.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Гецелев И.В., Красоткин С.А., Охлопков В.П., Чучков Е.А.

*Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцына, МГУ*

Подчеркивается важная роль, которую играют солнечные космические лучи (СКЛ) в физике солнечно-земных связей. Поэтому особое внимание должно быть уделено прогнозированию СКЛ как с точки зрения обеспечения радиационной безопасности космических полетов, так и с точки зрения влияния солнечных корпускулярных потоков на экологию околоземного космического пространства и атмосферу.

Предлагаются методы прогнозирования потоков протонов СКЛ на основе статистического анализа данных о потоках частиц и их корреляции с относительными числами солнечных пятен (числами Вольфа) и потоками радиоизлучения.

Рассматриваются возможности использования рассчитанных с помощью известных методов прогнозирования чисел Вольфа и потоков радиоизлучения для оценки ожидаемых потоков частиц СКЛ.

В настоящее время можно считать вполне установленным существенное влияние СКЛ на экологию околоземного космического пространства. Кроме прямого радиационного воздействия на экипажи и оборудование космических аппаратов (КА) следует отметить сильную ионизацию нижней атмосферы и изменение нейтрального состава мезосферы и стратосферы в результате воздействия частиц СКЛ. Имеется ряд работ, где СКЛ отводится роль спусковых механизмов физических процессов, управляющих климатом на Земле. В этих ус-

ловиях понятна практическая ценность создания эффективных методов предсказания появления СКЛ в околоземном пространстве.

До последнего времени модели долгосрочного прогноза СКЛ базировались на статистическом анализе результатов регистрации солнечных протонных событий (СПС) [1 – 6]. К недостаткам этих моделей следует отнести использование сравнительно небольшого объема статистических данных, применение без достаточных обоснований упрощенных операций со случайными величинами, в качестве которых чаще всего выступают частота и флюенс частиц в СПС.

В работе [7] предложено создание модели на основе статистического анализа величины флюенса частиц СКЛ, накопленного за определенные равные промежутки времени. Использование в модели только одной случайной величины, распределенной по нормальному закону, и значительно большего объема информации позволили избежать отмеченных выше недостатков. Однако в этой модели, так же как и в моделях [1 – 6] слабым звеном остаются способы применения корреляции характеристик СКЛ с числами Вольфа, методы прогноза которых более или менее отработаны.

В первых моделях предполагалось получение искомого результата с помощью достаточно простых соотношений, связывающих ожидаемые характеристики СПС с прогнозными значениями чисел Вольфа. Однако анализ имеющихся в то время данных по солнечной активности (СА) 19 цикла и части 18 цикла показал отсутствие линейной корреляции между числами Вольфа и частотой СПС, даже при их усреднении за месяц, квартал или полугодие. Сведения по 20 циклу подтвердили этот вывод как для усредненной (за год) частоты СПС [8], так и для среднегодовых флюенсов протонов СКЛ с энергиями более 30 и 100 МэВ [9].

В работе [10] выполнен регрессионный анализ годовых флюенсов протонов с энергией более 30 МэВ и чисел Вольфа за период, охватывающий 19 – 22 циклы СА. Был получен общий коэффициент корреляции, равный 0,35.

Эти исследования продолжены в работах [7, 11], где анализу были подвергнуты также измеренные с помощью КА серии GOES данные по 23 циклу солнечной активности.

В предлагаемой работе выполнен статистический анализ данных по солнечной активности и годовым потокам протонов СКЛ с энергией более 30 МэВ. Оказалось, что годовые числа Вольфа, потоки радиоизлучения на частоте 2800 МГц и флюенсы протонов не могут быть описаны удовлетворительно никаким стандартным распределением.

В то же время логарифмы годовых флюенсов протонов СКЛ $L_g PF$ строго распределены по нормальному закону, что хорошо видно из данных рис. 1. Поэтому при отыскании приемлемых для построения прогнозной модели корреляционных функций связи с числами Вольфа вместо значений флюенсов протонов с энергией более 30 МэВ использовались величины их десятичных логарифмов $L_g PF$.

На рис. 2 приведены десятичные логарифмы годовых потоков протонов СКЛ с энергией более 30 МэВ ($L_g PF$) и среднегодовые числа Вольфа (R_z) за период с 1956 по 2000 год. Видно, что более или менее удовлетворительная корреляция имеется лишь в 22 цикле СА с 1989 по 1992 гг. В то же время данные по 23 циклу снизили общий коэффициент корреляции до 0,54.

Применение логарифмов суммы годовых флюенсов протонов нарастающим итогом по циклу ($L_g (PF \text{ cum})$) позволило существенно повысить коэффициент корреляции с суммарными за те же периоды годовыми числами Вольфа $R_z \text{ cum}$.

На рис. 3 приведен пример связи между значениями десятичного логарифма флюенса протонов $Lg PF$ и относительным числом солнечных пятен – числом Вольфа – Rz для 22 цикла. На рис. 4 приведен пример зависимости десятичного логарифма суммы нарастающим итогом от начала цикла годовых флюенсов протонов $Lg (Pf \text{ sum})$ от суммы нарастающим итогом от начала цикла годовых значений чисел Вольфа $Rz \text{ sum}$ для 22 цикла SA . На обоих рисунках проведена кривая методом наименьших квадратов. Как видно из данных рис. 3 и 4 использование полученных зависимостей для прогностических целей невозможно. Этот вывод подтверждается данными по 19, 20, 21 и части 23 цикла.

Наилучшим оказалось использование связи суммы логарифмов годовых флюенсов протонов СКЛ нарастающим итогом от начала цикла ($Lg PF$) sum с суммой нарастающим итогом от начала цикла годовых значений чисел Вольфа $Rz \text{ sum}$. Пример этой связи для 22 цикла приведен на рис. 5. Видно, что функция связи хорошо аппроксимируется прямой линией. На этом рисунке указано и полученное уравнение регрессии. Такая же картина имеет место и по остальным проанализированным циклам SA . Коэффициент корреляции ($Lg PF$) sum с суммарным нарастающим итогом по циклу годовым числом Вольфа $Rz \text{ sum}$ за 19 – 23 циклы SA составляет 0,996.

Детальное рассмотрение полученных результатов показало, что при выполнении таких работ необходимо выделить период максимума цикла SA , или активную фазу цикла SA . В период минимума SA значения годовых флюенсов протонов СКЛ на 2-3 порядка ниже, а числа Вольфа в 3-5 раз ниже, чем в периоды максимума, что приводит к укрупнению функции связи и, как следствие, к завышению прогнозируемых значений.

Изложенные выше данные являются обоснованием того, что корреляционная функция, построенная таким образом по нескольким годам эпохи максимума 23 цикла, будет справедлива на всю эпоху максимума. Тогда, используя данные прогноза чисел Вольфа, полученные в работе [12], можно оценить ожидаемые флюенсы протонов СКЛ с энергией более 30 МэВ за 2001 и 2002 годы. Результаты вычислений отображены на рис. 6. Кружками представлены наблюдательные значения связи суммы логарифмов годовых флюенсов протонов СКЛ нарастающим итогом от начала цикла ($Lg PF$) sum с суммой нарастающим итогом от начала цикла годовых значений чисел Вольфа $Rz \text{ sum}$. Для эпохи максимума (1998, 1999 и 2000 годы) проведена линейная аппроксимация, которая экстраполирована на 2001 и 2002 годы (квадраты).

Из полученных данных нетрудно вычислить ожидаемые значения десятичного логарифма флюенса протонов СКЛ с энергией более 30 МэВ. В 2001 году $LgPF=9.25$ (флюенс протонов $PF=1.8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$) и в 2002 году $LgPF=9.18$ ($PF=1.5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$). По мере появления новых прогнозных данных чисел Вольфа значения флюенса протонов СКЛ могут быть уточнены.

Следует отметить, что наше предположение о предпочтительном использовании потока радиоизлучения на частоте 2800 МГц не оправдалось. Оказалось, что применение этого индекса SA не обеспечивает существенного улучшения связи с флюенсами протонов. Таким образом, полученные в работе результаты позволяют надеяться на возможность создания новой более компактной и адекватной модели прогнозирования СКЛ. Однако для реализации этой возможности необходимо провести более глубокий анализ данных по СКЛ, относящихся к различным фазам SA .

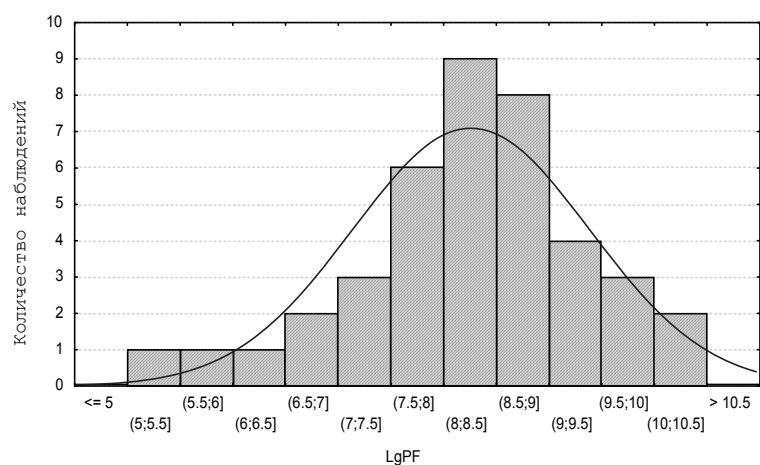


Рис. 1. Нормальное распределение LgPF (Mean=8.26, StDev=1.12)

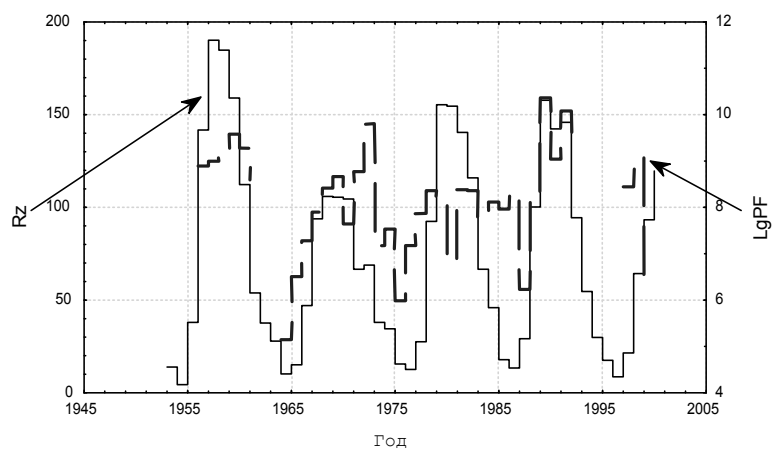


Рис. 2. Rz и LgPF в 1953-2000 гг.

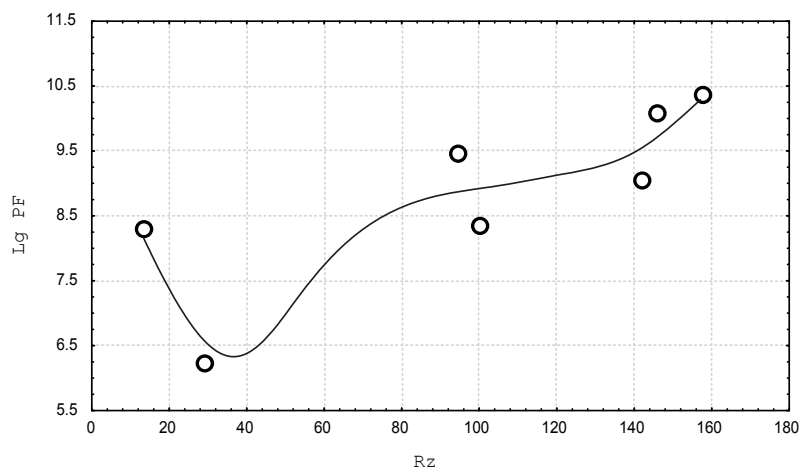
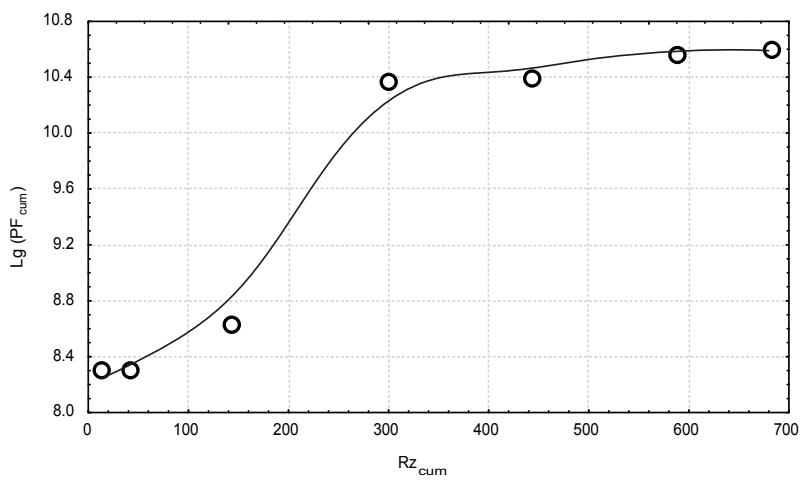


Рис. 3. Связь Lg PF с Rz на примере 22 цикла

Рис. 4. Связь между Lg (PF_{cum}) и Rz_{cum} на примере 22 цикла

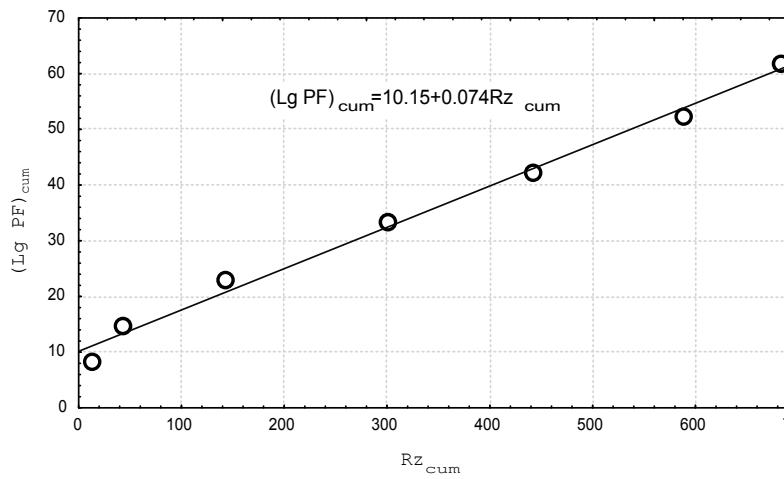


Рис. 5. Связь между $(Lg PF)_{cum}$ и Rz_{cum} на примере 22 цикла.

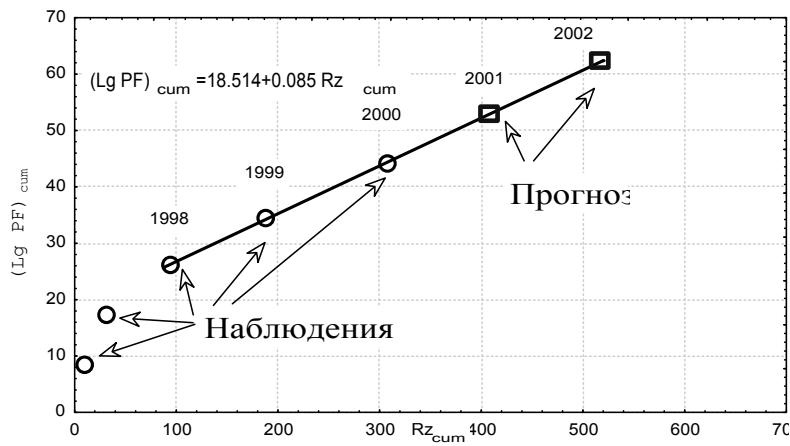


Рис. 6. Связь между $(Lg PF)_{cum}$ и Rz_{cum} в 23 цикле.
 Линейная аппроксимация построена для эпохи максимума (1998–200

Литература

1. Гецелев И.В., Ткаченко В.И. Оценка вероятности наблюдения потоков солнечных космических лучей на орбите Земли. - Геомagnetизм и аэрономия, 1973, т.13, №2, с.208-211.
2. King J.H. Solar Proton Fluences for 1977-1983 Space Missions. J. Spacecraft, 1974, v.11, p.408-416.
3. Tylka A.J., Adams J.H., Boberg P.R. et al. (1997) CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code. IEEE Trans. On Nucl.Sci, v.44, p.2150-2160.
4. ГОСТ 25645.134-86. Солнечные космические лучи: Модель потоков протонов. М.: Стандартиздат, 1986.
5. Feynman J., Spitale G., Wang J. and Gabriel S. Interplanetary Proton Fluence Model; JPL 1991, 1993 J.Geophys. Res., 1998, №A8, p.1328.
6. Ныммик Р.А. Модель потоков частиц и усредненных энергетических спектров солнечных космических лучей. - Космические исследования, 1993, т.31, вып.6, с.51-59.
7. Getselev, I.; Ivanova, T.; Krasotkin, S. A new model of solar cosmic rays. Abstracts. European Geophysical Society, XXVI General Assembly, Nice, France, 25 – 30 March, 2001, p. 220.
8. Nakura Y. – Solar Physics, 1974, v. 39, N 2, p. 493-497.
9. Mc Kinnon J.A. NOAA TM-ERL-22, Boulder, Co, USA, 1972.
10. Гецелев И.В., Зубарев А.И., Подзолко М.В. Долгосрочный прогноз СКЛ. Современные проблемы солнечной активности. Главная астрономическая обсерватория. Конференция, посвященная памяти М.Н. Гневнышева и А.И. Оля, Санкт-Петербург, 26 – 30 мая 1997, стр.307.
11. I.V. Getselev, V.I. Podzolko, S.A. Krasotkin. The relation between solar activity and cosmic rays at the Earth orbit. – Physics of auroral phenomena, 24 Annual Seminar, 27 February –2 March, 2001, Abstracts, Apatity, 2001, p. 53.
12. Храмова М.Н., Красоткин С.А., Кононович Э.В. Метод фазовых средних для сверхдолгосрочного прогноза солнечной активности на примере цикла 23. – Зональная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике. 22 – 24 ноября 2000 г. Тезисы докладов. Владивосток, 2000, стр. 29 – 31.

ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ОЗОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ

Криволицкий А.А.¹, Куминов А.А.¹, Вьюшкова Т.Ю.¹, Базилевская Г.А.²,
Переяслова Н.К.³, Назарова М.Н.³

¹Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета,
Долгопрудный

²Физический институт РАН, Москва

³Институт прикладной геофизики Росгидромета, Москва

Введение

Впервые предположение о воздействии протонов мощных солнечных вспышек на химию малых газовых составляющих средней атмосферы Земли, включая озон, было высказано в 1975 г. [1]. Ионизация солнечными космиче-

скими лучами (СКЛ) молекул земной атмосферы должна инициировать ионно-химические реакции, приводящие к образованию избыточного количества молекул окиси азота, которые, в свою очередь, уничтожают молекулы озона.

Анализ данных спутниковых наблюдений [2,3] в периоды солнечных протонных явлений (в частности, в августе 1972 г.) обнаружил заметное понижение концентрации озона в стратосфере.

В ходе уникального ракетного эксперимента в средних широтах южного полушария в октябре 1989 г. было зафиксировано синхронное увеличение концентраций ионов в верхней стратосфере, молекул окиси азота и понижение концентрации молекул озона во время мощного солнечного протонного явления [4].

Одновременно с экспериментальными работами шло создание и развитие теоретических моделей воздействия солнечных и галактических космических лучей на химию средней атмосферы. Представление о современном состоянии моделирования можно составить, например, по работам [5-7].

В Центральной аэрологической обсерватории в рамках исследований последствий антропогенных влияний на озоносферу была создана численная одномерная фотохимическая модель атмосферы [8]. В последние годы она была дополнена блоком расчета скоростей образования молекул нечетного азота и водорода вследствие воздействия на атмосферу солнечных и галактических космических лучей.

В настоящей работе представлены результаты по моделированию отклика озоносферы на самую мощную протонную солнечную вспышку (июль 2000 г.) 23 цикла солнечной активности, а также на воздействие галактических космических лучей.

Краткое описание модели

Модель описывает взаимодействие 50-ти малых газовых составляющих, участвующих в 150-ти фотохимических реакциях в интервале высот 0-100 км. При интегрировании системы уравнений химической кинетики по времени был использован метод "химических семейств", позволяющий увеличить шаг интегрирования. Уравнения модели включают также процессы турбулентной диффузии химически активной примеси. Скорости фотодиссоциации при проведении расчетов пересчитывались каждый час модельного времени в светлое время суток, при этом учитывался годовой ход зенитного угла Солнца для данной широты места и сферичность атмосферы. В качестве нижнего граничного условия при решении уравнений модели задавались концентрации всех МГС. На верхней границе области интегрирования для долгоживущих компонент также задавались фиксированные концентрации, а короткоживущие составляющие рассчитывались из условия фотохимического равновесия.

Входными параметрами блока расчета скорости ионизации атмосферы энергичными протонами являются интегральные интенсивности солнечных протонов, измеряемых на космических аппаратах. Предполагается, что каждая пара ионов при этом приводит к образованию одной молекулы нечетного азота и двух молекул нечетного водорода. Ионизация нижней атмосферы за счет галактических космических лучей (с тем же выходом нечетного азота) учитывалась на основе эмпирических данных.

Более полное описание модели, включающее методику расчета эффекта протонов солнечных вспышек можно найти в [9].

Солнечная протонная вспышка 14 июля 2000 г.

Максимум текущего солнечного одиннадцатилетнего цикла охарактеризовался серией мощных солнечных вспышек (рис.1). В работе [9] были использованы данные измерений интегральных интенсивностей солнечных космических лучей в нескольких энергетических каналах на ИСЗ "Метеор"-20 и -21 во время одной из первых протонных вспышек цикла в ноябре 1997 г. для моделирования эффекта в озоносфере Земли. Максимальный эффект в уменьшении концентрации озона в полярной зоне составил, по результатам расчетов, около 7 процентов на высотах 65-70 км сразу после достижения максимума интенсивности протонов.

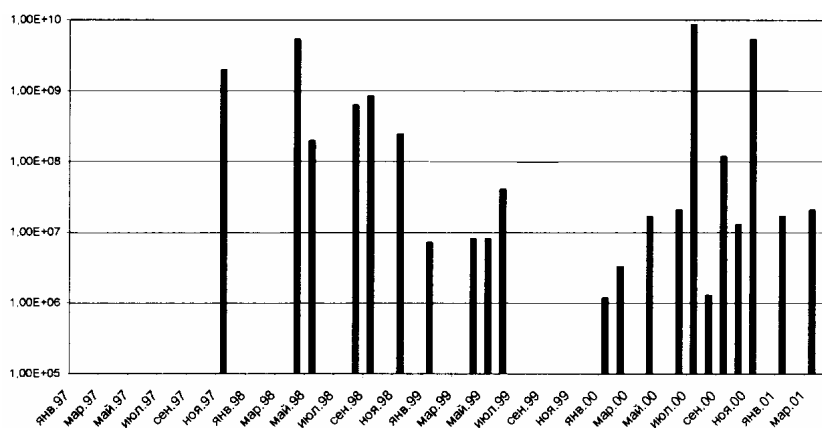


Рис. 1. Ежемесячные суммарные потоки с $E > 10$ МэВ (в cm^{-2}) от солнечных вспышек в 23 цикле солнечной активности

В последующий период на Солнце произошли более мощные вспышки и мы теперь имеем возможность провести численные эксперименты с использованием данных измерений интенсивностей СКЛ в энергетических каналах 0,8-4, 4-9, 9-15, 15-40, 40-80, 80-165, 165-350, 350-420, 420-510 МэВ на ИСЗ GOES-10 в 2000 г. В настоящей работе приводятся результаты для вспышки, начавшейся в 09 часов UT 14 июля 2000 г. На рис. 2 показан временной ход интенсивности СКЛ в каналах 0.8-4, 40-80, 420-510 МэВ. Более энергичные протоны достигли окрестностей Земли раньше, в менее энергичных каналах максимумы интенсивностей были достигнуты соответственно позже.

Результаты численного эксперимента

На рис.3 приводятся рассчитанные высотные-временные разрезы скоростей образования пар ионов (в $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$) в средней атмосфере протонами после солнечной вспышки. Отсчет времени идет с 0 часов UT 14 июля 2000. Высота - в км. Выбор полярных широт обусловлен тем, что здесь магнитное поле Земли практически не препятствует проникновению протонов СКЛ в атмосферу, в то

время, как на средних и еще в большей мере на низких широтах начинает действовать эффект "геомагнитного обрезания" и воздействие СКЛ становится значительно меньше. Отметим, что в северном полушарии на широте 70 градусов в это время был полярный день, в то время, как в южном - полярная ночь. Представляет при этом интерес выявление межполушарных различий в отклике озона и других малых газовых составляющих.

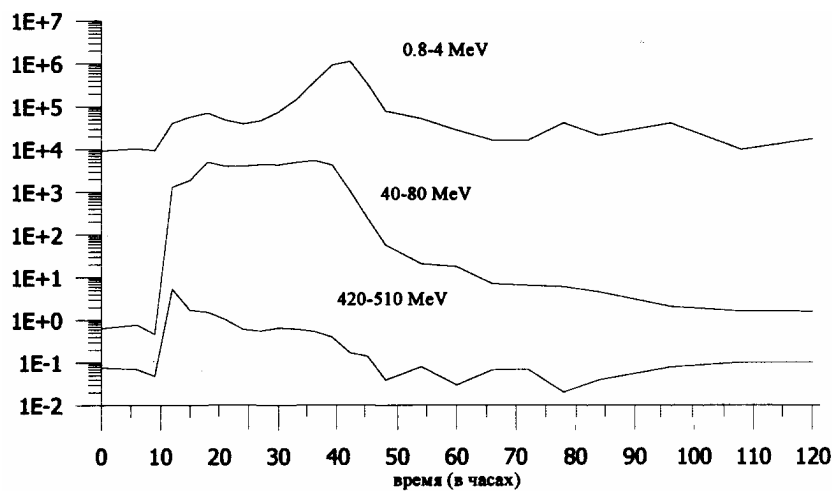


Рис. 2. Интенсивности протонов (в $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1}$) от солнечной вспышки 14 июля 2000 года по данным измерений на ИСЗ GOES-10 в трех энергетических каналах

Сравнение разрезов скоростей ионизации не обнаруживает качественных межполушарных различий. Максимальные скорости в обоих полушариях достигаются вскоре после полуночи (по UT) 15 июля в мезосфере. Несколько большие значения (и на несколько больших высотах) в северном полушарии связаны со "вздутием" летней атмосферы вследствие ее нагрева солнечной ультрафиолетовой радиацией.

Избыточные концентрации нечетного азота в северном полушарии (рис.4) достигают максимальных значений спустя 15 часов после максимумов скорости ионизации, что обусловлено "эффектом накопления" молекул, имеющих относительно большое время жизни в атмосфере. За эти же часы нечетный азот переносится вниз настолько, что его максимум в вертикальном распределении оказывается на несколько километров ниже максимума скорости ионизации. Перенос вниз продолжается в течение последующих нескольких суток.

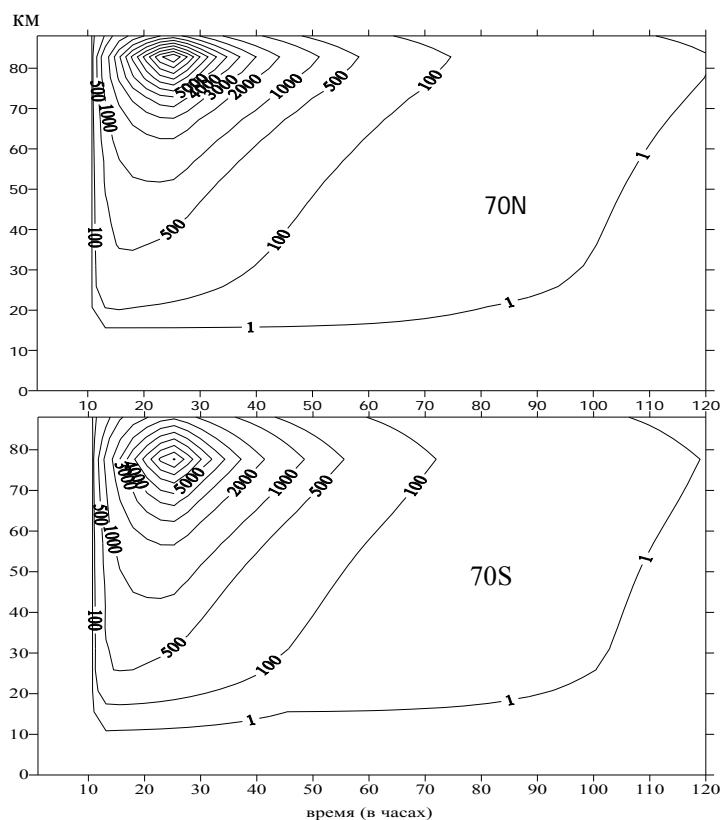


Рис.3 Высотно-временные разрезы скорости ионизации ($\text{см}^{-3}\cdot\text{сек}^{-1}$) средней атмосферы протонами солнечной вспышки 14 июля 2000 года в полярных зонах

Время жизни молекул нечетного водорода существенно меньше и его концентрация уменьшается со временем гораздо быстрее, настолько, что вертикальный перенос практически не заметен (рис.5, северное полушарие).

На рис.6 представлены изменения в концентрации озона. В обоих полушариях уменьшение его содержания в мезосфере составляет десятки процентов (относительно невозмущенного уровня) и сохраняется в течение нескольких суток. В летнем полушарии эффект достаточно велик и в стратосфере: от единиц процентов на высоте стратоспаузы до десятков процентов в верхней стратосфере в первые часы прихода протонов.

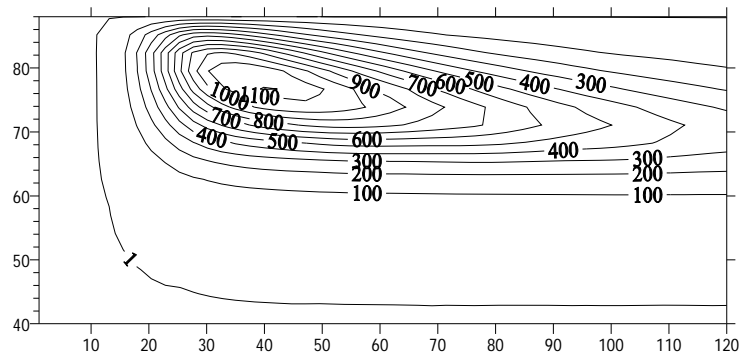


Рис.4. Высотно-временные разрезы изменений концентраций молекул нечетного азота (в % к фоновому уровню) во время протонной вспышки 14 июля 2000 года

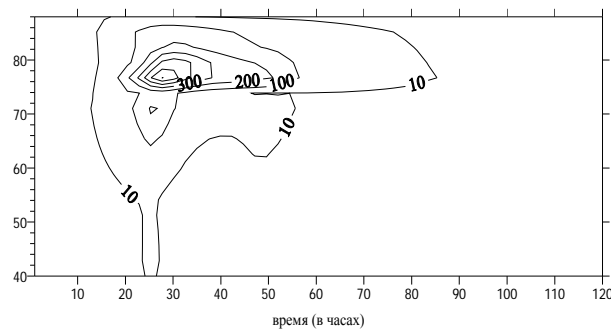


Рис.5. Высотно-временные разрезы изменений концентраций молекул нечетного водорода (в % к фоновому уровню) во время протонной вспышки 14 июля 2000 года

Галактические космические лучи

Ионизация галактическими космическими лучами (и соответствующая генерация окиси азота) происходит в нижних слоях атмосферы с максимумом на высоте около 12 км и в противофазе с циклом солнечной активности. В минимуме солнечного цикла скорость ионизации на высоте максимума составляет приблизительно 40 пар ионов в сек в см^{-3} для широты 50 градусов. На рис. 7 приведен расчет отклика озона в нижней стратосфере и тропосфере на «включение» галактических космических лучей. Видно, что дополнительный источник окиси азота приводит к небольшому увеличению озона в тропосфере и разрушению озона в нижней стратосфере.

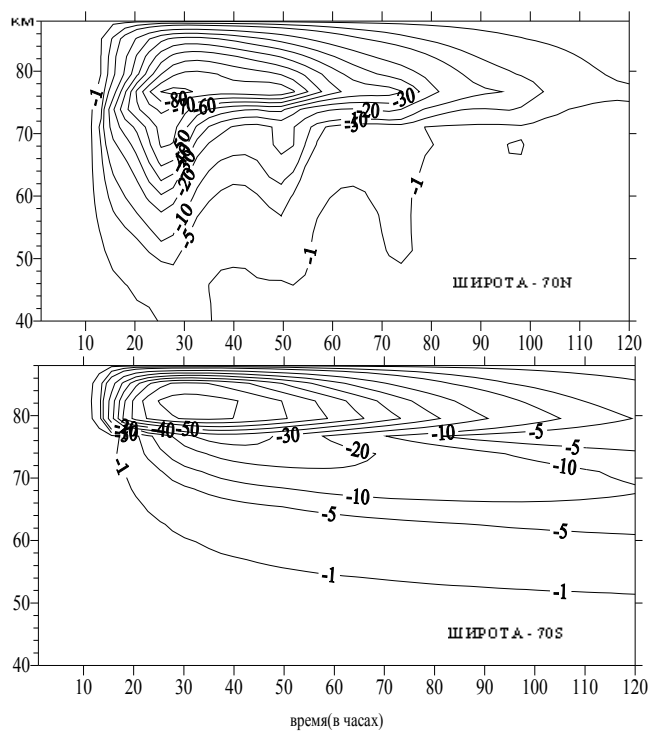


Рис. 6 Высотно-временные разрезы изменений концентраций молекул озона (в % к фоновому уровню) во время протонной вспышки 14 июля 2000 года

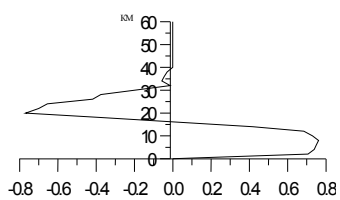


Рис.7. Изменение концентрации озона (в % к фоновому уровню), обусловленное воздействием галактических космических лучей

Заключение

Представленные модельные расчеты, демонстрирующие воздействие космических факторов на химический состав земной атмосферы, находятся в

согласии с результатами других авторов, полученными для предыдущих циклов солнечной активности. В дальнейшем предполагается провести сопоставление результатов численного моделирования с результатами измерений химического состава, осуществляемых в настоящее время со спутников.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты N: 97-05-64605 и 99-02-18222).

Литература

1. *Crutzen P.J., Isaksen I.S.A., Reid G.C.* Solar proton events: stratospheric sources of nitric oxide // *Science*. 1975. **189**. 457.
2. *Heath D.F., Krueger A.J., Crutzen P.J.* Solar proton event: influence on stratospheric ozone // *Science*. 1977. **197**. 886.
3. *Reagan J.B., Meyerott R.E., Nightingale R.W. et al.* Effects of the August 1972 solar particle events on stratospheric ozone // *J. Geophys. Res.* 1981. **A86**. 1473.
4. *Задорожный А.М., Кихтенко В.Н., Кокин Г.А. и др.* Реакция средней атмосферы на солнечные протонные события в октябре 1989 г. // *Геом. аэрон.* 1992. **32**. 32.
5. *Vitt F.M., Jackman H.C.* A comparison of sources of odd nitrogen production from 1974 through 1993 in Earth's middle atmosphere as calculated using two-dimensional model // *J. Geophys. Res.* 1996. **A101**. 6729.
6. *Дёминов И.Г.* Влияние солнечной активности на антропогенно возмущенную озоносферу // В сб. "Исследования атмосферного озона в СССР по итогам работ 1989-1990 гг.". М., 1992. 98.
7. *Reid G.C., Solomon S., Garcia R.R.* Response of the middle atmosphere to the solar proton events of August-December 1989 // *Geophys. Res. Lett.* 1991. **18**. 1019.
8. *Петропавловских И.В., Репнев А.И., Филлюшкин В.В.* Базовый вариант одномерной фотохимической модели атмосферы // В сб. "Численное моделирование состава и динамики атмосферы". М., 1991. 82.
9. *Криволицкий А.А., Куминов А.А., Репнев А.И. и др.* Моделирование реакции озоносферы на солнечную протонную вспышку в ноябре 1997 г. // *Геом. аэрон.* 2001. **41**. 243.

СЕЗОННО-СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ИНФРАЗВУКОВЫХ ШУМОВ В АТМОСФЕРЕ

Соловьев А.В., Тельпуховский Е.Д.

Сибирский Физико-Технический Институт

Исследования фоновых микропульсаций атмосферного давления являются актуальными в рамках решения задач как прикладной, так и фундаментальной проблематики. К таким задачам можно отнести дистанционное зондирование верхних слоев атмосферы, поиск нетрадиционных предвестников ката-

строфических возмущений атмосферы и земной поверхности, экологический контроль состояния окружающей среды и, наконец, медико-биологические исследования воздействия акустических полей на живые системы.

До настоящего времени различными авторами опубликованы работы описывающие инфразвуковую обстановку в разных частотных диапазонах и в различных регионах земного шара [1, 2]. Однако, на основе разрозненных данных сложно дать описание общей картины инфразвуковых шумов. Комплексное исследование закономерностей фоновых инфразвуковых флуктуаций давления позволит получить информацию о сезонно-суточных вариациях шумов во всем инфразвуковом диапазоне частот. Вместе с тем появится возможность на основе сопоставления с данными других исследователей определить локальный или глобальный характер носят данные вариации.

Настоящая работа посвящена описанию предварительных результатов исследований фоновых инфразвуковых флуктуаций давления проводимых на базе инфразвукового мониторинга в условиях г. Томска.

Аппаратура и методика проведения мониторинга

Для исследования инфразвуковых колебаний давления в Сибирском физико-техническом институте (СФТИ) разработан и создан мобильный инфразвукометрический комплекс, предназначенный для регистрации микропульсаций атмосферного давления в диапазоне частот 0.01-50 Гц. Инфразвукометрический комплекс включает в себя три измерительных модуля и центральную станцию (рис. 1).

В качестве устройства преобразования акустических колебаний в электрические используется электретный микрофон МКЭ-3 с паспортной чувствительностью от 4 до 20 мВ/Па на частоте 1000 Гц. Предварительное усиление электрического сигнала производится в непосредственной близости от микрофона для уменьшения помеховых электрических сигналов и наводок. Активный фильтр нижних частот Чебышева пятого порядка обеспечивает частоту среза 50 Гц. Усилитель с перестраиваемым коэффициентом усиления дает возможность

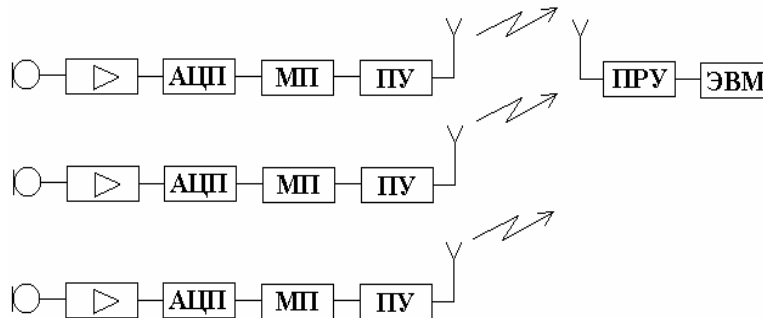


Рис. 1. Блок-схема инфразвукометрического комплекса

выбора оптимального режима сбора данных для конкретной метеорологической обстановки.

Для оцифровки аналогового сигнала используется 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Управление АЦП, формирование слова данных и передача оцифрованных данных на передающее устройство (ПР) производится встроенным микропроцессором (МП).

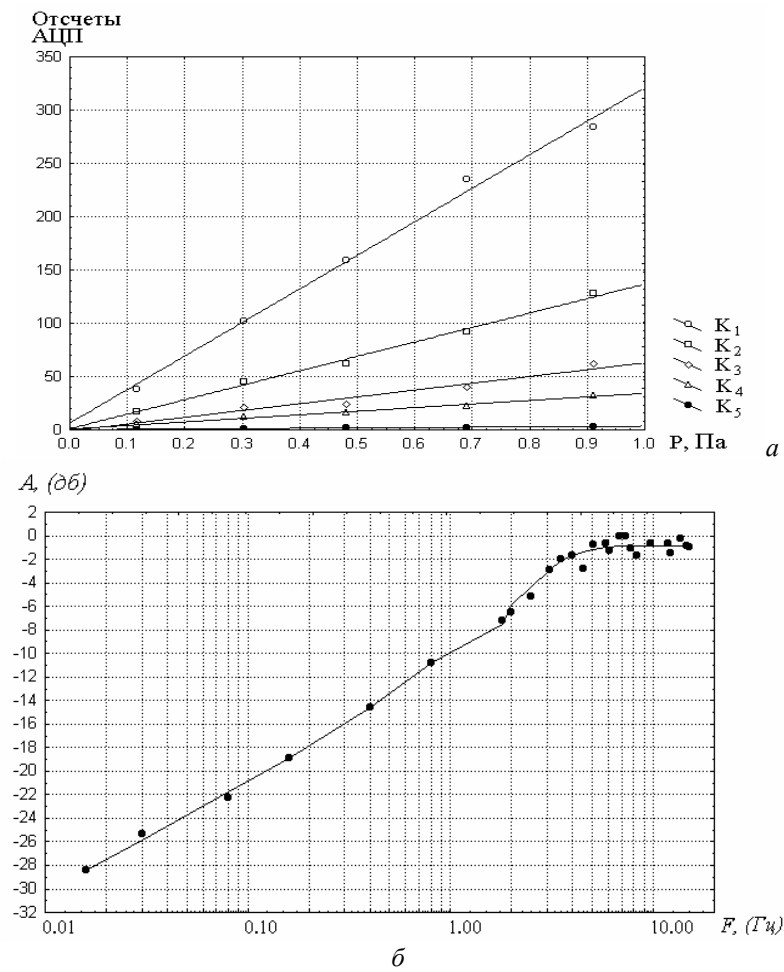


Рис. 2. Калибровочные характеристики измерительного модуля при различных коэффициентах усиления (а), АЧХ измерительного модуля (б)

Центральная станция предназначена для приема и накопления цифровых данных поступающих от измерительных модулей в потоковом режиме. Центральная станция включает в себя приемное устройство (ПРУ), ЭВМ и пакет программного обеспечения.

Мобильность инфразвукометрического комплекса позволяет изменять конфигурацию и местоположение акустической антенной решетки, составленной из измерительных модулей, а также место расположения измерительного комплекса в целом. Использование трех измерительных модулей дает возможность производить пространственную фильтрацию акустических сигналов с определением углового положения источников инфразвука. Блочная структура измерительных модулей дает возможность использования для передачи оцифрованных данных на центральную станцию радиоканал, проводную связь или любое другое средство связи. Конструктивно каждый измерительный модуль может работать независимо от других.

Для абсолютной калибровки и последующей поверки измерительных модулей в СФТИ создан калибровочный стенд. Калибровка производится методом пистонфона, который является одним из основных методов абсолютной градуировки микрофонов на инфразвуковых частотах [3]. Данный метод основан на изменении по гармоническому закону давления внутри измерительной камеры с жесткими стенками. Звуковое давление внутри камеры известного объема возбуждается при помощи поршневой системы установленной на боковой стенке камеры. Поршень приводится в движение двигателем, который снабжен ступенчатым редуктором. С помощью калибровочного стенда была произведена абсолютная калибровка измерительных модулей и измерены их амплитудно-частотные характеристики (рис. 2).

Сезонно-суточные вариации фоновых инфразвуковых колебаний давления

С 1.09.99 г. в СФТИ с помощью инфразвукометрического комплекса проводятся круглосуточные измерения инфразвуковых колебаний давления. Измерения проводятся периодически в течение пяти минут с интервалом пятнадцать минут двумя измерительными модулями, разнесенными на расстояние 85 м друг от друга. Анализу были подвержены регистрограммы для промежутка времени с января по декабрь 2000 г.

Предварительный анализ инфразвукометрических данных заключался в исследовании закономерностей изменения амплитуд фоновых инфразвуковых колебаний давления в диапазоне частот 0.01-1.6 Гц. Прежде всего, из исследуемого набора данных инфразвукового мониторинга были исключены регистрограммы, во время которых наблюдалось действие импульсных источников инфразвука, например, таких как грозовые явления. Затем для исключения флуктуаций давления с частотами выше 1.6 Гц к исходным данным была применена цифровая низкочастотная фильтрация. После этого для уменьшения локальных флуктуаций давления и так называемого "псевдозвука" связанного с порывами ветра для каждого пятиминутного интервала измерений были начисланы $A_2(f)$ - амплитудно-частотные характеристики для первого и второго изме-

рительного модуля, T - период измерений. Известно, что интегрирование $W_{12}(f)$ взаимные спектры мощности $W_{12}(f)$:

$$W_{12}(f) = \frac{1}{T} S_1(f) S_2^*(f) A_1(f) A_2(f),$$

где $S_1(f)$, $S_2(f)$ — амплитудные спектры для первого и второго канала измерений, $A_1(f)$, по частоте позволяет получить общую мощность флуктуаций или дисперсию. Данный факт позволил получить среднеквадратичное отклонение микропульсаций атмосферного давления для каждого интервала измерений:

$$\sigma = \sqrt{\Delta f \sum_i W_{12}(f_i)},$$

где Δf — частотный интервал между спектральными составляющими дискретного взаимного спектра мощности $W_{12}(f)$.

Анализ среднеквадратичных отклонений за исследуемый промежуток времени показал увеличение уровня шумов в зимние месяцы и уменьшение в летние месяцы (рис. 3), что не противоречит литературным данным [1, 2].

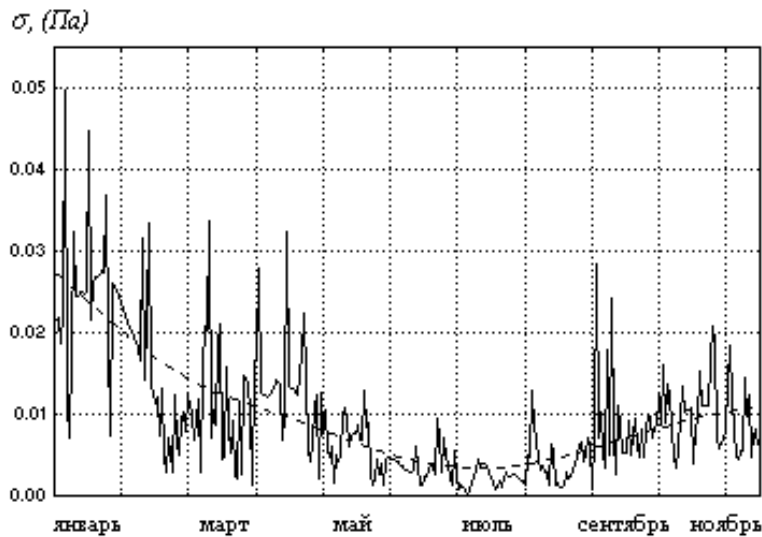


Рис. 3. Сезонное изменение среднеквадратичного отклонения микропульсаций атмосферного давления

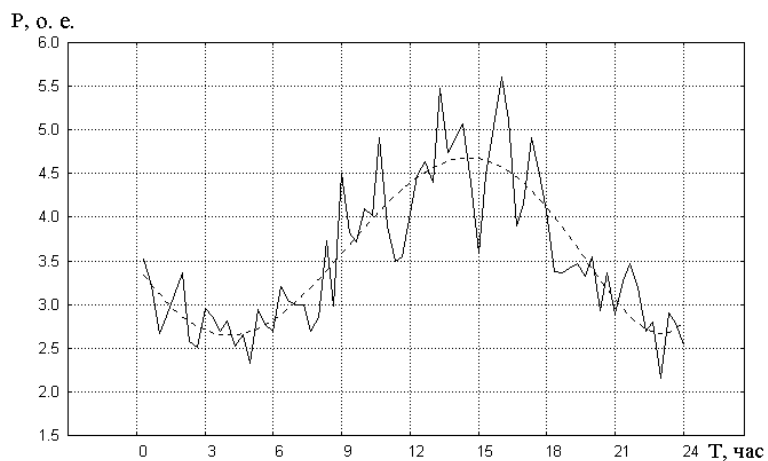


Рис. 4. Суточное изменение микропульсаций атмосферного давления

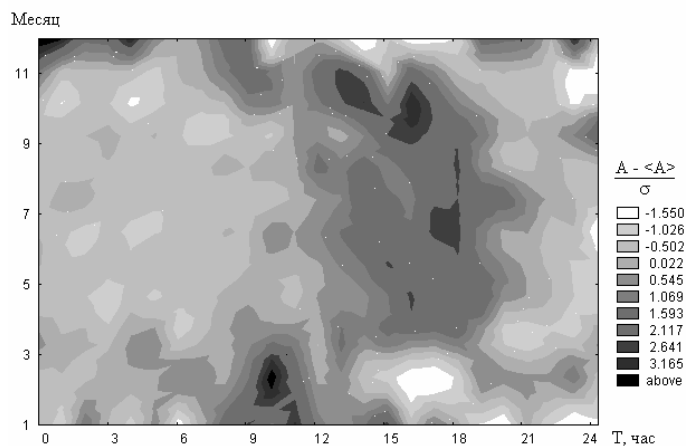


Рис. 5. Сезонное изменение суточных вариаций микропульсаций атмосферного давления

В работе [2] описаны результаты измерений инфразвуковых шумов в диапазоне частот 0.1-1 Гц по данным измерений инфразвукометрическим комплексом СибИЗМИР СО АН СССР в 150 км к юго-западу от г. Иркутска. В приведенном авторами годовом ходе инфразвуковых шумов так же наблюдается увеличение уровня шумов в зимнее время года. Авторами высказана гипотеза,

что основные источники фонового инфразвука находятся в области метеорологических центров действия (или пониженного давления) в Тихом (Алеутский) и Атлантическом (Исландский) океанах. В монографии [2] описана связь между инфразвуковой эмиссией от морской поверхности (микробаромами) по данным регистрации во Фрибурге и высотой океанских волн в Северной Атлантике. Данная связь была подтверждена другими авторами, изучавших направления прихода микробаромов и указывавшими на происхождение микробаромов от сильных морских штормов. Следует отметить, что спектр микробаромов лежит в частотной области 0.1-0.3 Гц с максимумом 0.15 Гц.

Для выявления суточных изменений интенсивности инфразвуковых шумов анализу были подвержены суточные ряды среднеквадратичных отклонений амплитуд колебаний давления без учета АЧХ измерительной аппаратуры. Данный анализ позволил выявить качественную картину суточного хода среднеквадратичного отклонения микропульсаций атмосферного давления. На рис. 4 представлен среднемесячный суточный ход среднеквадратичного отклонения для сентября 2000 г. Форма суточного хода является характерной для всего анализируемого периода измерений.

Вместе с тем наблюдаются сезонные изменения суточного хода среднеквадратичного отклонения инфразвуковых колебаний давления (рис. 5).

Изменения суточного хода в зависимости от сезона года заключается в смещении максимальных значений среднеквадратичного отклонения, который наблюдается около 16 час в летнее время и приблизительно в 11 час в зимнее время года.

Спектральный состав фоновых инфразвуковых колебаний давления

Для определения особенностей спектрального состава фоновых микропульсаций атмосферного давления был проведен анализ энергетических спектров для периода круглосуточных измерений с 1.11.2000 по 30.11.2000 г. Полный объем анализируемой выборки за указанный временной интервал составил порядка 2000 регистрограмм. При построении энергетических спектров использовалась цифровая фильтрация с шириной полосы пропускания в пол-октавы для выявления регулярных спектральных составляющих. Каждый энергетический спектр нормировался на собственную дисперсию. В результате были получены усредненный нормированный энергетический спектр для регистрограмм каждого измерительного модуля в отдельности (рис. 6, а) и усредненный нормированный взаимный энергетический спектр (рис. 6, б).

Общая форма спектров не противоречит литературным данным [1, 4]. Отличительной чертой взаимного энергетического спектра от спектра, рассчитанного по регистрограммам одиночного измерительного модуля, является более резкое падение амплитуд спектральных составляющих в области высоких частот, больших приблизительно 0,03 Гц. Зависимость амплитуды энергетического спектра, рассчитанного по регистрограммам одиночного измерительного модуля (рис. 6, а), от частоты аппроксимируется соотношением: $S(f) \approx f^{-5/3}$. Данная зависимость связана с наличием в спектре так называемого "псевдозвука", причиной которого являются пульсации скорости ветровых потоков в месте измерений. Амплитуда взаимного энергетического спектра аппроксимируется

соотношением: $S(f) \approx f^{-7/3}$. Таким образом, при вычислении взаимного энергетического спектра удастся избежать влияния локальных флуктуаций давления в зоне расположения измерительных модулей.

В случае, когда в спектральном составе нет ярко выраженных характерных частот, наглядное представление распределения энергии по спектру можно получить, рассматривая энергию, приходящуюся на интервал частот, порядка самой частоты [4]. На рис. 7 представлен усредненный взаимный энергетиче-

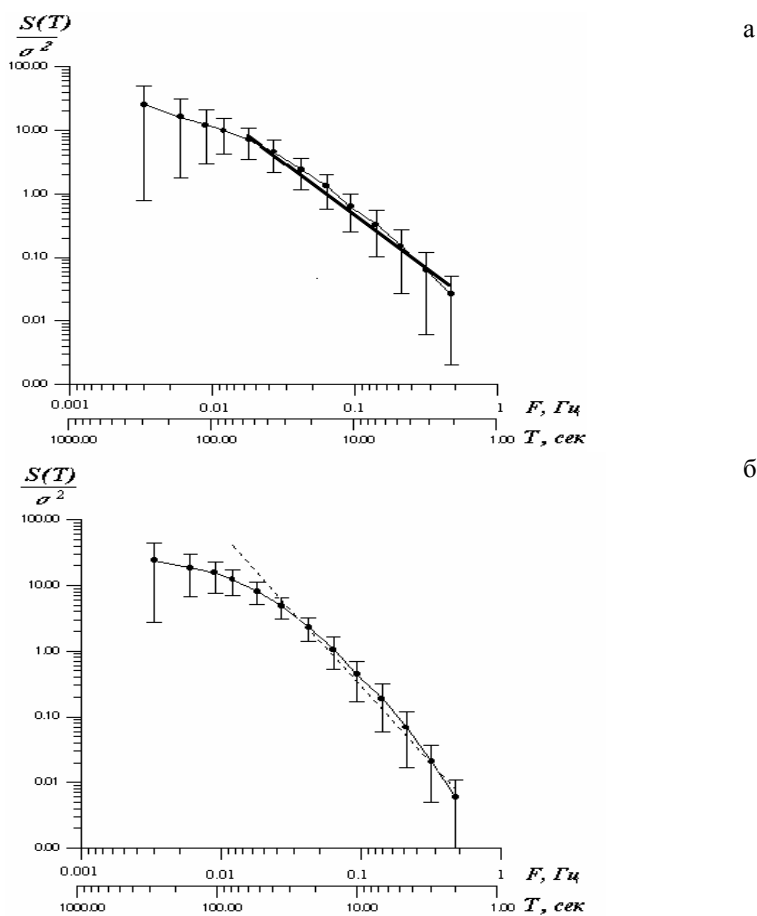


Рис. 6. Нормированный энергетический спектр регистрограмм одиночного измерительного модуля (а), взаимный нормированный энергетический спектр (б)

ский спектр, рассчитанный по спектрам, умноженных на частоту спектральных составляющих и нормированных на собственную дисперсию. Характерной чертой данного спектра является наличие максимума в области периодов от 20 до 100 сек, что согласуется с литературными данными [4].

Заключение

На основе проведенных исследований и сопоставлении с данными других авторов можно сделать заключение о едином сезонном изменении интенсивности флуктуаций давления в диапазоне частот 0.01-1 Гц для различных регионах земного шара. В то же время нельзя отрицать различий количественных характеристик, связанных с региональными особенностями в месте регистрации, при сохранении общей качественной картины инфразвукового фона.

Физическую интерпретацию полученных результатов на данном этапе можно делать только на уровне предположений. Суточные колебания амплитуд инфразвукового давления, вероятно связаны с суточными термическими приливами. В случае справедливости данной гипотезы основными источниками фоновых инфразвуковых колебаний являются возмущения турбулентного характера в верхней атмосфере. В пользу данного предположения свидетельствует сезонное смещение максимума среднеквадратичных отклонений инфразвуковых колебаний в сторону времени максимального прогрева атмосферы.

Спектральный анализ так же свидетельствует о турбулентном происхождении флуктуаций в указанном диапазоне частот. Данный факт подтверждает амплитудно-частотная аппроксимация турбулентного энергетического спектра, выведенная А.М. Обуховым [5, 6]. В случае турбулентной природы источников инфразвуковых колебаний давления амплитуда энергетического спектра должна

быть пропорциональна $S(f) \approx f^{-\frac{7}{3}}$. Зависимость амплитуды энергетического спектра, рассчитанного по регистраграммам одиночного измерительного

модуля, от частоты как $S(f) \approx f^{-\frac{5}{3}}$ связана с наличием в спектре так называемого "псевдозвука", причиной которого являются пульсации скорости ветровых потоков в месте измерений.

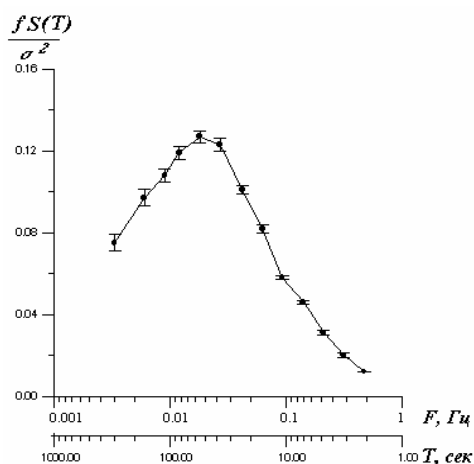


Рис. 7.

Для того чтобы математически описать фоновые инфразвуковые колебания давления необходимо учитывать следующее: во-первых, по расчетам А.М. Обухова [5] структурная функция поля давления пропорциональна квадрату продольной компоненты структурной функции поля скоростей в турбулентном потоке, т.е. связь данных величин нелинейная; во-вторых, необходимо учитывать параметры окружающей среды, влияющих на образование турбулентных потоков и диссипацию энергии в рассматриваемом потоке. Другими словами фоновые инфразвуковые колебания давления должны выражаться в виде многопараметрической функции параметров окружающей среды.

Работа поддержана грантом Министерства образования N T00-11.1-2146.

Литература

1. Госсард Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М: Мир, 1978. 532 с.
 2. Ерущенков А.И., Смирнов Н.А., Сорокин А.Г. Уровень инфразвукового шума атмосферного давления в диапазоне частот 0,1-1 Гц // XI Всесоюзная акустическая конференция. Москва. 1991. С. 13-16.
 3. Коньков А.В. О методе пистонфона. // Акустические измерения. - 1976. - С. 5 - 13.
 4. Голицын Г.С. О временном спектре микропульсаций атмосферного давления. // Изв. АН СССР. - № 8. - 1964. - с. 1253-1258.
 5. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л: Гидрометеоздат, 1988. 412 с.
 6. Ламли Дж., Пановский Г. Структура атмосферной турбулентности. М: Мир, 1966. 263 с.
-

СЕКЦИЯ 2
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ ГИДРОСФЕРЫ

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ РАЗНОМАСШТАБНОГО КРУГОВОРОТА
ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ЭКОСИСТЕМЕ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО
ВОДОХРАНИЛИЩА

Ершова М.Г., Заславская М.Б., Эдельштейн К.К.

*Московский государственный университет им М.В. Ломоносова,
географический факультет*

В слабопроточных, стратифицированных озерах и водохранилищах большим круговоротом химических веществ называют гидроэкологическое явление, состоящее из комплекса биохимических и динамических процессов. Он включает:

- фотосинтез водных растений, в котором поглощаемая их клетками в верхнем, фотическом слое водоема солнечная энергия превращается в химическую энергию органического вещества. Оно образуется из воды и минеральных биогенных веществ, содержащих С, N, P и ряд других химических элементов, с выделением растворяющегося в водной среде кислорода;
- деструкцию органических веществ, при которой водными организмами они окисляются с поглощением O_2 из водной толщи и поровой воды донных отложений;
- вертикальное перемешивание всей водной толщи, благодаря которому биогенные вещества выносятся в фотический слой и становятся пищей водорослей, а афотическая толща насыщается O_2 , необходимым для жизнедеятельности большинства водных организмов.

Важнейшими динамическими компонентами большого круговорота веществ в пресных стратифицированных водоемах умеренных широт являются ежегодные весенняя и осенняя конвективно-динамическая циркуляция воды. В переходные сезоны она обеспечивает возможность существования водного сообщества в следующие за ними длительные периоды летней и зимней стагнации, когда вертикальный обмен веществ в водоеме затруднен его плотностной стратификацией, а проточность минимальна из-за межени на его притоках.

Выполненные в 1996-1999 гг. серии учащенного (с интервалом от 4 час. до 15 мин.) термокондуктометрического и оксиметрического зондирования стратифицированного летом Можайского водохранилища [10] на многосуточных станциях в центре плесов и у приглубых берегов показало существование не только сезонного, но и аналогичных ему химических круговоротов синоптического и суточного масштабов. Их наличие подтверждают и результаты хими-

Работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты 99-05-64045 и 99-05-64555).

ческого анализа проб воды, отбор которых с отдельных горизонтов производился одновременно с зондированием.

В циклоническую погоду, с усилением ветра и охлаждением водной поверхности на 3-7°C волновое и особенно упорядоченное конвективное перемешивание (вихри Ленгмюра) вовлекают в поверхностный перемешанный слой воду из сезонного стоя температурного скачка (СТС), в котором летом расположен пикноклин. Вследствие этого он погружается на все большую глубину. Одновременно образующаяся в каждом расширенном плесе водохранилища система ветровых дрейфовых и компенсационных течений создает зоны нагоны и стоны воды, в каждой из которых у приглубых берегов возникают соответственно даунвеллинг и апвеллинг [5]. Первые служат местом насыщения афотической толщи O₂, планктоном, детритом и растворенными органическими веществами, что усиливает их деструкцию в глубинных слоях в послештормовой период. Места же апвеллинга с наступлением солнечной и штилевой погоды становятся очагами повышенной биологической продуктивности благодаря подъему в фотический слой относительно более прозрачных и обогащенных биогенными веществами глубинных вод. Таким образом эпизодически и возникают летом в стратифицированном водохранилище локально разобщенные элементы большого круговорота химических веществ. По оценке М.Г.Гречушниковой [3], частота этого явления в 40-летний период существования Можайского водохранилища составляла в среднем 6 синоптических циклов в течение вегетационного сезона (от 3 циклов в 1967 г. до 9 - в 1987 г.). Продолжительность ветровой деформации поверхности пикноклина обычно менее суток. С ослаблением ветра благодаря сейшевым и возникающим в СТС плотностным течениям поверхность пикноклина снова приобретает квазигоризонтальное положение.

В штилевую безоблачную антициклоническую погоду особенно активен круговорот химических веществ суточного масштаба. Он назван изучавшей внутримассовую трансформацию фосфорсодержащих веществ А.А.Былинкиной [1] малым круговоротом, поскольку не включает биогенные вещества, регенерируемые бентосными организмами в донных отложениях. Из выполненных ею многочисленных экспериментов по оценке скорости поглощения планктоном минерального радиоактивного фосфора в пробах воды Ивановского и Рыбинского водохранилищ следует, что время оборота фосфора в водных массах этих водоемов сильно варьирует в зависимости от многих факторов, но в среднем равно летом 22 час. Наибольшая интенсивность фосфатного обмена отмечена на этих водохранилищах в особенно жаркое лето 1972 г. и в высокопродуктивном Шошинском плесе.

По наблюдениям на Можайском водохранилище суточный круговорот веществ в основной водной массе стратифицированного водоема наиболее отчетливо выражен в фазу становления антициклонической погоды, когда особенно интенсивен процесс поглощения фотическим слоем солнечной энергии. В эту фазу зарегистрированы наибольшие по размаху внутрисуточные колебания над водоемом температуры воздуха (до 10-12 °С), температуры поверхности воды (до 3,5°C), концентрации в ней O₂ (до 4,5 мг/л), ее удельной электропроводности (до 17 мкСм/см) и рН (до 0,6) [4]. Причиной таких колебаний химических характеристик воды служат наиболее интенсивные в эту фазу синоптического цикла продукционно-деструкционные процессы. Валовая первичная продукция (ПП), характеризующая фотосинтез фитопланктона, в такие дни иногда превышала 6 мг O₂/(л·сут), а деструкция (Д) органического вещества достигала 4 мг

O_2 /(л-сут) [10]. При величине чистой первичной продукции (ПП - Д), характеризующей рост биомассы водорослей, более 2 мг O_2 /(л-сут) небольшая концентрация фосфатов (<0,010 мг/л) в поверхностном перемешанном слое не могла бы обеспечить продукционный процесс в течение двухнедельного в июле 1996 г. периода антициклонической погоды без малого круговорота химических веществ.

Этот круговорот в такую погоду, по нашему представлению, включает следующие процессы:

- интенсивный фотосинтез и рост биомассы фитопланктона вызывает сдвиг карбонатного равновесия в воде вследствие ее подщелачивания, проявляющегося в росте рН до (9,0-9,2), что вызывает ее пересыщение $CaCO_3$;
- формирование дневного слоя температурного скачка на глубине 0,5-1,5 м затрудняет обмен веществами между трофогенным слоем, где $ПП > Д$, и трофолитической толщей, в которой $ПП < Д$;
- кристаллизацию в пересыщенной $CaCO_3$ воде хемогенного кальцита, что вызывает уменьшение электропроводности и минерализации воды из-за понижения в ней концентрации ионов Ca и CO_3 ;
- сорбцию на поверхности хемогенных микрокристаллов, являющихся "прекрасным адсорбентом" [8], органических веществ, тяжелых металлов и фосфатов, что ведет к уменьшению их концентрации в трофогенном слое;
- конвекцию, возникающую вследствие вечернего и ночного выхолаживания поверхностного слоя водоема, продолжающуюся с 17-21 часа до 5-7 часов утра, постепенно усиливающуюся, разрушающую дневной СТС и охватывающую все более глубоко расположенные слои воды вплоть до нижележащего синоптического или сезонного СТС;
- активизацию поднимающегося обычно ночью в поверхностный слой зоопланктона [6], питающегося фитопланктоном и выделяющего пеллеты. Их масса может существенно увеличиваться при включении в их состав микрокристаллов кальцита, плотность которого 2,7-2,8 г/см³;
- вынос нисходящими конвективными токами из поверхностного слоя кальцита и пеллет в глубинный СТС и накопление их там благодаря явлению проникающей конвекции. Наблюдениями на озере Сиверское [6], например, обнаружено, что в СТС, состоящем из нескольких микрослоев происходит дифференциация взвеси: на верхнем из них аккумулируются пеллеты и отмершие планктонные организмы, на нижележащих - остатки панцирей рачков, плотный детрит, включающий мелкие песчинки;
- бактериальное окисление детрита, пеллет и растворенных органических веществ с поглощением O_2 , выделением CO_2 , следствием чего служит понижение щелочности воды до рН<8,2;
- десорбцию фосфатов и частичное растворение кальцита в недонасыщенной $CaCO_3$ воде СТС и, вследствие чего здесь повышается минерализация и электропроводность воды, возрастает отношение Ca/Mg [4];
- вынос к поверхности восходящими конвективными токами образующихся в СТС растворенных химических веществ, что проявляется в повышении к утру минерализации, электропроводности воды, содержания фосфатов, которые вновь вовлекаются в продукционный процесс по мере увеличения освещенности фотического слоя.

Проявлением совокупности перечисленных процессов служат закономерные внутрисуточные колебания упомянутых химических характеристик состава воды (рис.1).

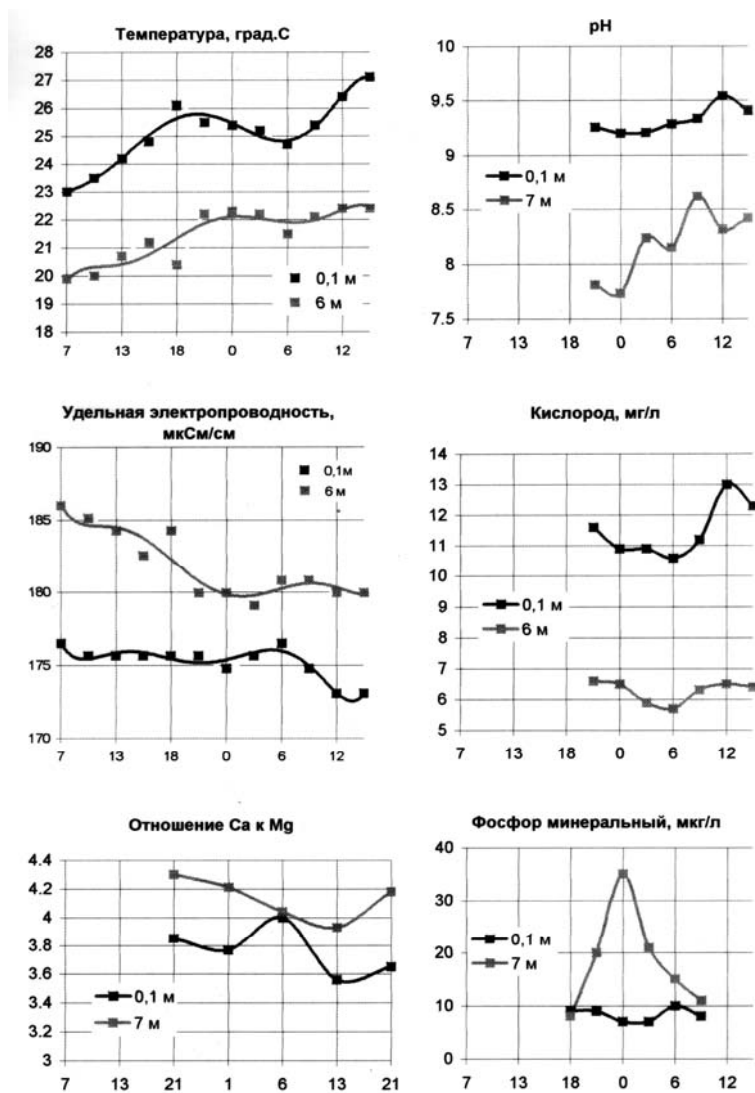


Рис.1. Внутрисуточные изменения характеристик воды 13–14июля 1999 г.

Балансовые расчеты интенсивности солеобмена между поверхностным слоем (0-3 м) и подповерхностным (3-6 м), включающим верхние 0,5 м СТС, показали, что средняя ее величина за 8 час. (с 17:00 07.07.1997 до 01:00 08.07.1997) составила - 12 мг/(м²·час), а в следующие 8 час. к утру из трофолического слоя в поверхностный возвратилось только 75% участвовавшей в этом процессе солей [4].

Для доказательства участия в малом круговороте веществ хемогенного кальцита нами 6 и 14 июля 1999 г. в центре Красновидовского плеса в 17 час (до начала конвекции) отобраны с горизонтов 0,5, 2,0 и 4,0 м 6 проб воды. Кратность ее пересыщения CaCO₃ Ω составляла от 5,1 до 9,7 раз. Эти пробы исследовались в Лаборатории кристаллохимии им. Н.В.Белова ИГЕМ РАН аналитиком А.В.Сивцовым методом просвечивающей электронной микроскопии на электронном микроскопе JEM-100С при ускоряющем напряжении 100 kV. Микроскоп оборудован гониометром с углом наклона ±60°. Капля пробы воды высушивалась при комнатной температуре в течение 35-40 мин на поверхности коллоидной пленки-подложки, регистрация результатов производилась на фото-пластинках.

Во всех 6 пробах зафиксированы частицы, однозначно диагностированные как кальцит. С помощью гониометра получены электронограммы от различных плоскостей обратной решетки минерала. Все рефлексы на них хорошо идентифицируются, дают набор межплоскостных расстояний, соответствующих кальциту. Частицы кальцита имеют неправильную, угловатую, обломочную форму (рис.2). Они либо массивные, либо пластинчатые, проницаемые для пучка электронов. Размер частиц - от десятых долей микрона до нескольких микрон. На краях отдельных кристаллов наблюдаются муаровые полосы, свидетельствующие о высокой степени кристалличности (структурная упорядоченность).

Наиболее богата кальцитом проба, отобранная 6.07.1999 г. с горизонта 0,5 м при Ω = 5,1. В ней и размеры частиц самые крупные, а в пробе, отобранной 14.07.1999 г. с горизонта 2 м при Ω = 9,7, кристаллы - самые мелкие на фоне остатков органического вещества, равномерно покрывавшего пленку-подложку. По определениям А.В.Гончарова, в первой пробе преобладали зеленые и динофитовые водоросли (*Ceratium hirundinella*), биомасса 2 мг/л, а во второй пробе - синезеленые водоросли (*Anabaena flos-aqua*), биомасса 4 мг/л.

Для того, чтобы исключить сомнение в том, что обнаруженные кристаллы кальцита могли образоваться за время подготовки проб воды к микроскопическому анализу, 27 февраля 2000 г. в водохранилище подо льдом отобрана еще одна проба воды с рН 7,35 и сильно недонасыщенная CaCO₃. Контрольный анализ показал, что при максимально возможном увеличении в 30 000 раз среди аморфного осадка на пленке-подложке кристаллов кальцита нет.

Результаты электронной микроскопии показали, что предположение сначала Штейдмана [12], а затем и Оле [11] о том, что в водоемах умеренных широт большая пересыщенность слабо минерализованных вод возможна вследствие образования устойчивой коллоидальной формы карбоната кальция, ошибочно. Отсутствие же хемогенных кристаллов кальцита в составе илов Можайского водохранилища [2] и даже южного Отказненского, где вода пересыщена CaCO₃ с апреля по декабрь [7], объясняется малыми размерами кристаллов и потому малой их гидравлической крупностью (для исследованных образцов кальцита с учетом плотности воды в момент отбора проб она равна от 1 до 25

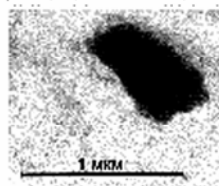
ХЕМОГЕННЫЕ КРИСТАЛЛЫ КАЛЬЦИТА в воде Можайского водохранилища

6 июля 1999 г. 20³⁰
z=0,5 м, T=25,8 °C
pH=9,22, Σи=156 мг/л, Ω=5,1



3,0x2,0 мкм 25 мм/час

14 июля 1999 г. 17⁰⁰
z=2,0 м, T=26,0 °C
pH=9,44, Σи=155 мг/л, Ω=9,7



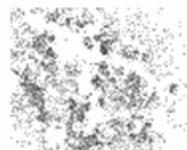
0,7x0,3 мкм 1 мм/час

6 июля 1999 г. 17³⁰
z=4,0 м, T=23,6 °C
pH=9,12, Σи=156 мг/л, Ω=5,3



3,5x1,3 мкм 22 км/час

22 февраля 2000 г. 12⁰⁰
z=1 м, T=0,1 °C
pH=7,35 Σи=243 мг/л, Ω<1



кристаллов нет

Электроннограммы всех отобранных 8 образцов дают набор межплоскостных расстояний, однозначно соответствующих кальциту

Электронный микроскоп JEM-1000 С. Аналитик А.В. Сивцов
Лаборатория кристаллографии им. Н.В. Белова, ИГЕМ РАН

Рис.2.

мм/час). Поэтому при вертикальном перемешивании воды их попадание в слои с $\text{pH} < 8,2$, по-видимому, приводит к быстрому их растворению.

Тем не менее, их важная роль в переносе фосфатов подтверждается и лабораторными экспериментами А.В.Савенко [9], изучавшей соосаждение фосфатов с CaCO_3 в воде Можайского водохранилища и показавшей, что содержание Р в осадке составляет 0,11-0,13 вес.% при начальной концентрации P-PO_4 0,05 мг/л.

В упоминавшейся экспериментальной оценке скорости оборота фосфатов в воде верхневолжских водохранилищ [1] А.А.Былинкиной учитывался радиоактивный фосфор, осаждавшийся на мембранных фильтрах с диаметром пор 0,5-0,7 мкм. Следовательно, более крупные кристаллики кальцита с сорбированным на них фосфором принимались за элементы биотической составляющей малого круговорота веществ в водной экосистеме.

Таким образом, малый круговорот веществ с участием в нем хемогенного кальцита выступает в роли регулятора процесса цветения воды даже в слабо

эвтрофных стратифицированных водохранилищах. Быстрое поглощение фитопланктоном фосфатов в дневные часы сдерживается их сорбцией на кристаллизующемся кальците, что ограничивает пики биомассы водорослей. В тоже время ночная конвекция способствует его десорбции в СТС и выносу в трофогенный слой, продлевая тем самым период цветения до момента смены благоприятной для него антициклонической погоды на циклоническую. Поэтому на Можайском водохранилище не зафиксировано случаев аналитического нуля концентрации фосфатов. Необходимым для регулирования аккумулятором фосфора в малом круговороте служит слой скачка температуры, подобно тому как эту функцию в большом круговороте веществ выполняет верхний слой донных отложений. Авторы выражают глубокую благодарность аспирантке Л.Е.Ефимовой за химический анализ проб, отобранных 5-7 и 13-14 июля 1999 г., н.с. А.В.Гончарову за предоставленные данные о биомассе и видовом составе фитопланктона за этот же период и А.В.Сивцову за исследование проб воды под электронным микроскопом.

Литература

1. Былинкина А.А. Исследование оборачиваемости фосфатов в водной толще водохранилищ // Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. -Борок: ИБВВ АН СССР, 1977. С.53-73.
2. Виноградова Н.Н., Мартынова М.В. Донные отложения и их химический состав // Водохранилища Москворецкой водной системы. -М.: Изд-во МГУ, 1985. С.77-88.
3. Гречушников М.Г. Синоптическая изменчивость температуры воды в долинном водохранилище // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. -М.: ИВП РАН, 1999. С.111-113.
4. Ершова М.Г., Засловская М.Б., Захарова Е.А., Эдельштейн К.К. Внутрисуточная трансформация состава воды в Можайском водохранилище // Водные ресурсы, т.27, 2000, № 4. С.485-497.
5. Ершова М.Г., Эдельштейн К.К. Синоптическая трансформация поля плотности воды в равнинном водохранилище // Водные ресурсы, т.25, 1998, № 4. С.432-439.
6. Маркевич Г.И., Минеева Н.М., Быкова Л.П., Корнева Л.Г., Корнева Е.А., Жаворонкова О.Д. Вертикальная структура планктона оз. Сиверского и ее суточная динамика // Экологические исследования водоемов Волго-Балтийской и Северо-Двинской водных систем. -Л.: Наука, 1982. С.127-149.
7. Матвеева Н.П., Манихин В.И. О хемогенном образовании карбоната кальция в воде Отазенского водохранилища (1969 г.) // Гидрохим. материалы, т.56. - С.31-38.
8. Моричева Н.П., Манихин В.И., Цейс Н.П. О кристаллических формах карбоната кальция, выделяющегося из растворов гидрокарбоната кальция, содержащих некоторые органические вещества // Гидрохим. материалы, т.46. - С.64-68.
9. Савенко А.В. Экспериментальное изучение соосаждения фосфатов с карбонатом кальция // Водные ресурсы, т.27, 2000, № 1. С.87-90.
10. Самолюбов Б.И., Блохина Н.С., Даценко Ю.С., Ершова М.Г., Шакирова Е.Р., Эдельштейн К.К. Исследование гидрологических и гидрохимических полей Можайского водохранилища // Метеорология и гидрология, 1998, № 3. С.62-91.

11. Ohle W. Die hypolimnische Kohlendioxyde Akkumulation als production biologischer Indikator // Arch. Hydrobiol., vol. 46, 1952/

12. Steidtmann E. Travertine depositing waters near Lexington Virginia // Science, vol. 82, 1925.

ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОД ЧЁРНОГО МОРЯ

*Иванов В.А., *Кузнецов А.С., **Сабинин К.Д.

**Морской гидрофизический институт НАНУ
**Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева РФ*

Интенсивное освоение ресурсов Чёрного моря требует цивилизованного отношения к проблеме обеспечения экологической и техногенной безопасности населения регионов и акваторий активного природопользования. Глобальные изменения уже сейчас нарушают устойчивые взаимосвязи между различными зонами Чёрного моря. Постоянный контроль за состоянием и динамикой вод Чёрного моря необходим для проведения регулярных оценок изменения экологической ситуации и принятия оперативных управленческих решений. В настоящее время наиболее перспективен комплексный подход к океанографическому мониторингу, разумно сочетающий достоинства как традиционных контактных гидрофизических методов измерений, так и дистанционных аэрокосмических и акустических методов исследований водной среды. Синтез результатов, полученных разнообразными независимыми методами, позволяет следить за состоянием исследуемой акватории с приемлемой точностью и без чрезмерных затрат.

Гидролого-акустический компонент комплексного мониторинга содержит индивидуальный набор практических методов, средств исследований, обработки и анализа океанографических материалов. Представлены обобщения и изложены некоторые результаты аппаратурно-методических разработок и натурных экспериментальных исследований, выполненных Морским гидрофизическим институтом НАН Украины (МГИ, г. Севастополь) совместно с Акустическим институтом им. акад. Н.Н. Андреева (АКИН, г. Москва) на стационарной акустической трассе [1-4] и специальном акустико-океанографическом полигоне у южного побережья Крыма. Анализ и обобщения результатов исследований позволили оценить фактические перспективы создания информационной технологии акустического мониторинга вод Чёрного моря и продолжить разработку её основных структурных элементов.

Концептуальные основы. Информационная технология дистанционного акустического мониторинга морской среды имеет целью получение достоверных знаний о мезо- и крупномасштабной эволюции полей энтропии, кинетической и потенциальной энергии вод обширных акваторий. Технология бази-

руется на нетрадиционном дистанционном методе дальнего прозвучивания водной среды между разнесенными по пространству приемо-передающими системами. Определены актуальность и перспективы такого вида дистанционных зондирований [1 - 6]. Метод ориентирован на специальный акустический сигнал малой мощности, который, проходя сквозь среду по различным траекториям, накапливает информацию о ее характеристиках. Пределы дальности зондирования обусловлены интенсивностью рассеивания и трансформации системы упругих акустических волн в зондируемых средах. По прямым измерениям значений линейных и плоскостных интегралов характеристик поля скорости звука реконструируются элементы эволюции полей скорости звука, температуры, плотности, примесей, скоростей течений и завихренности водных масс, а также решаются задачи распознавания и идентификации гидродинамических образований.

Основными структурными элементами технологии являются:

набор технических методов и средств, реализующих дальнюю приёмопередачу и обработку акустических сигналов с выделением устойчивых информационных признаков для решения обратной задачи;

класс базовых математических моделей, имеющих решения прямой и обратной задач, описывающих динамику выделенных видов гидроакустических сигналов и полей и адаптированных к региональным геолого-геофизическим условиям.

Гидроакустические методы и средства (ГАС). В передающем режиме ГАС вырабатывают специальные сигнальные посылки, а в режиме приема обеспечивают выделение устойчивых информационных признаков из сигналов прошедших сквозь среду от передающей ГАС. Исследованиям принципов квазиоптимального приема и обработки сигналов при высоких уровнях шумов и проблеме выделения устойчивых информационных признаков посвящено достаточное количество отечественных и зарубежных публикаций, например, обзор в [3]. В качестве информационных признаков поля скорости звука используются время распространения, углы прихода, фазы, амплитуды сигнала и т.п. В современных ГАС чаще всего используется время распространения сигнальной посылки от излучателя до приемника (временные сдвиги элементов посылки) [1 - 6]. Это обусловлено, в первую очередь, относительной простотой аппаратной реализации канала измерений временных интервалов в условиях высокого уровня шумовых факторов, а также подготовленной теоретической базой и очевидностью методов последующей обработки, интерпретации и анализа такого вида измерений. При монохроматических (тональных) сигналах существует принципиальное ограничение пространственного разрешения метода. Применение широкополосных сигналов специальных видов, например, полигармонических (набор тональных импульсных посылок), линейно-частотно-модулированных [1 - 4], фазо-манипулируемых последовательностей максимальной длины [5] и т. п. при использовании методики спектрометрии временных задержек позволяет расширить пределы пространственного разрешения метода. Принципиальные разновидности современных ГАС реализованы как в кабельных [2, 4], так и автономных [1, 3, 5, 6] вариантах.

Элементы модельных представлений. На стадии оптимального планирования эксперимента для оценок динамики полей и гидроакустических сигналов применяют специальный вид математического моделирования, например [7]. Направление «имитационного» моделирования используют для оценки пе-

редаточных функций антенн ГАС, оперируя ими в исходных моделях. Помимо процедуры целевой оптимизации построения приемо-передающей решетки необходимым звеном модельных построений являются исходные распределения характеристик, сведения об их изменчивости и ошибках определений. Не вдаваясь в проблемы численного решения томографических задач и специфические особенности применимости схем и видов акустической томографии [3], отметим, что основополагающей характеристикой морской среды при вычислениях траектории распространения и времени прохождения сигнальных посылок являются опорные (фоновые) профили распределения скорости звука и ее вертикального градиента. Характерным признаком крупномасштабной гидрологоакустической структуры Черного моря является относительно узкий квазипостоянный в течении года подводный звуковой канал (ПЗК) с близко расположенной к поверхности осью. В работе [8] при обработке архивных материалов из банка океанографических данных МГИ получены средние месячные профили скорости звука и исследованы закономерности и сезонные особенности изменчивости гидроакустического поля на шельфе у южного побережья Крыма. Сезоны в полях гидрологоакустических характеристик вод исследуемого района соответствуют гидрологическим сезонам для Черного моря. Выполнена оценка влияния сезонных особенностей на лучевую структуру звукового поля, выделены типовые структуры и определены параметры акустических волноводов. В зимнее время года (декабрь - март) формируется приповерхностный звуковой канал и ПЗК, которые существенно трансформируются в теплый сезон (апрель – ноябрь) по всей толще вод до 100 м [8].

Проблемы моделирования в статье обозначены в общем виде как обязательный элемент информационной технологии, который достоин отдельного самостоятельного рассмотрения.

Контрольно-калибровочный полигон (ККП). Исключительно важное место в становлении и совершенствовании дистанционных методов занимает этап натурной верификации и калибровки дистанционных средств по данным синхронных контактных измерений. Научная кооперация с АКИН и Научно-производственным предприятием «Инфратех» (НПП, г. Феодосия), современный уровень собственных аппаратурно-методических разработок, наличие станции приема спутниковых изображений и практический опыт по созданию морских ККП позволили МГИ приступить к внедрению элементов системы гидроакустического мониторинга. В качестве акустико-океанографического ККП был выбран участок акватории у южного побережья Крыма между м. Кикинейз – м. Меганом протяженностью около 100 км, представленный на рис.1. Для инструментального обеспечения ККП использованы наборы высокоточных зондирующих и буксируемых гидролого-оптико-химических (STD) комплексов различных модификаций, автономных измерителей горизонтальной и вертикальной компонент скорости течений, уровня моря, поверхностного и внутреннего волнения и метеостанции. Носителями гидрофизической аппаратуры были морские суда, заякоренные автономные буйковые станции (АБС), стационарная океанографическая платформа и специальные донные установки. Работы на ККП выполнены в экспедициях 1991 г. (июнь – сентябрь), 1992 г. (июнь, сентябрь), 1993 г. (апрель, июнь – сентябрь), 1994 г. (декабрь), 1995 г. (апрель) и 1997 г. (октябрь). Схема проведения контактных съёмок позволила оперативно исследовать трехмерную структуру гидрофизических полей (температуры, солености, скорости звука, скорости течения и т.п.) акватории ККП. Контактные

измерения с высоким пространственным разрешением дают точные оценки геометрических размеров и структуры региональных гидродинамических образований и аномалий гидроакустических полей. Поля скорости звука рассчитывались по прямым STD – измерениям *in situ*. Исследования структуры и изменчивости течений выполнялись при длительных постановках десяти заякоренных АБС, размещенных в центральной части разреза «1», вдоль разрезов «2» и «0» (рис. 1), а также динамическим методом по данным гидрологических съёмок. Контактные съёмки полигона обеспечивались квазисинхронными спутниковыми изображениями. Изображения полей электромагнитного излучения акватории в зоне ККП по данным сканера AVHRR/2 спутников серии NOAA позволили достаточно регулярно получать качественные оценки пространственных размеров устойчивых поверхностных образований динамики вод. Череду последовательных гидродинамических образований наглядно демонстрирует изменчивость процессов и дает оценки кинематических характеристик поля поверхностного течения.

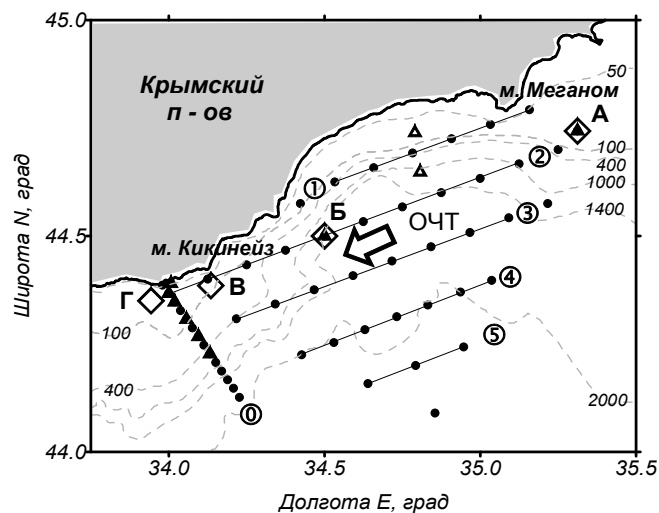


Рис. 1. Схема района акустико-океанографического полигона, рельефа дна (прерывистые линии), расположения стандартных гидрологических станций (•, где ② индекс соответствующего разреза "2"), заякоренных АБС (Δ) и автономных ГАС (◇) с индексами А - Г

В экспериментах 1991 г. и 1992 г. при отработке методики дистанционных гидроакустических зондирований на ККП одновременно использовались низкочастотные кабельные ГАС и аппаратные комплексы АКИН [2] и НПП [4], а также опытные образцы автономных ГАС МГИ [1, 3]. Получены оценки времени распространения (средней скорости звуковой волны) и других информационных признаков сигнальных посылок вдоль стационарной акустической трассы. Стационарная кабельная система аппаратных комплексов [2, 4] включала донные приемную антенну и передающую ГАС, размещенные вблизи м.

Меганом. Передающая ГАС была установлена на шельфе у м. Кикинейз. Используются тональные и линейно-частотно-модулированные (ЛЧМ) сигнальные посылки в диапазонах низких частот. Время распространения сигнала вдоль трассы имело значения около 70 с. Параллельно этим работам на ККП отрабатывались элементы методики комбинированных акустических съёмок с использованием автономных ГАС в различных вариантах: мобильном - с борта НИС, позиционном - в составе заякоренной АБС и стационарном - при донной установке. Автономная ГАС МГИ имеет диапазон перестройки несущей частоты при генерации тональных, полигармонических и ЛЧМ сигналов [1, 3]. ГАС была установлена в точке А (рис. 1) в подводном звуковом канале, а затем у дна и работала в передающем режиме. Для отработки методики и оценки качества приёма сигналов в различных зонах ГАС излучала в режиме акустического маяка посылки тонального сигнала частотой 495 Гц, длительностью 80 с и периодичностью излучения равной 1 час. Синхронный приём осуществлялся на судне антенной, переустанавливаемой от поверхности до глубины порядка ста метров. Было выполнено 17 серий измерений интенсивности принимаемого звукового сигнала. Во всех случаях выделены и зарегистрированы моменты прихода сигнальных посылок и определены зоны наиболее устойчивого приёма. В ближней зоне у пункта А сигнал принимался во всем диапазоне глубин, в глубоководной части трассы (пункт Б) наблюдалась концентрация сигнала у оси ПЗК. Наибольшая интенсивность сигналов зарегистрирована при инсталляции излучателя в слое ПЗК [1, 3].

Обсуждение и основные экспериментальные результаты. Обзор материалов о региональных особенностях крупномасштабной динамики вод и анализ результатов натурных исследований, выполненных на акустико-океанографическом ККП позволили систематизировать исследуемые процессы и явления по порядку их масштабов и энергетического вклада. Основным энергетическим источником изменчивости в открытой части акватории полигона является Основное черноморское течение (ОЧТ), которое имеет выраженный струйный характер [9]. При общей циклонической циркуляции вод относительно глубокого моря преобладает ориентация течения вдоль изобат берегового склона, а стрежень приурочен к крутым участкам материкового склона. В зоне ОЧТ в верхнем 100-метровом слое скорости слабо уменьшаются с глубиной. Для прибрежной зоны полигона характерен своеобразный режим циркуляции со значительными горизонтальными градиентами средних скоростей и весьма изменчивым волно-вихревым характером течений, зависящим от топографии дна, сгонно-нагонных ветровых условий, мезомасштабной и синоптической изменчивости ОЧТ. Согласно данным долговременных измерений уровня поверхности моря у южного побережья Крыма доля сезонных смещений в результирующие колебания уровня не превышает 30 %, в то время как вклад мезомасштабных и синоптических движений достигает 60 – 70 %. По данным эксперимента [10] в восточной части полигона в летний сезон наблюдался распад ОЧТ на систему меандров и мезомасштабных вихрей разного знака, а наиболее интенсивными элементами изменчивости ОЧТ и фоновой структуры вод являются длинноволновые движения с периодами около 11 суток, 1 – 3 суток с доминирующим периодом 26.5 час и колебания вблизи инерционной частоты при существенном вкладе бароклинных волн Пуанкаре с периодами около 16.7 час. Движения на субинерционных частотах идентифицированы как разные виды захваченных берегом волн, распространяющихся на запад. В работе [11] боль-

шая часть акватории полигона отнесена к периферии квазистационарного антициклонического круговорота, выделенного в осенний сезон на шельфе между ОЧТ и южным побережьем Крыма. Результаты натурных исследований, выполненных на акустико-океанографическом ККП в 1991 - 1997 годах, подтвердили основные черты элементов динамики вод и укладываются в выделенные рамки изменчивости. В ходе экспериментов систематически регистрировались явления прибрежного апвеллинга и даунвеллинга, особенно частые в пограничной области шельф – склон между пунктами Б и В (рис. 1) при периодичности стоннонагонной циркуляции порядка одной недели, а также цуги интенсивных короткопериодных внутренних волн с амплитудами до 4 м и периодами 15 - 20 мин, распространяющиеся вдоль разреза «0» (рис.1) от кромки шельфа в сторону берега и отчетливо проявляющиеся на морской поверхности.

Сезонная эволюция фонового состояния и динамика акустических образов интенсивных колебаний вод, выделенных на ККП, составили предмет натурных исследований. В работе [2] наряду с лучевой картиной распространения акустических сигналов в ПЗК, рассчитанной вдоль гидрологического разреза «2» (рис. 1) по данным июньской 1992 г. съёмки, представлена соответствующая структура реальных образов звуковых посылок, прошедших по стационарной трассе и зарегистрированных приемными элементами антенной решетки. При этом перманентными экспериментальными результатами являются устойчивый прием тональных сигналов при статистически значимой связи временных флюктуаций интенсивности и фазы сигнала с колебаниями пикноклина в диапазоне гравитационных внутренних волн (периоды 10 мин – 3 час), а также устойчивый прием разделяющихся вдоль трассы элементов передаваемых ЛЧМ сигнальных посылок. Сопоставления текущего (временной эволюции) спектра принятого ЛЧМ сигнала амплитудно-частотной характеристики канала с синхронными по времени измерениями колебаний изоплет скорости звука на разрезе «2» (рис. 1) демонстрируют тесную связь интерференционной структуры акустического поля в волноводе с длинноволновыми движениями и, прежде всего, с колебаниями вблизи инерционной частоты [2]. Идентификация изменчивости акустических образов с выделенными гидродинамическими структурами проведена по данным синхронных контактных измерений [1, 3]. Максимальная продолжительность непрерывных серий акустических зондирований не превышала 10 суток, что не позволило достоверно сопоставить колебания на субинерционных частотах.

Сопоставления лучевых структур звуковых полей вдоль акустической трассы А - Г, вычисленных по данным гидрологических съёмок (июнь, сентябрь 1992 г., сентябрь 1993 г., декабрь 1994 г. и апрель 1995 г.), демонстрируют черты как сезонной эволюции, так и внутрисезонную изменчивость пространственной структуры поля скорости звука и характеристик ПЗК. Для оценки динамики вод и условий прохождения акустических сигналов под воздействием стоннонагонных ветров была использована разработанная в МГИ высокоразрешающая модель с непрерывной стратификацией вод [3]. Результаты численных расчетов для реальных условий летнего сезона при событиях апвеллинга-даунвеллинга наглядно демонстрируют кардинальные изменения структуры акустического поля в шельфовой зоне. Как при апвеллинге, так и при даунвеллинге в прибрежной зоне происходит разрушение ПЗК, но если в первом случае сигнал без существенных искажений может быть принят в любом из слоёв, то во втором, - возникают условия его прямой блокировки. В такой ситуации поступление ис-

каженных сигнальных посылок на шельф и далее в прибрежную зону возможно по другим траекториям в приповерхностном термическом звуковом канале. Фоновая структура вод и характеристики звуковых каналов восстанавливаются в течении нескольких суток после прекращения ветра. Результаты экспериментальных исследований подтвердили основные выводы расчётов.

Выводы. Исследования нацелены на создание базовых элементов информационной технологии дистанционного акустического зондирования вод. Результаты исследований позволяют дать положительное заключение о перспективе создания системы акустического мониторинга вод Чёрного моря.

Такая оценка базируется, прежде всего, на :
экспериментальных фактах [1 - 4], подтверждающих принципиальную возможность такого вида дистанционных зондирований;

наличии для этих целей развитой научно-производственной инфраструктуры;

наличии парка современных традиционных и специальных океанографических измерительных комплексов, продвинутых разработок гидроакустических средств. Научная кооперация Специального конструкторско-технологического бюро МГИ с АКИН и Институтом океанологии РАН позволила продолжить разработку перспективных элементов ГАС. С целью совершенствования системы управления экспериментом и расширения функциональных возможностей ГАС создан автономный модуль для обработки и накопления результатов акустических зондирований как ЛЧМ, так и фазо-манипулированными сигналами последовательностей максимальной длины. Наличие микропроцессорного контроллера, твердотельного энергонезависимого накопителя данных ёмкостью до 16 Мбайт и интерфейса связи в стандарте RS-232 позволяют универсально использовать приемо-передающие ГАС как в автономном, так и кабельном варианте с эксплуатацией специальных и телефонных линий связи;

наличии специализированного банка океанографических данных Чёрного моря и класса современных модельных разработок для описания динамики вод. Объёмы фактического материала позволили начать формирование компьютерного каталога интенсивных гидродинамических образований акватории.

Дальнейшее развитие информационной технологии и элементов системы акустического мониторинга и диагностики состояния вод Чёрного моря возможно при кооперации деятельности ученых и специалистов стран Черноморского региона.

Список литературы

1. Дистанционный акустический мониторинг мезомасштабной изменчивости температуры в шельфовой зоне Чёрного моря : Отчет о НИР / МГИ АН Украины. - Севастополь, 1992. - 54 с.
 2. *Burenkov S.V., N.A. Dubrovsky, and Sabinin K.D.* Acoustic monitoring of the Black Sea. Problems of the Black Sea // Sevastopol, MHI UAS, 1992. - P.101-110.
 3. Проведение комплексных акустико-океанологических исследований Чёрного моря в интересах создания технологии, методов и средств акустической томографии : Отчет о НИР / МГИ НАН Украины. - Севастополь, 1994. - 87 с.
 4. Исследование акустических полей на стационарной трассе, разработка методик проведения экспериментальных работ и структурной схемы аппаратного комплекса обнаружения гидродинамических возмущений водной среды : Отчет о НИР / Инфратех. - Феодосия, 1994. - 99 с.
-

5. Kuryanov B.F., Morozov A.K.. Acoustic Tomography of Internal Waves Caused by Tides near Underwater Mount in Atlantic Ocean // Sympos. Computerized Tomography, 1996. - P. 27 - 34.
6. Dushaw B.D., Worcester P.F., Cornuelle B.D., and Howe B.M. Barotropic currents and vorticity in the central North Pacific Ocean during summer 1987 determined from long-range reciprocal acoustic transmissions // 1994. J. of Geophys. Res., v. 99, - P. 3263 - 3272.
7. Gaillard F. Evaluating the Information Content of Tomographic Data : Application to Mesoscale Observations // 1992. J. of Geophys. Res., v. 97, - P. 498 - 505.
8. Булгаков Н.П., Белокопытов В.Н., Ломакин П.Д. Сезонная изменчивость гидрологоакустических характеристик на шельфе Черного моря у южного побережья Крыма // Морской гидрофизический журнал. – 1996. - № 3. – С. 41 – 47.
9. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. - Киев : Наукова Думка, 1992. – 244 с.
10. Ivanov V.A., and Yankovsky A.E. Water Dynamics on the Crimean shelf in Summer. Problems of the Black Sea // Sevastopol, MHI UAS, 1992. - P. 136 - 149.
11. Oguz N., Latun V.S., Latif M.A., Vladimirov V.V., Sur H.I., Markov A.A., Ozsoy E., Kotovshchikov B.B., Ereemeev V.V. and Unluata U. Circulation in the surface and intermediate layers of the Black Sea // Deep-Sea Res., 1993. v. 40, No 8, - P. 1597 – 1612.

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ТЕХНИКА МАКСИМАЛЬНОЙ КРОСС-
КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ
ПОВЕРХНОСТНОЙ СКОРОСТИ В ОКЕАНЕ

Завьялов П.О., Григорьева Ю.В., Жмур В.В.

Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН

1. Введение

Известно, что будучи относительно технически сложными и дорогостоящими, прямые измерения скорости течений в океане до настоящего времени выполнены в несравнимо меньшем числе, чем, например, измерения термohалинных параметров. В связи с этим многие аспекты океанской циркуляции остаются мало изученными и особое значение приобретают методы дистанционного спутникового зондирования течений, которые могут дать большой объем информации о циркуляции на качественно новом уровне временного и пространственного разрешения. Наиболее мощным средством дистанционного зондирования скорости справедливо считается спутниковая альтиметрия, но существуют известные ограничения ее применимости.

Наиболее популярным из альтернативных методов является так называемая техника максимальной кросс-корреляции (далее МКК), появившаяся в середине 80-х годов ушедшего века [La Violette, 1984; Vastano and Reid, 1985; Emery et al., 1986; Kamachi, 1989; Tokmakian et al., 1990; Kelly and Strub, 1992; Afanasyev et al., 2001]. Этот метод основан на расчете полей адвективной

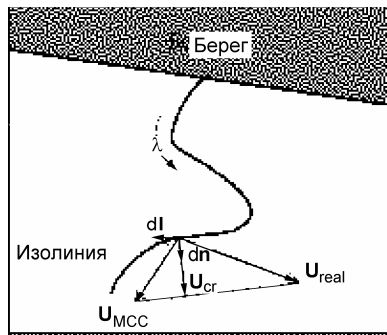


Рис. 1. Схема, поясняющая разложение векторов скорости на компоненты

определяется такое его положение на втором снимке, для которого пространственная структура внутри окна наиболее "похожа" на структуру в исходном окне на первом изображении. В качестве меры сходства обычно используется двумерный коэффициент кросс-корреляции между матрицами пикселей. Предполагается, что найденное таким образом смещение корреляционного окна соответствует физическому перемещению воды на поверхности моря. Векторы скорости рассчитываются соответственно.

Метод МКК зарекомендовал себя полезным инструментом исследования, но применение стандартной техники МКК часто приводит к малоудовлетворительным результатам. Так, в экспериментах [Kelly and Strub, 1992], рассчитанные этим методом векторы скорости оказывались заниженными по абсолютной величине на 30-60% по отношению к скорости, измеренной непосредственно с помощью дрейфтеров и акустических зондов. При этом среднеквадратичная ошибка определения направления составляла около 60 градусов. Поля скорости, полученные методом МКК, нередко содержат нереалистичные особенности и характеризуются слишком высокими для океана значениями горизонтальной дивергенции и завихренности. Для избавления от этих особенностей, обычно применяют разного рода фильтрацию полученных полей или вносят в алгоритм метода МКК специальные дополнительные ограничения. Оба этих подхода представляются нам несколько искусственными.

Существует целый ряд факторов, влияющих на результативность метода МКК. Здесь мы обсудим главное принципиальное ограничение эффективности техники МКК и предложим способ частичного устранения этого ограничения. С нашей точки зрения, традиционная версия метода в принципе неспособна правильно воспроизводить ту компоненту скорости, которая направлена вдоль изолинии величины, изображенной на спутниковом снимке (поскольку в большинстве случаев речь идет об инфракрасных снимках, по сути отображающих распределение температуры поверхности моря, далее в статье мы будем для простоты называть эти изолинии изотермами). В самом деле, любое достаточно малое смещение вдоль изотерм (или любое продольное смещение достаточно "длинной" особенности), по существу, переводит изображение в самое себя.

Поэтому стандартный алгоритм МКК даст в этом направлении нулевую скорость, что не соответствует действительности (возможно, с этим и связана упомянутая выше склонность техники МКК к занижению значений полной скорости). В реальной ситуации смещения не являются бесконечно малыми, а особенности бесконечно длинными, и поэтому рассчитанные значения продольных (по отношению к изотермам) компонент скорости могут обладать той или иной степенью достоверности, в зависимости от структуры конкретных изображений и размеров использованного корреляционного окна. Однако эти компоненты неизбежно содержат ошибку.

В связи с этим предлагается использовать только те компоненты скоростей, полученных обычным методом МКК, которые локально перпендикулярны изотермам. Продольные компоненты полной скорости рассчитывать исходя из требования горизонтальной неразрывности и граничных условий (рис. 1). Теоретические аспекты такой задачи рассмотрены во втором разделе работы. В третьем разделе приведены примеры применения модифицированного метода МКК к юго-западной части Атлантического океана и Черному морю, которые обсуждаются в контексте результатов прямых измерений и дрейфтерных наблюдений.

2. Метод

На начальном этапе расчета, применяя стандартную технику МКК, каждой точке сетки сопоставляется вектор скорости \vec{U}_{MCC} (см. рис. 1) и для каждой точки рассчитывается вектор градиента величины, изображенной на спутниковом снимке (в данном случае - градиент яркостной температуры ∇T). Затем производится декомпозиция \vec{U}_{MCC} на компоненты, соответственно параллельную и перпендикулярную ∇T . В дальнейшем во внимание принимается только компонента

$$\vec{U}_{cr}(x, y) = (\vec{U}_{MCC} \cdot \nabla T) \frac{\nabla T}{|\nabla T|^2},$$

параллельная градиенту температуры (то есть нормальная по отношению к изотермам). Поле же компонент $\vec{U}_{al}(x, y)$, перпендикулярных градиенту (то есть направленных вдоль изотерм) рассчитывается затем по уже известному полю $\vec{U}_{cr}(x, y)$ из двумерного уравнения неразрывности и граничных условий:

$$\text{div}(\vec{U}_{cr} + \vec{U}_{al}) = 0, \quad (1)$$

$$\vec{U}_{cr} \cdot \vec{U}_{al} = 0, \quad (2)$$

$$(\vec{U}_{cr} + \vec{U}_{al})|_s = 0, \quad (3)$$

где символ $|_s$ означает "на линии берега". Второе уравнение выражает ортогональность полей $\vec{U}_{cr}(x, y)$ и $\vec{U}_{al}(x, y)$. Введем единичное векторное поле

$\vec{n}(x, y) = (n_x, n_y)$ ($n_x^2 + n_y^2 = 1$), скалярное поле $\rho(x, y)$ такие, что $\vec{U}_{al}(x, y) = \rho(x, y)\vec{n}(x, y)$ и обозначение $f = -div(\vec{U}_{cr})$.

Заметим, что поле $\vec{n}(x, y)$ вполне определено условием (2). Тогда уравнение (1) можно переписать в виде

$$\vec{n} \cdot grad\rho + D\rho = f, \quad (4)$$

где введено обозначение $D = div\vec{n}$. Удобно последнее уравнение рассмотреть в криволинейных координатах (λ, μ) , связанных с системой изотерм: координата λ отсчитывается вдоль изотермы (см. Рис. 1), а координата μ - в поперечном изотерме направлении. В этих координатах уравнение (4) принимает простой вид

$$\frac{\partial\rho(\lambda, \mu)}{\partial\lambda} + D(\lambda, \mu)\rho(\lambda, \mu) = f(\lambda, \mu), \quad (5)$$

становясь обыкновенным (неоднородным) дифференциальным уравнением по λ . Решение этого уравнения методом вариации постоянных приводит к выражению

$$\rho(\lambda, \mu) = e^{-\int_0^\lambda D(\lambda, \mu)d\lambda} \left[\int_0^\lambda d\xi f(\xi) \exp\left(\int_0^\xi d\alpha D(\alpha, \mu)\right) + C(\mu) \right]. \quad (6)$$

Неопределенное слагаемое C , зависящее только от μ , вдоль каждой изотермы является постоянным и имеет смысл $\rho(0, \mu)$. На тех изотермах, которые пересекаются с берегом, эта константа полностью определена граничным условием (3). Но на изотермах, не имеющих пересечения с берегом, решение найдено быть не может, если только в некоторой точке изотермы значение скорости не задано априори, исходя из каких-либо дополнительных соображений.

Задача (1)-(3) может решаться разностными методами, что и делалось в работе [Zavialov et al., 1998]. Здесь же мы предложим более удобный способ ее решения. Полную двумерную функцию тока Ψ можно вычислить следующим образом (см. рис.1):

$$\begin{aligned} \Psi(x, y) &= \Psi(x_0, y_0) + \int -Udy + Vdx = \Psi(x_0, y_0) + \int \vec{U}d\vec{n} = \\ &= \Psi(x_0, y_0) + \int U_{cr}dl. \end{aligned}$$

где интегрирование ведется вдоль изолинии, а $d\vec{n} = (-dy, dx)$. Или, в вышеупомянутых криволинейных координатах:

$$\Psi(\lambda, \mu) = \int_0^\lambda U_{cr}(\tilde{\lambda}, \mu)d\tilde{\lambda} \quad (7)$$

(аналогично ее определению в «обычных» декартовых координатах). Следовательно, получив поле U_{cr} непосредственно из применения метода МКК, мы можем немедленно построить полную функцию тока численным интегрированием

U_{cr} вдоль изотерм, начиная интегрировать от берега, где значения Ψ полагаются равными нулю. При этом решается автоматически вопрос о достаточности граничных условий, приводящий к значительным сложностям при использовании разностного метода. Этим способом удается найти значения Ψ лишь в тех точках, через которые проходят изотермы, пересекающиеся с берегом. В других точках решение для функции тока остается неопределенным. Такие области можно затем заполнить с помощью какой-либо интерполяции или так и оставить «пустыми». После того, как рассчитано поле $\Psi(x,y)$, векторы скорости легко вычисляются обычным образом:

$$u = -\frac{\partial \Psi}{\partial y}, \quad v = \frac{\partial \Psi}{\partial x},$$

где u и v - зональная и меридианальная компоненты скорости, соответственно.

3. Примеры применения метода

Как ясно из вышесказанного, для применения метода необходимы граничные условия, то есть на используемом изображении должен присутствовать берег. Мы применили модифицированную технику МКК к спутниковым изображениям северной части Черного моря и прибрежному району юго-восточной части Атлантического океана.

Обрабатывались пары инфракрасных снимков 4-го канала радиометра AVHRR на спутниках NOAA. Пространственное разрешение этих снимков составляет 1.1 км. Во всех случаях использовалось квадратное корреляционное окно шириной 21 пиксел, или около 23 км. Таким образом, могут быть разрешены детали циркуляции с пространственным масштабом не менее 30-40 километров. На первом этапе расчетов применялся традиционный метод МКК (для минимально допустимого коэффициента кросс-корреляции было принято значение 0,6), и из полученного поля скоростей выделялось поле \vec{U}_{cr} . Затем спутниковое изображение (первое или второе в паре, в зависимости от того, в каком из них отмечалось меньшее содержание облаков) фильтровалось с помощью скользящего окна шириной также 21 пиксел. На основе сглаженного таким образом изображения строилась система изотерм, для чего применялась схема объективной интерполяции [Levy and Brown, 1986]. Интервал проведения изотерм выбирался субъективно для каждого случая с таким расчетом, чтобы характерное расстояние между ближайшими изотермами было примерно равным ширине корреляционного окна. Выделялись те изотермы, которые пересекаются с берегом и выполнялось численное интегрирование U_{cr} вдоль этих изотерм на сетке с шагом 20 пикселов. Полученная таким образом функция тока затем сглаживалась с помощью прямоугольного фильтра с весами, обратно пропорциональными расстоянию.

Применение к Черному морю

Примеры результатов применения этой техники к Черному морю показаны на рис. 2 и 3. На рис. 2 представлено поле скорости и линии тока для всей восточной части моря, построенные с помощью модифицированной техники МКК по паре спутниковых изображений, соответствующих 4 и 5 октября 2000

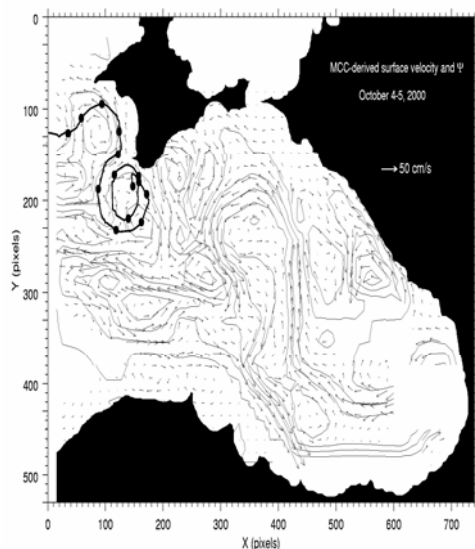


Рис. 2. Поле поверхностных скоростей и линии тока, рассчитанные для восточной части Черного моря по спутниковым изображениям от 4 и 5 октября 2000г. Толстой кривой показана траектория дрейфера

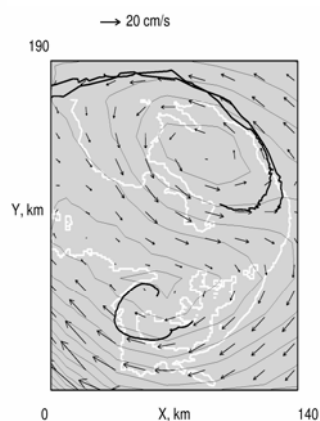


Рис. 3. Поле поверхностных скоростей и линии тока, рассчитанные по спутниковым изображениям от 27 сентября 1999г. для участка северо-восточной области Черного моря. Толстой линией показан контур наблюдавшейся «грибовидной» структуры

года. На этом же рисунке толстой кривой показана траектория одного из дрейферов, наблюдения за которым велись в рамках экспедиции «Черное море – 2000». Сравнивая траекторию дрейфера и построенные линии тока, следует помнить, что для расчета поля скорости методом МКК использованы спутниковые данные одних конкретных суток, в то время как показанное движение дрейфера относится к значительно большему промежутку времени (13 суток) – поэтому точного совпадения ожидать не следует. Однако видно, что траектория дрейфера неплохо соответствует рассчитанной циркуляции, включающей большой антициклонический вихрь южнее южной оконечности Крыма и циклонический вихрь северо-западнее его. Эти вихри, также как и другие структуры, показанные на рисунке, отчетливо видны в полях яркостной температуры на использованных спутниковых изображениях (из-за ограничений объема статьи они здесь не приводятся). Общая структура циркуляции, рассчитанной по методу МКК, в целом соответствует принятым представлениям. В то же время нужно отметить, что Основное Черноморское течение (особенно в северной части мо-

ря) выглядит здесь не как выраженное непрерывное течение, а скорее как система вихрей и больших меандров со средним переносом в «правильном» направлении.

На рис. 3 показано поле скорости, построенное методом МКК в районе «грибовидной» структуры, изученной в ходе экспедиции «Черное море – 1999». Характер рассчитанной циркуляции в диполе в целом соответствует результатам дрейферных наблюдений и гидрологической съемки.

Применение к юго-западной части Атлантического океана

На рис. 4 и 5 приведены примеры применения техники к части океана, примыкающей к побережью Уругвая и южной Бразилии. Известно, что в прибрежной части этого района обычно преобладает течение, направленное на север, но при сильных северных ветрах направление потока может изменяться на южное. В марте-августе 1997 года на буйковой шельфовой станции (на рисунке ее расположение показано кружком) были выполнены прямые измерения скорости. На первом примере поток, направленный на север, сопровождается системой из четырех вихрей на шельфе. Буйковая станция оказалась на северной границе циклонического вихря диаметром около 50 км. Второй пример

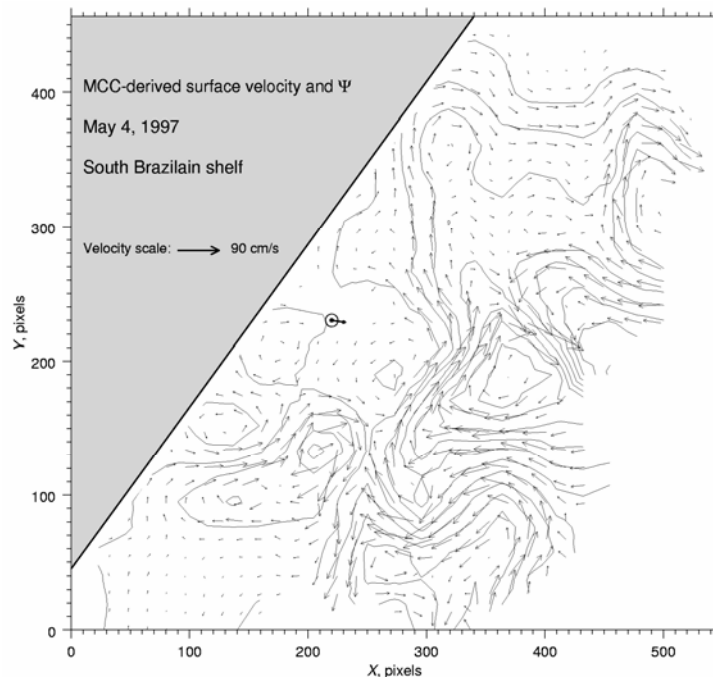


Рис. 4. Поле поверхностных скоростей и линии тока, рассчитанные по спутниковым изображениям 4 мая 1997г. для юго-западного района Атлантического океана. Кружком отмечено место расположения буйковой станции

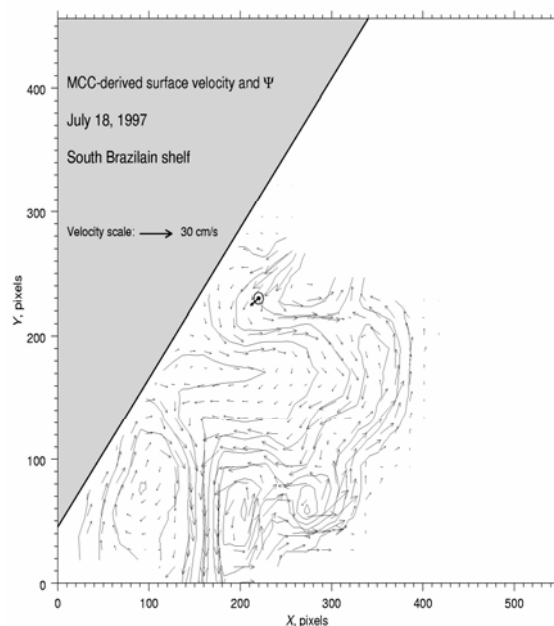


Рис.5. Поле поверхностных скоростей и линии тока, рассчитанные по спутниковым изображениям 18 июля 1997г. для юго-западного района Атлантического океана. Крестиком отмечено место расположения буйковой станции

соответствует условиям сильного северного ветра (область, оставленная белой на рисунке, была покрыта облаками). Среднее течение довольно умеренное и направлено на юг, с большим циклоническим вихрем в южной части шельфа. Соответствие полученных и измеренных скоростей достаточно хорошее.

Сравнение измеренных и посчитанных скоростей для всех примеров приведено в таблице 1.

Таблица 1

Пример	Расчетная скорость, см/с	Реальная скорость, см/с	Расчетное направление, °	Реальное направление, °
Черное море	12	14	44	66
Черное море	15	18	98	103
Черное море	12	9	87	21
Черное море	14	8	235	224
Шельф Бразилии	16	31	148	107
Шельф Бразилии	13	8	225	227

Во всех случаях измеренные скорости были усреднены по временному интервалу, разделяющему изображения. Рассчитанная скорость относится к узлам сетки, ближайшим к точкам прямых измерений. Как видно, что ошибка абсолютной скорости изменяется от 2 до 15 см/с (в среднем 5,6 см/с), а направления от 2° до 66° (в среднем 24,5°).

4. Выводы

Предложена существенная модификация метода МКК, заключающаяся в игнорировании компоненты скорости вдоль изолиний, и восстановлении поля скоростей из требования неразрывности, дополненного граничными условиями. Кроме того, предложен простой способ численного решения этой задачи, основанный на двумерной функции тока, рассчитанной интегрированием компоненты скорости, перпендикулярной изолиниям изображения.

С нашей точки зрения предложенный подход позволяет повысить эффективность и достоверность обычного метода МКК. Конечно, приведенные примеры являются лишь иллюстрацией возможностей модифицированной техники МКК. Систематическая валидация этого метода с помощью натуральных данных и его более широкое применение являются предметом дальнейшей работы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 99-05-65528, 00-05-64966 и 01-05-99452). Мы благодарны А.Г. Зацепину за предоставленные данные экспериментов «Черное море 1999» и «Черное море 2000».

Литература

1. *Afanasyev Ya.D., Kostianoy A.G., Zatsepin A.G., Poulain P.-M.* Analysis of velocity field in the Eastern Black Sea from satellite data during the "Black Sea – 99" experiment. *J. Geophys. Res.*, 2001 (in press).
2. *Emery W.J., Thomas A.C., and Kollins M.J.* An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images. *J. Geophys. Res.* 1986., **91**, 12865-12878.
3. *Kamachi M.* Advective surface velocities derived from sequential images for rotational flow field: limitations and applications of maximum cross correlation method with rotational registration. *J. Geophys. Res.* 1989, **94**, 18227-18233.
4. *Kelly K.A., and Strub P.T.* Comparison of velocity estimates from Advanced Very High Resolution radiometer in the coastal transition zone. *J. Geophys. Res.* 1992, **97**, 9653-9668.
5. *La Violette P.E.* The advection of submesoscale thermal features in the Alboran sea Gyre. *J. Phys.Oceanogr.* 1984, **14**, 450-505.
6. *Levy G., and Brown R.A.* A simple objective analysis scheme for scatterometer data. *J. Geophys. Res.* 1986, **91**, 5153-5158.
7. *Vastano A.C. and Reid R.O.* Sea surface topography estimation with infrared satellite imagery. *J. Atmos. Technol.* 1985, **2**, 393-400.
8. *Zavialov P.O., Ghisolfi R.D., and Garcia C.A.E.* An inverse model for seasonal circulation over the Southern Brazilian shelf: Near-surface velocity from the heat budget. *J. Phys. Oceanogr.* 1998, **28**, 545-561.

ЭКСПРЕСС-МОНИТОРИНГ МОРСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР В
ЦЕЛЯХ ПРОГНОЗА МИГРАЦИЙ МОРСКОЙ БИОТЫ

Васильев А.С.

*Государственный океанографический институт ФС России
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Москва*

В математическом моделировании морских экологических систем одной из основных проблем является реконструкция основных физических полей (течений, температуры, солёности, плотности) в режиме непрерывного наблюдения за происходящими процессами, математические модели диагноза состояния среды с помощью непрерывного мониторинга должны отвечать следующим требованиям: быстрая реализация на компьютерах небольшой мощности; необходимость учета орографии и топографии региона, водообмена в проливах и через «жидкие границы», сток рек. Эффективное испарение с поверхности моря, возможность использования данных спутникового зондирования поверхности океана и данных стандартного гидрометеорологического мониторинга.

В данной работе рассматривается математическая модель, позволяющая решать поставленную проблему. Для этого используются принципы автомодельности второго рода. Этот термин предложен российскими учеными Зельдовичем и Баренблаттом [1] и предполагает использование некоторого класса функций, которые дают возможность разделить переменные по пространственным координатам в зависимости от функций автомодельности, к вычислению которых сводится задача расчета пространственно-временного распределения физических параметров системы.

Важнейшими функциями в океанологии, обладающими природной автомодельностью (подобием вертикального распределения) являются плотность и температура воды.

Плотность, например, для достаточно больших акваторий океана может быть описана моделью, определяемой по данным прямых наблюдений в океане на какой-либо характерной для рассматриваемого региона станции и некоторых функций автомодельности, определяемых из граничной задачи [2, 3].

$$\rho(x, y, z, t) = \xi(x, y, t) [\sigma(z, t) + \alpha_1 a(x, y, t)(z - h_k^D) + \alpha_2 (z - h_k^a)] c(t) + p^o(x, y, t) \quad (1)$$

где $\rho(x, y, z, t)$ — неизвестная плотность морской воды;

$\xi(x, y, t)$ — функция автомодельности, подлежащая определению в граничной задаче;

$\sigma(z, t)$ — функция стратификации, определяемая по данным наблюдений

$a(x, y, t)$ — демпферная функция, регулирующая нулевой поток массы через дно;

$p^o(x, y, t)$ — заданная на поверхности моря плотность морской воды (с использованием спутниковой информации).

h_k^D, h_k^a — глубина придонного и глубинного слоев трения Экмана;

α_1, α_2 — символы Кронекера;

Используя уравнения движения, записанные в форме Экмана при линеаризованном горизонтальном обмене, неразрывности, гидростатики и модель плотности (1), решение для скоростей течений ищем в следующем виде:

$$\vec{U} = \sum_{i=1}^{i=k} \vec{B}_i \vec{F}_i \quad (2)$$

где \vec{U} — вектор горизонтальной составляющей скорости течения; \vec{B}_i , — квадратные матрицы; F_i — внешние параметры задачи (тангенциальное напряжение ветра, градиенты функции автомодельности и другие).

Интегрируя уравнения движения по вертикальной координате при условиях, что на поверхности моря известно тангенциальное напряжение ветра, а на дне выполняется условие прилипания и удовлетворяя уравнению неразрывности получим следующее дифференциальное уравнение

$$-\frac{\partial \Psi}{\partial v} + \Delta \Psi + b_{N_1}^x \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + b_{N_1}^y \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \theta \frac{\partial \Psi}{\partial y} = \vec{F}(\vec{T}, \rho^o), \quad (3)$$

где v — параметр релаксации; Ψ — интегральная функция тока.

Уравнение (3) решается методом минимальных невязок путем релаксации, расщепления и прогонки [4].

После решения этого уравнения определяются градиенты функции автомодельности $\xi(x, y, t)$, по явным формулам сама функция автомодельности и по формуле (1) — распределение плотности. Скорости течения рассчитываются по формуле (2). При необходимости расчета таких характеристик как температура, соленость, кислород, биогенные элементы и другие примеси и растворенные вещества можно дополнительно к уравнению (3) сконструировать уравнения для функций автомодельности упомянутых параметров.

Рассматриваемая здесь модель реконструкции сценариев состояния морской среды служит для создания информационной базы, необходимой для обучения модели на распознавание классов поведения прогнозируемого объекта (физические параметры среды, морская биота, тайфуны, климатические параметры и т.д.).

В моделях более высокого уровня, использующихся для реконструкции сценариев состояния среды, в последнее время применяется параметризация с двумя функциями автомодельности, позволяющая свести рассматриваемую задачу о реконструкции основных физических полей в четырехмерном пространстве к двум интегральным уравнениям второго порядка в частных производных: интегральной функции тока и глубине верхнего квазигомогенного слоя. После решения этих уравнений определяются функции автомодельности, по известным функциям автомодельности — пространственное распределение течений, температуры, солености и плотности с помощью явных формул.

Аналогичный подход можно использовать для расчета газов, биогенных элементов и других консервативных (в смысле активного движения) субстанций морской среды. В результате работы описанного блока экспресс-мониторинга морской среды создаются сценарии ее состояния в виде проблемно-ориентированной на прогноз явлений живой и неживой природы океана геоинформационной системы (ГИС).

Рассмотрим интерактивные системы обработки информации, полученной с различных наблюдательных платформ с использованием гидродинамических моделей, описанных выше.

В Государственном океанографическом институте Росгидромета созданы Адаптивные технологии океанографического мониторинга (АТОМ), реализующие рассмотренные принципы построения морских измерительно-информационных систем [5] в рамках адаптивно-обучающихся прогностических компьютерных технологий мониторинга состояния и фазовых изменений классов морских и океанических процессов (АОАСП) [3].

Технологии позволяют с помощью эколого-математического моделирования, стандартного гидрометеорологического мониторинга Всемирной службы погоды и спутниковой информации по температуре поверхности морского океанического региона в режиме диалога пользователя с ЭВМ синтезировать состояние морской среды от поверхности до дна по термохалинным, гидродинамическим и другим параметрам моря и атмосферы, изучать внутренние связи в морской экосистеме (в том числе и по биологической составляющей), формировать прогностическое правило и осуществлять прогноз состояния различных компонентов морской экосистемы, относящихся как к живой, так и неживой природе.

Интерактивные системы обработки информации предполагают формирование полей входных данных (мониторинг) и синтезируют проблемно-ориентированные банки океанографических полей (томография) представленных в таблице 1.

Таблица 1

ИНТЕРАКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧЕННОЙ С РАЗЛИЧНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ

МОНИТОРИНГ (Входные данные)

- | | |
|-----------------------------------|---|
| • Орография | • Ветер |
| • Топография и батиметрия | • Потоки тепла |
| • Расчетная сетка | • Осадки |
| • Температура воды на поверхности | • Испарение |
| • Соленость на поверхности | • Материковый сток (реки) |
| • Атмосферное давление | • Интегральный водообмен через проливы |
| • Температура воздуха | • Функция стратификации плотности и температуры по месяцам года |
| • Влажность воздуха | • Ледовые условия |
| • Облачность (общая) | |
| • Облачность (нижняя) | |

ТОМОГРАФИЯ (Выходные данные) — составляющие скорости ветра

- 1 TX } - составляющие скорости поверхностных течений
 2 TU }
- 3 WX } - составляющие скорости поверхностных течений
 4 WU }
- 5 AZ - коэффициент вертикального обмена количеством движения
 6 WYT - вертикальная составляющая скорости течения на границе однородного слоя
 7 HSS - глубина однородного слоя8 SHP - завихренность ветра
 9 WXY - якобиан

- 10 TXY - оператор Лапласа
11 UX - теплосодержание однородного слоя
12 UY - среднее тангенциальное напряжение ветра на водной поверхности
13 TXT } - градиенты функции влияния
14 TYT }
15 AZT - кислород на поверхности
16 WHT - модуль придонного трения
17 HSS - функция тока на поверхности
18 UX } - составляющие полного потока в слое 0-дно
19 UY }
20 $TXYT$ } составляющие полного потока в слое 0-200 м
21 $WXYT$ }
22 WXT - интегральная функция тока до дна
23 WYT - функция тока до 200 м
24 SHP - плотность на поверхности
Всего - 72 фактора (с учетом div , $\partial F / \partial t$, rot , grad).

АОАСП является человеко-машинной системой и функционирует в диалоговом режиме. Прогностическое (решающее) правило формируется ЭВМ на основе обучающего правила (марковского прогностического функционала). Это обучающая система с учителем. В качестве учителя выступает прогнозист-пользователь системы (морской биолог, океанолог, гидролог суши, специалист по освоению шельфа и т.д.). Схема АТОМ представлена на рис.1 для Баренцева моря.

Системные модели основаны на принципах перцепции - машинном восприятии размытых образов состояния сложной системы «морская среда - предикант», обучении на распознавание переходов в состоянии этой системы и прогнозе ее возможных состояний в будущем.

Комплексный мониторинг служит для создания проблемно-ориентированных компьютерных баз данных, необходимых для построения прогностических схем основных физических полей и биоты на основе Марковского прогностического функционала.

Фрагмент странички проблемно-ориентированной базы данных по Баренцеву морю представлен на рис.2.

В момент гибели АПЛ «Курск», АТОМ была применена для расчета термохалинного и ледового режима и режима течений при пентадном осреднении полей для сентября, октября, ноября и декабря 2000 г.

Расчеты проводились для всего Баренцева моря. Район гибели АПЛ «Курск» по имеющейся информации анализировался более тщательно, чем остальные районы. Для примера на рис.2 (внизу) представлены изотахи зональной и меридиональной составляющих скорости течения на разрезах, пересекающихся в точке гибели АПЛ.

К классам прогнозируемых явлений могут быть отнесены как физические, так и биологические компоненты морской экологической системы и атмосферные характеристики.

Рассмотрим обучающиеся системы, т.е. системы, способные во время работы улучшать свои свойства так, чтобы наилучшим образом решать поставленные перед ними задачи распознавания и прогнозирования.

Марковское прогностическое правило запишем в следующем виде:

$$\vec{P}(t + \Delta t) = \text{MAX}_{n \in L} \left[\sum_{k=1}^{k=n} \tilde{\mu}^k \vec{F}^k(t) \times \vec{P}(t) \right],$$

где $\vec{P}(t + \Delta t)$ — вектор состояния прогнозируемого фактора через момент времени Δt , Δt — заблаговременность прогноза, — вектор начального состояния прогнозируемого фактора; $\tilde{\mu}^k$ — матрица переходных вероятностей, обусловленная K -м возмущающим вектором $\vec{F}^k(t)$, n — количество информативных возмущающих факторов (биотических и абиотических) из общего числа рассматриваемых факторов L .

Таким образом, учитывая соотношение (4), основная прогностическая концепция формулируется следующим образом:

«По многомерному вектору состояния сложной системы в трехмерной области определения на момент составления прогноза t определить интервал времени появления и класс состояния прогнозируемого фактора (ПФ) с заданной заблаговременностью Δt ».

В соответствии с этим определением будем рассматривать два типа прогнозов.

— прогноз состояний, характеризующийся плотностью распределения популяций рыб, беспозвоночных или других (в том числе абиотических)

— прогноз времени фазовых переходов морской биоты, который трактуется, как скачкообразное изменение физиологических свойств морской биоты при непрерывном изменении внешних параметров.

По аналогии с физическим определением точки фазового перехода, сопровождающегося определенными параметрами внешней среды, определяется точка (время) фазового перехода в физиологическом состоянии биообъекта и связанного с ним процесса миграций.

Отметим, что второй тип прогнозов может быть использован для прогноза времени наступления особо опасных явлений природы (тайфуны, цунами и т.п.).

При рассмотрении марковских процессов возникает несколько требований, которые необходимо решить, чтобы обеспечить успешность практической прогностики при этом подходе:

1. Создать банк статистик сценариев состояния, мороккой экологической системы и провести классификацию возмущающих факторов в зависимости от классов прогнозируемого фактора.

2. Определить границы стационарности процесса (В конкретных приложениях, рассматриваемых далее и связанных с прогнозом состояния ихтиоценоза — время стационарности его физиологического состояния связанных с нагулом, нерестом, зимовкой).

3. Определить границы существования марковского свойства, в котором условное распределение вероятностей для действительного случайного процесса

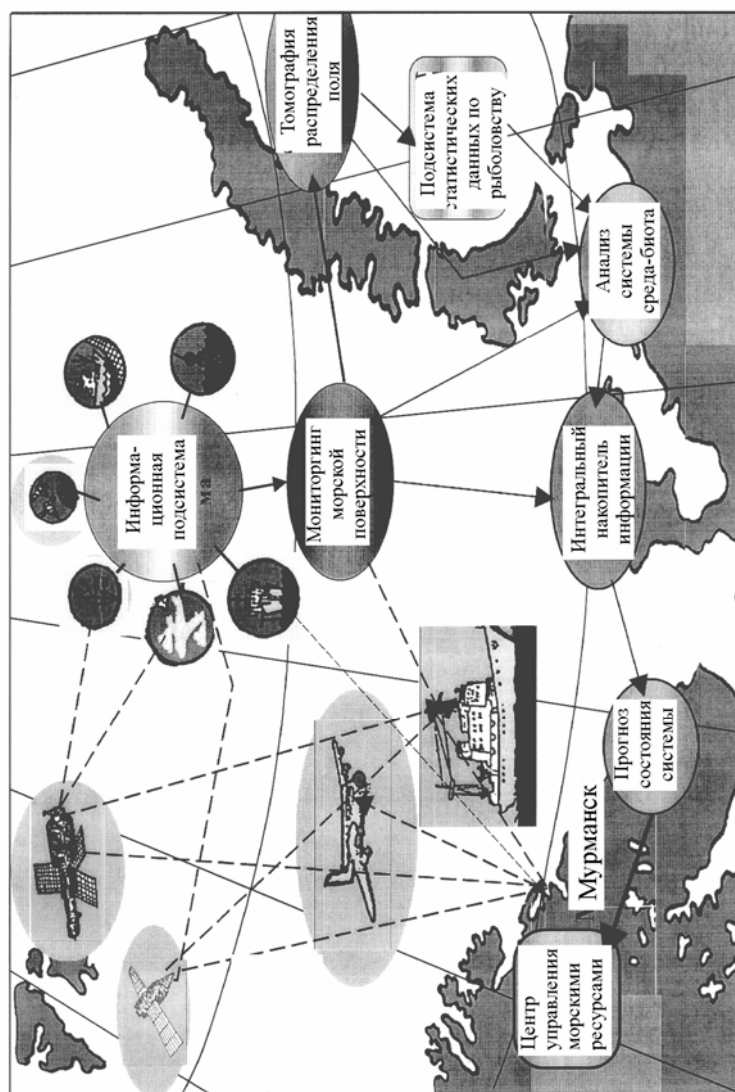


Рис. 1. Схема обработки информации, полученной с различных наблюдательных платформ, в интерактивном режиме

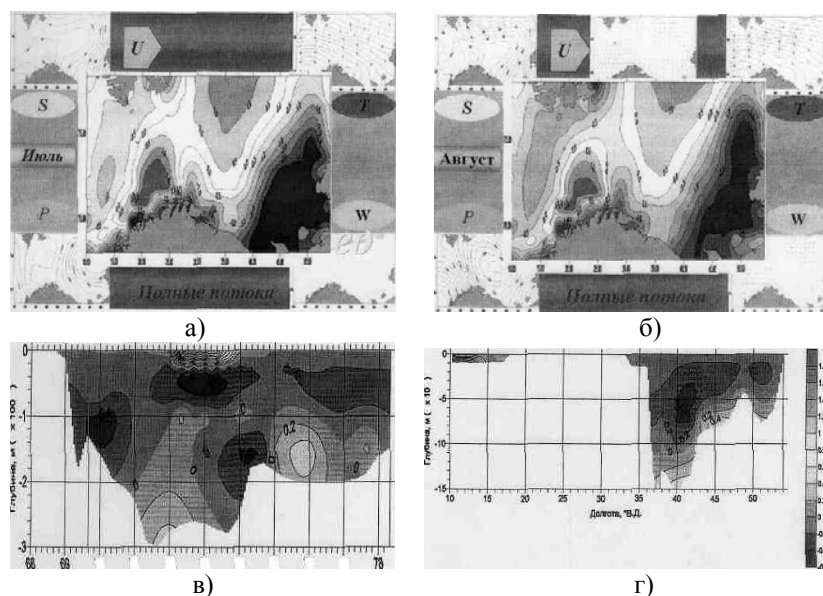


Рис. 2. Сборные листы карт основных физических полей Баренцева моря (а, б), изотахи зональной (в) и меридиональной (г) составляющей течения

$X(t_{n+1})$ относительно величин $X(t_1), \dots, X(t_n)$ совпадает (почти, наверное) с условным распределением $X(t_{n+1})$ относительно $X(t_n)$

$$P\{X(t_{n+1}) \in B \mid X(t_n), \dots, X(t_1)\} \cong P\{X(t_{n+1}) \mid X(t_n)\}, \quad (5)$$

4. Решить вопросы точности диагностики предикторов и найти способ их классификации по ретроспективной информации, находящейся в проблемно-ориентированных архивах (банках) информации.

5. Из всей априорной информации, подаваемой на вход прогностической системы выделить информативные возмущающие факторы, т.е. факторы, влияющие на процесс.

6. На основе обучающего правила (4) построить на ЭВМ в режиме диалога с пользователем решающее (прогностическое) правило и использовать его в дальнейшем для прогноза.

Автором в течение ряда лет, учитывая рассмотренные принципы, создавалась адаптивно-обучающаяся компьютерная технология прогноза состояний и фазовых переходов морской биоты для произвольно-выбираемого пользователем (биологом, океанологом) морского или океанического региона и объекта прогнозирования (в том числе физических и химических параметров) [6, 7].

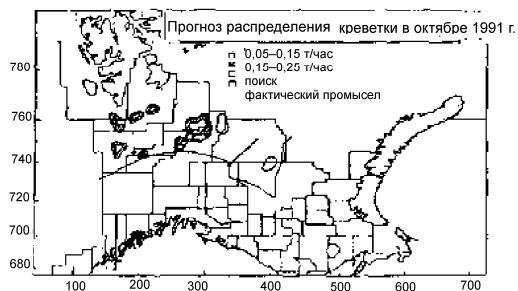
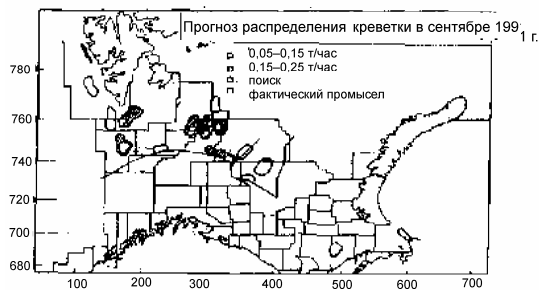
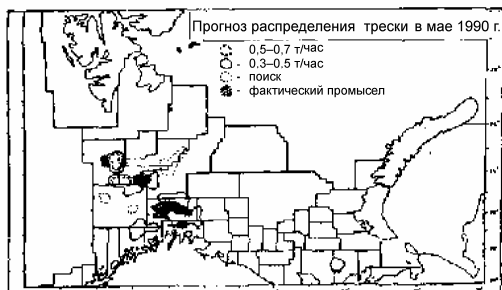
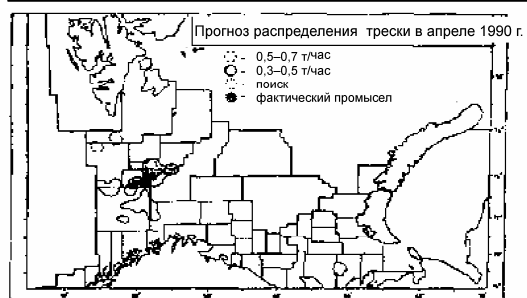


Рис. 3. Прогностические планшеты

Программное обеспечение адаптивно-обучающихся систем прогнозирования (АОАСП) выполнено для персональных компьютеров РС-АТ с использованием языков Турбо-Паскаль и Турбо-Си.

Внедрение разработанных систем осуществлялось на различных морских объектах непосредственно пользователями, которые после месячной стажировки с успехом осваивали методологию прогнозирования и использовали ее в своей практической деятельности.

АОАСП использовались на промысле хамсы и тюльки в Черном и Азовском морях, кильки в Каспийском море, трески, мойвы и креветки в Баренцевом море, путассу в Норвежском море, окуня клявача в море Ирмингера, ставриды в Перуанском, сайры и сардины-иваси в Курильском районах Тихого океана. Во всех случаях достоверность прогноза составляла не ниже 80% и монотонно увеличивалась при эксплуатации системы до 90-95%. Примеры прогностических планшетов, реализованных в Полярном институте рыбного хозяйства и океанографии с заблаговременностью в 1 месяц для трески и креветки представлены на рис. 3.

В упомянутых работах представлены результаты прогностической практики в применении к морским и океаническим ихтиоценозам и беспозвоночным.

В качестве примера использования АОАСП для прогноза физических параметров приведем результаты прогноза положения температурного фронта в Северной Пацифике, характеризующегося классом температур 7-9 °С. (рис. 4).

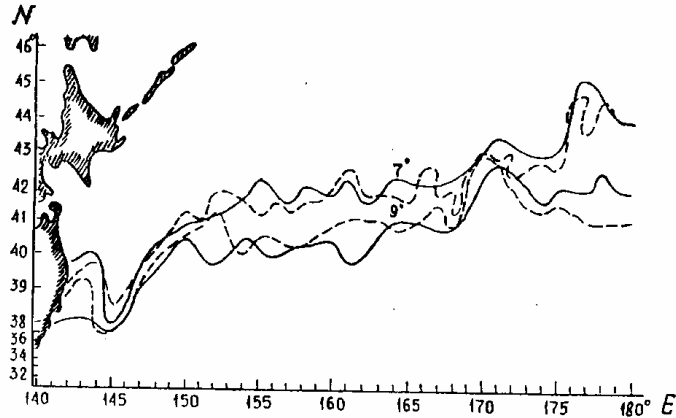


Рис. 4. Результаты декадного прогноза температурного фронта в Северной Пацифике (первая декада, март- 1989г.): ---.-прогноз, _____ фактически

На этом рисунке видно, что основные особенности температурного фронта в северной части Тихого океана, ограниченного изотермами 7-9 °С довольно хорошо предсказываются моделью.

Основной вывод данной работы заключается в том, что для принятой прогностической концепции (Марковский прогностический функционал) построена и испытана на различных объектах развивающаяся компьютерная технология. Информация для адаптации и обучения этой системы, помимо наблюдений, может быть синтезирована, также с помощью гидродинамических моделей.

Литература

1. Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика//Л., Гидрометиздат, 1982, 255 с.
2. Васильев А.С. Автомодельность второго рода в мониторинге основных физических полей океана//ДАН, 1993, т.328, «5, с. 613-618.
3. Васильев А.С. Адаптивно-обучающаяся система в проблемах комплексного мониторинга океана и прогноза эволюции морских экосистем//Вестник ДВО РАН, 1997,4,с.42-50.
4. Марчук Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана на основе методарасщепления//Л., Гидрометеиздат, 1974, 303 с.
5. Васильев А.С. Основы прикладной экологии океанам/Владивосток, ДальНаука, 1992,281с.
6. Васильев А.С. Обучающиеся модели биофизических систем моря//Препринт, Севастополь, МГИ АН УССР, 51 с.
7. Васильев А.С. Теоретические основы моделирования морской экологической системы Каспия//Деп.ВИНИТИ, №3239-ВОО, 2000, 41с.

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА, СОСТОЯНИЯ ВОДОЕМОВ И ВОДОСБОРОВ

Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Сало Ю.А.

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск

Введение

Основная цель работы оценить изменения климата в регионе, который включает водосборы Белого и Балтийского морей, крупнейшие озера Европы - Ладожское и Онежское, Выг, Имандра (рис. 1). Важно определить возможные естественные природные и обусловленные антропогенными (техногенными) факторами изменения и выявить реакцию водных систем на изменения климата. Имеются данные, свидетельствующие о прогрессирующем парниковом эффекте и потеплении климата из-за антропогенных факторов в высоких широтах в ближайшие 50 лет на 1-3 °С (The Global Climate..., 1995; Climate of Europe, 1995; Винников, 1986).. Существуют и противоположные оценки о том, что эти изменения обусловлены природными особенностями (Борисенков, 1988; Кондратьев, 1999; Адаменко, Кондратьев, 1999). В связи с этим актуальной является задача продолжить исследования изменчивости и изменений регионального климата и реакции водных систем как по данным наблюдений, так и моделирования.

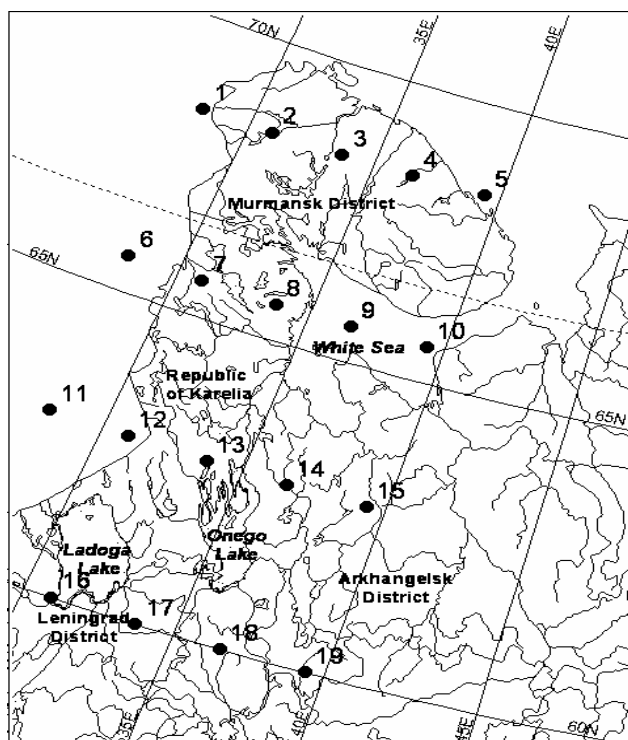


Рис. 1. Район исследований и расположение расчетных узлов модели ЕСНАМ-4 в пределах исследуемой территории

Анализ данных гидрометеорологических наблюдений

Для оценки изменчивости климата и элементов водного баланса (ЭВБ), колебаний уровня озер как интегрального показателя изменений климата были собраны данные многолетних инструментальных наблюдений температуры воздуха, осадков, испарения, стока рек, продолжительности солнечного сияния (ПСС), о ледоставе, уровне озер и других параметров за период 1880-1999 гг. на станциях и постах Федеральной службы Российской Федерации по гидрометеорологии и мониторингу природной среды

Анализ основных тенденций в долгосрочных климатических и гидрологических временных рядах по северо-западной части России начиная с 1880 по 1999 гг. выявил наличие положительных линейных трендов годовых температур воздуха (Т), осадков (Р), общего испарения (Е) и речного стока для всех крупных (более нескольких тысяч квадратных километров) водосборов. В исследу-

дуюмом регионе, так же, как и по всему северо-западу России, с конца 1970-х гг. были отмечены высокие годовые суммы осадков и увеличение уровня воды в озерах. Заметные климатические изменения в регионе в эти годы проявились также в уменьшении продолжительности периода с устойчивым снежным покровом и увеличении безледного периода на озерах и уменьшение ПСС.

Взаимный корреляционный анализ полученных гидрометеорологических рядов выявил высокую корреляцию между основными элементами климата и водного баланса. Сравнительный анализ показывает, что на севере исследуемого района потепление более заметно. Например, за период 1880-1999 гг. в Мурманске (69° с.ш.) линейный тренд годовой температуры воздуха равен $+0,8^{\circ}\text{C}/100$ лет, в то время как в Петрозаводске (62° с.ш.) за этот же период – только $+0,3^{\circ}\text{C}/100$ лет. В результате анализа годовой температуры воздуха по 11 метеостанциям Кольского полуострова за период 1960-1999 гг. также выявлены положительные линейные тренды, составляющие от $0,08$ (МС Мурманск, Ура-Губа) до $0,34^{\circ}\text{C}/10$ лет по МС Ковдор (Давыдов, 2001).

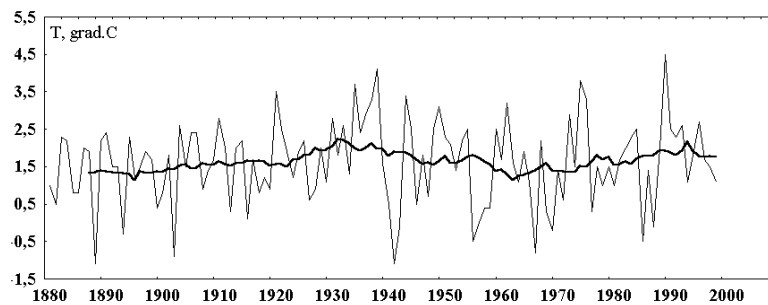


Рис. 2. Изменения температуры воздуха по Восточной Финляндии за период 1880-1999 гг. (среднегодовые и 15-летние скользящие средние значения)

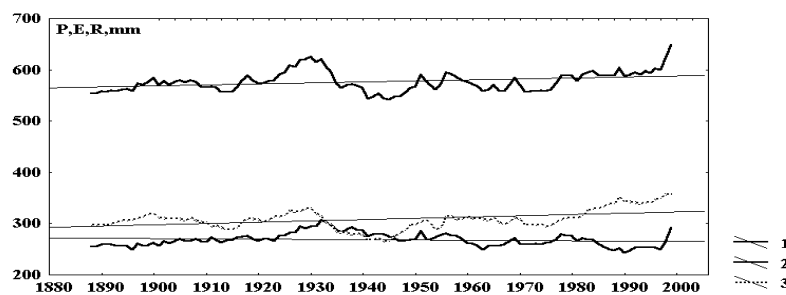


Рис. 3. Годовые суммы осадков (1), суммарное испарение (2) и речной сток (3) для исследуемой территории

Спектральный и корреляционный анализы временных рядов показал наличие низко- и высокочастотных квазипериодических колебаний с различными временными масштабами около 20-30, 6-8 и 2-3 лет. Колебания уровня воды, речного стока крупнейших озер Европы (Ладожского, Онежского и Сайма) также содержат подобные квазипериодические компоненты.

Выявлено влияние крупнейших озер Европы – Ладожского и Онежского на климатические характеристики региона. Большой интерес представляет оценка многолетних тенденций важнейших гидрофизических характеристик – температуры воды и солёности – в Белом море, акватория которого также входит в район исследований. Выявлены доминирующие сезонные колебания и линейный тренд температуры воды в Белом море (залив Чупа), причем за период с 1961 по 1999 гг. температура возросла с 4,7 до 7,7 °С.

Общее увеличение температуры воды за этот период согласуется с тенденциями глобальных изменений температуры воды в океане. Тенденции потепления проявляются также в уменьшении площади льдов в Баренцевом и Балтийском морях (Кондратьев, Иоханнесен (1995)). Взаимный корреляционный анализ температуры воды и воздуха в районе исследований не выявил тесных связей региональных изменений климата. Колебания температуры воды в Баренцевом и Белом морях хорошо согласуются, а между температурой воды Белого моря и местными метеорологическими характеристиками имеется менее тесная взаимная связь. По-видимому, изменчивость гидрологических характеристик Белого моря связаны в большей степени с таковыми в Баренцевом море и в значительной мере определяются глобальными, а не региональными климатическими изменениями. Солёность в Белом море имеет значительные сезонные и межгодовые изменения. Линейные тренды показывают, что по имеющимся данным за последние 40 лет в этом районе солёность увеличилась более чем на 2 ‰. Среди основных причин этого следует назвать некоторое снижение стока пресных вод в Белое море и также изменение водообмена с Баренцевым морем. Последнее требует дальнейших исследований.

Положительная тенденция отмечена и в рядах годовых сумм осадков, что, прежде всего, является следствием увеличения продолжительности периодов с западным переносом воздушных масс в течение года над территорией. Можно отметить увеличение годовых сумм осадков в течение двадцатого столетия. Увеличение осадков и повышение годовой температуры воздуха приводит к возрастанию суммарного испарения с территории, которое все же не компенсирует полностью увеличение приходной части водного баланса. По полученным результатам нельзя сделать однозначный вывод о том, что изменения климата в регионе, а также реакция на эти изменения уровня и элементов водного баланса озер определяются антропогенными климатическими изменениями, вызванными "парниковым" эффектом. Приведенные выше результаты свидетельствуют о том, что климат и общая увлажненность территории Фенноскандии подвержены значительным естественным флуктуациям, на которые накладываются колебания, вызванные антропогенными факторами. Межвековая и внутривековая изменчивость гидрометеорологических полей существенно влияют на состояние природного фона, на котором происходит функционирование водных экосистем.

Численное моделирование изменений климата

Для оценки возможных изменений основных характеристик климата и ЭВБ исследуемой территории были использованы результаты численного моделирования на модели глобальной циркуляции атмосферы и океана (GCM), разработанной в Метеорологическом институте Макса Планка, Германия. Детальное описание модели, получившей индекс ECHAM-4, дано Л. Бенгтссоном (Bengtsson, 1997).

В основе модели лежит система уравнений геофизической гидродинамики. Расчетные уравнения получены для сетки с пространственным разрешением $2,8^\circ \times 2,8^\circ$ по широте и долготе и от земной поверхности по 10 уровням до 30 км (до высоты 10 гПа) по вертикали для всего Земного шара. Минимально возможный временной шаг модели ECHAM-4 составляет 24 мин, однако в нашем случае использовались результаты моделирования среднемесячных значений моделируемых параметров. Положение узлов расчетной сетки модели на территории района наших исследований показано на рис.1. Выходными данными модели являются хронологические ряды приземной температуры воздуха и осадков по 10 уровням в слое 0-30 км, облачности, относительной влажности, высоты снежного покрова, испарения с поверхности суши и водной поверхности, элементов солнечной радиации, характеристик ветра у земли и на высотах и др. Расчеты по модели были проведены в Метеорологическом институте Макса Планка С. Кузминой (Нансеновский международный центр дистанционных методов и окружающей среды) за период 1950-1990 гг. (контрольный период для сопоставления модельных и инструментальных данных как по регионам, так и для всего Земного шара), а также на перспективу (2000-2100 гг.) по двум сценариям изменения климата. В качестве сценариев использовались оценки возможного постепенного увеличения парниковых газов, принятые при разработке и проверке известной модели глобального циркуляционного механизма IPCC (Houghton и др., 1995). В первом случае (сценарий G) предполагается удвоение содержания углекислого и других парниковых газов в атмосфере Земли на период 2000-2100 г.г., во втором (GA) сценарии дополнительно учитывается увеличение аэрозолей техногенного происхождения (Израэль (1999)).

Для оценки соответствия данных наблюдений и модельных расчетов месячных и годовых осадков и температуры воздуха, полученных для отдельных метеостанций, было проведено сравнение с данными в наиболее близко расположенных узлах модели. Анализ измеренных и модельных данных для отдельных станций показал хорошее соответствие среднемесячных значений температуры воздуха, однако для месячных сумм осадков связь неудовлетворительна, как это видно, например, на рис.4. Г. С. Голицын, Л. К. Ефимова и др. (2000) выполнили анализ фактических и модельных данных, полученных по 18 различным GCM, включая модель ECHAM, для водосбора Ладожского озера, поданным не охватывающих период последних 12 лет. Они получили также хорошую согласованность измеренных и модельных данных среднемесячной температуры воздуха и низкую согласованность месячных сумм осадков, т.е. результаты подобные для нашего эксперимента.

Для годовых значений, рассчитанных в целом по каждой территории, модельные данные хорошо согласуются с измеренными значениями (рис.5-6).

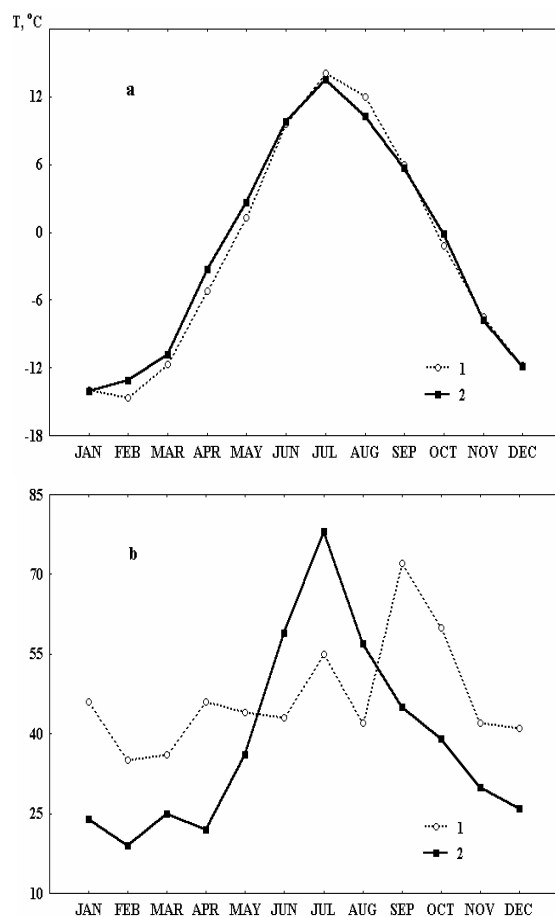


Рис. 4. Внутригодовое распределение температуры воздуха (а) и осадков (б) по месяцам по МС Ловозеро (Кольский п-в) и модельному узлу № 2 за период 1960-1999 гг. (1 – данные модели, 2 – измеренные данные)

В соответствии с результатами моделирования на модели ЕСНАМ-4 в изучаемом районе возможны заметные изменения климата и гидрологического режима. Для Кольского полуострова по обоим сценариям норма годовой температуры воздуха может увеличиться от $-0,7$ до 2 °C, годовые суммы осадков в средних многолетних значениях возрастут от 461 мм до 482-486 мм. Аналогичные изменения возможны и в Карелии: рост годовой температуры воздуха от 1,6

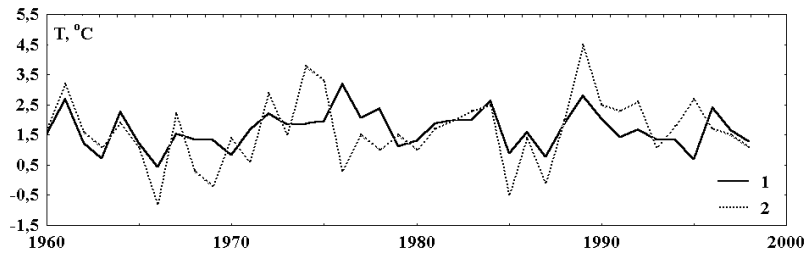


Рис. 5. Модельные (1) и измеренные (2) значения среднегодовой температуры воздуха за контрольный период 1960-1999 гг.

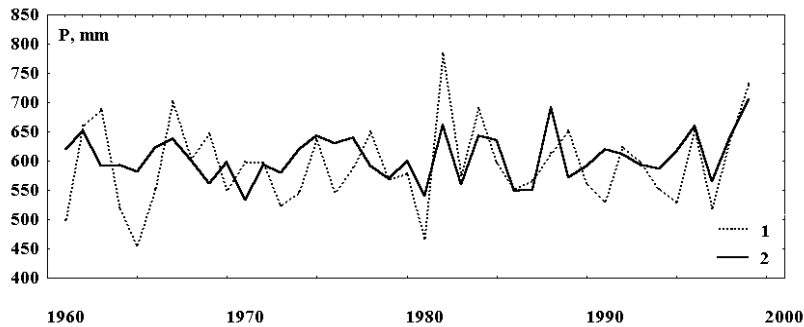


Рис. 6. Измеренные (1) и модельные (2) годовые суммы осадков за контрольный период 1960-1999 гг.

до 2,7-3,0 °С, увеличение годовых сумм осадков от 582 мм до 610-635 мм, при этом суммарное испарение может возрасти от 264 до 323-348 мм. Суммарный речной сток при новых климатических условиях может уменьшиться с 319 в современном климате до 280-290 мм к 2050 году. В новых климатических условиях по обоим сценариям наибольший рост температуры воздуха будет отмечаться в зимние сезоны (декабрь-февраль). Согласно модельным данным, возможны значительные изменения в распределении среднемесячных температур воздуха: в Карелии месяцы с мая по октябрь станут более теплыми, чем в настоящее время, на Кольском полуострове все месяцы будут значительно теплее.

Возможные изменения климата и водного баланса территории на период 2000-2050 гг.

Средние годовые суммы осадков увеличатся на 20-25 мм в районе Кольского полуострова и около 30-50 мм для территории Карелии как по одному, так и по другому сценариям. Климатические нормы годовой температуры воздуха за следующий 50-летний период возрастут от -7,7 до 0,2 °С в Кольском регионе и от 1,6 до 2,7-3,0 °С в Карелии.

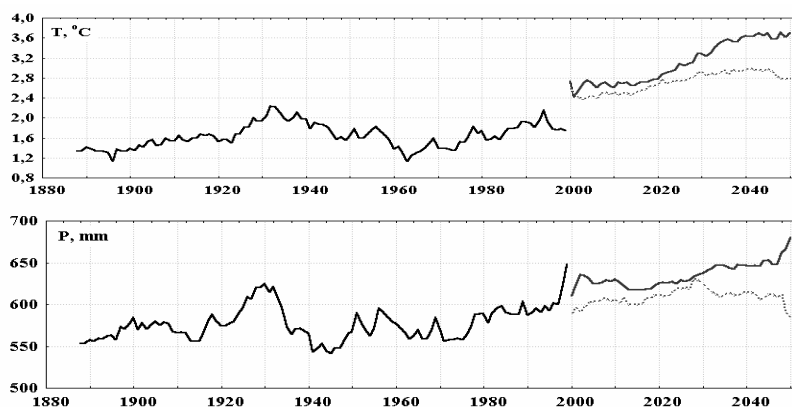


Рис. 7. Фактические (до 1999 г., черная линия) и модельные ряды температуры воздуха и осадков по сценарию G (серая линия) и GA (серая прерывистая линия) для территории Карелии (15-летние скользящие средние)

Для Карелии была разработана простая статистическая модель водного баланса в целом для территории для ЭВБ, осредненных по скользящим 15-летним, поэтому, с использованием данных численного моделирования по модели ЕСНАМ-4 были оценены тенденции изменения ЭВБ на перспективу (2000-2050 гг.) по двум сценариям изменения климата. После осреднения с периодом 15 лет полученные ряды вводились в модель регионального водного баланса, по соответствующим уравнениям которого рассчитывались испаряемость, суммарное испарение и, в конечном итоге, речной сток на период 2000-2050 гг. для G и GA сценариев. Необходимо отметить, что стыковка двух моделей позволяет оценить возможные изменения тех ЭВБ, которые отсутствуют на выходе модели ЕСНАМ-4. Эти оценки показывают, что все ЭВБ территории Карелии, кроме речного стока, в новых климатических условиях по обоим сценариям будут возрастать. Наиболее интенсивно, в 1,2-1,3 раза или на 60-80 мм в сравнении с периодом 1950-1999 гг., возрастет суммарное испарение с территории. Эта оценка хорошо согласуется с модельными данными, полученными по другим GCM (Бусарова и Гусев, 1995). Осадки в следующие 50 лет будут увеличиваться незначительно на 4-8%. В результате этого речной сток, определяемый как разность между осадками и общим испарением $R=P-E$, несколько уменьшится, от 319 мм (норма для периода 1950-1999 гг.) до 287 мм.

Анализ полученных результатов показал, что при новых климатических условиях изменятся не только годовые значения климатических и гидрологических характеристик, но и их сезонное и внутригодовое распределение. Как было показано выше, в настоящее время весенние температуры воздуха по всей исследуемой территории имеют наиболее значимый положительный тренд. В будущем, согласно сценариям G и GA, больший рост температуры воздуха будет характерен для зимних сезонов (декабрь – февраль) для всех районов Кольского

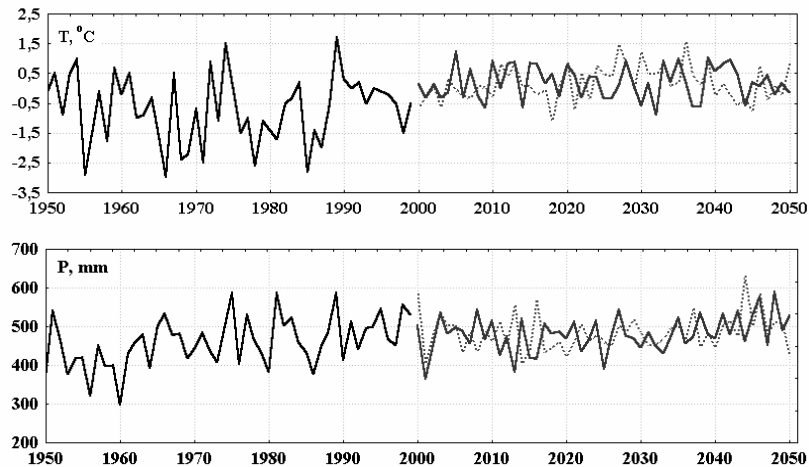


Рис. 8. Фактические (до 1999 г., черная линия) и модельные ряды температуры воздуха и осадков по сценарию G (серая линия) и GA (серая прерывистая линия) для территории Кольского полуострова (годовые значения).

полуострова и Карелии. Изменится внутригодовое распределение среднемесячных температур воздуха. В Карелии наибольшее потепление возможно в осенние и зимние месяцы, в то время как в течение весенних и летних месяцев повышение температуры воздуха не будет столь значительным. В Кольском регионе также все месяцы станут теплее, чем в современном климате. Необходимо отметить, что оценка месячных сумм осадков при новых климатических условиях была некорректна, поскольку модельные данные дают неудовлетворительную аппроксимацию рассчитанных и измеренных осадков за контрольный период 1960-1999 гг.

Некоторые последствия влияния изменений климата на водные системы региона Восточной Финноскандии

Изменения климата как за счет антропогенного накопления парниковых газов, так и при естественных изменениях может привести к изменениям водных и наземных экосистем.

Изменения температуры воды водоемов

Выявлена существенная нестационарность гидрологического режима озер, элементов водного баланса (ЭВБ) и уровня крупнейших озер Европы в зависимости от изменений климата. При увеличении температуры воздуха возрастает температура воды озер Финноскандии, с 7 до 8-9 месяцев возрастает безледоставный период, количество атмосферных осадков увеличится, что повлечет за собой повышение уровня озер (Филатов, 1997; Kuusisto, 1992). Такие изменения гидрометеорологических характеристик приведут к воздействию на водные и наземные экосистемы, которые можно оценить для крупнейших озер

на трехмерных термогидродинамических моделях, разработанных, например, Л.А.Руховцевым, Г.А.Астраханцевым, и др. (2000), а для многочисленных небольших озер, типичных для Восточной Фенноскандии – на одномерных (см. The Finnish Research Programme..., 1996) с использованием, полученных в настоящей работе результатов сценариев изменения климата.

Изменения циркуляции вод, перемешивания в водоемах

Уменьшение периода ледостава на водоемах будет способствовать повышению температуры воды, более интенсивному перемешиванию водных масс озер, утоньшению при этом холодного придонного слоя (гиполимниона) и как результат - к обеднению вод озер кислородом. Период стратификации возрастет. При таком развитии возможны и серьезные изменения гидродинамики крупнейших озер Европы. При вышеуказанных условиях возможно увеличение интенсификации течений, перемешивания. Если в настоящее время при климатическом масштабе осреднения основной механизм формирования общей циркуляции вод циклонического характера вносят циркуляция вод в весенне-осенний период (за счет совместного эффекта бароклинности, ветра и рельефа дна), то при потеплении климата в соответствии с рассчитанными значениями, возрастет интенсивность циркуляции зимой. При этом при длительном воздействии ветра в озерах формируется «двухъячейковая» циркуляция вод (Филатов, 1991). Существенно возрастет, как и в Великих Американских озерах, циркуляция вод, перемешивание в зимний период. Все это скажется и на изменениях функционирования озерных систем. Как показали последние исследования (Beletsky et al., 1999) в ВАО интенсивность циркуляции этого вида выше в зимний период, поскольку в это время они не замерзают, за исключением оз.Эри, в то время как КОЕ полностью или частично в зимний период покрываются ледяным покровом, отмечается слабая интенсивность динамики вод, перемешивания что, сказывается на скорости протекания эвтрофикационных процессов и загрязнения озер в крупнейших озерах Европы и Северной Америки.

Изменения функционирования водных систем

Оценивая последствия наложения взаимодействия климатических вариаций и антропогенного прессинга на Крупнейшие озера Европы (КОЕ) и Великие северо-американские озера (ВАО) за последние 40 лет, становится очевидным, что хозяйственная деятельность человека оказала за этот период преобладающее влияние на динамику этих двух крупных экосистем, при том, что в изменениях климата, по всей видимости, преобладала естественная, природная изменчивость. Тем не менее, в будущем при условии снижения антропогенной нагрузки роль климатических факторов в формировании динамики экосистем КОЕ и ВАО может оказаться определяющей. При увеличении температуры воздуха за счет возрастания концентрации углекислого газа в атмосфере, т.е. при парниковом эффекте в рассматриваемых районах ВАО и КОЕ произойдут противоположные изменения (Филатов, 1997; Mortsch, Quinn, 1996). При увеличении CO₂ в два раза в районе ВАО на широтах 42–47° будет наблюдаться уменьшение осадков и стока рек, а при возрастании температуры нижнего слоя атмосферы – увеличение испарения. (Mortsch, Quinn, 1996) И как следствие, снизится уровень водоемов и увеличится температура их поверхности. Поскольку экономика региона ВАО существенно определяется водными ресурсами, использованием озер для нужд гидроэнергетики, водоснабжения, транспорта, рекреации, добычи минеральных ресурсов и как приемников сточных вод, в том числе по-

догретых вод атомных станций, то при снижении уровня озер экономике региона ВАО будет нанесен существенный ущерб.

В районе КОЕ за тот же период, по расчетам на моделях при удвоении CO_2 для территории Финляндии и Карелии, количество атмосферных осадков будет возрастать, что приведет к небольшому повышению уровня этих озер. Последствия этих тенденций разнообразны в силу исключительной сложности экосистем ВАО и КОЕ, наличия в них многочисленных прямых и обратных связей, неоднозначности реакции отдельных их элементов на повышение температуры в приземном воздухе и водоеме, перестройки атмосферных циркуляционных процессов, изменения интенсивности и спектрального состава солнечной радиации, приходящей к поверхности Земли, и т.д. Развитие процессов эвтрофирования, токсического загрязнения разных озер даже в одной системе существенно различаются. Обусловлено это как особенностями лимногенеза, морфометрии, своеобразием протекания термогидродинамических процессов, процессами на водосборе, так и спецификой законодательной основы по управлению и охране озер, инвестициями на проведение охранных мероприятий, водохозяйственной деятельностью на акватории и водосборе озер в России и США и Канаде. Существенные отличия имеются и в протекании лимнических процессов в экосистемах КОЕ и ВАО, которые наблюдаются из-за разной реакции систем на воздействия климата. То, что рассматриваемые экосистемы системы в определенной степени не являются независимыми, свидетельствуют инвазии видов характерных для района Каспийского и Балтийского морей, таких как моллюск дрейсена или ледниковый реликт *Bythotrephes cederstroemi* из Ладожского озера, обнаруженный в ВАО еще в 1980 г.

Изменения на водосборе

Увеличение продолжительности вегетационного периода и осадков на водосборе приведет к более обильному развитию растительности, что будет несколько сдерживать эрозию почв, препятствовать выносу органических и биогенных веществ в водные системы. При увеличении уровня озер будет отмечаться еще большая эрозия берегов, вынос солей, биогенов, органики с водосборов, изменятся базисы эрозии рек, что повлечет за собой перераспределение наносов, возрастет заболочиваемость территории. При сокращении периода существования снежного покрова на водосборах возрастет эрозия почв. Эти причины будут способствовать еще большему эвтрофированию водоемов. С возрастанием выноса в водоемы минеральных солей будет обедняться поверхностный почвенный покров. При увеличении поступления органики и биогенных веществ с водосбора возрастет и скорость продукции бактерий и фитопланктона. В озерах будет больше зоопланктона при меньшем его разнообразии, увеличится количество сине-зеленых водорослей. Эти факторы будут способствовать изменению видового состава ихтиофауны. Во-первых, при увеличении температуры воды и эвтрофировании озер будет наблюдаться уменьшение количества рыб лососевых пород.

Важным представляется оценить реакцию экосистем в регионе, а также вклад, который может вносить регион в формирование парникового эффекта за счет деятельности в регионе. Ю.Г. Шварцман и др. (2000) показали, что вклад европейского Севера России в поступление CO_2 в атмосферу в глобальном масштабе значимый, а в региональном весьма существенный. Так, территория Карелии, площадь которой составляет 0.12 % суши Земли, дает 0.23 % поступле-

ния углерода. Важной является оценка изменения продуктивности леса при антропогенных и климатических изменениях в исследуемом регионе. При повышении температуры воздуха на 1 °С продуктивность хвойных лесов Карелии вырастет на 0.3-0.4 класса бонитета (Карпечко и др., 1999). При существующем в настоящее время объеме вырубок (6–10 млн. м³/год) это не приведет к заметным изменениям в водном балансе региона (Бондарик, 2000).

Заметны в течение XX в. и изменения в биоразнообразии, и в структуре биотического компонента экосистем европейского Севера России. Эти изменения, прежде всего, проявлялись в продвижении на север более южных видов. При антропогенной трансформации ландшафтов расширяются площади их местообитаний, возникают качественно иные биотопы, ранее не свойственные природным зонам европейского Севера.

Изменение климата в регионе

Климат в Карелии, также как и во всей Восточной Фенноскандии, станет более морским, а в северных районах – более континентальным. Изменения климатического и водного режима потребуют изменения в управлении водохозяйственными системами и отраслями экономики, базирующимися на использовании водных ресурсов (гидроэнергетика, промышленное и коммунальное водоснабжение, сельское хозяйство и др.).

Проблемы определения климатически значащие параметры водоемов

Оценить вклад антропогенных и природных факторов в изменения климата и водных систем является задачей до сих пор не решенной. В последние годы существенно снизилась возможности слежения (мониторинга) водных и наземных систем в России из-за сложности проведения стационарных наблюдений на станциях и разрезах. Кроме того, учитывая сложный характер изменений климата, их региональные особенности, необходимо особое внимание уделить новым современным средствам мониторинга, изучения природной среды. В первую очередь это дистанционные аэрокосмические, использующие разные принципы наблюдений (Kondratjev, Filatov, 1999). Очевидно, в этой работе из-за ограниченности ее объема невозможно подробно остановиться на проблеме климатически значащих параметров морей, крупных озер и водосборов. Здесь лишь мы упомянем эту проблему как важную, которой следует уделить специальное внимание и продолжить начатую Федоровым, Островским (1986) работу. Кроме упомянутых в их работе параметров определяемых со спутников: ТПО, уровень моря и озер. Весьма перспективными для изучения климата являются исследования изменений ледяного покрова Арктики и больших озер по данным SAR, а также оценки изменения хлорофилла-а, растворенной органики, продуктивности с помощью данных SeaWifs, в особенности перспективных для небольших морей типа Белого или крупных озер.

Благодарности

Основные выводы были сделаны в результате выполнения Институтom водных проблем Севера КарНЦ РАН темы фундаментальных исследований РАН, а также по международному проекту INTAS-97-1277 «Detection and modelling of greenhouse warming in the Arctic and sub-Arctic». Авторы доклада выражают свою благодарность С.Кузьминой (NIERSC, С.Петербург) за проведение численных экспериментов на модели, В.В.Кекконен (ИВПС КарНЦ РАН) за помощь в подготовке карт-схем.

Литература

1. *Адаменко В.Н., Кондратьев К.Я.* Глобальные изменения климата и их эмпирическая диагностика // В сб. Антропогенное воздействие на природу Севера и его экологические последствия. Под. Ред. Ю.А.Израэля, Г.В.Калабина, В.В.Никонова. КНЦ РАН., Апатиты, 1999, с. 17-34.
2. *Антоновский М.Я., Бухштабер В. М., Пивоваров В. А.* Определение и анализ наземного биотического сигнала в рядах данных о концентрации CO₂ в атмосфере. Метеорология и гидрология, 2000, № 3. С. 36-47.
3. *Бондарик Н.Л.* Влияние лесопользования на водность рек Карелии // Пятая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов: Тезисы докладов. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. С. 9.
4. *Будыко М. И., Винников К. Я.* Влияние изменений глобального климата на водные ресурсы // Тезисы докл. V Всесоюз. гидролог. съезда. Л.: 1986. С.11-12.
5. *Бусарова О.Е., Гусев Е.М.* Использование результатов моделирования изменения климата для оценки изменения суммарного испарения для территории Европы // Метеорология и гидрология, 1995, № 10. С. 29-34.
6. *Винников К. Я.* Чувствительность климата. Ленинград, 1986. 224 с.
7. *Григорьев А.А., К.Я.Кондратьев.* Экодинамика и геополитика. Т.2. Экологические катастрофы. -СПб., 2001.-687 с.
8. *Голицин Г.С., Мелешко В. П., Ефимова Л. К., Говоркова В. А., Сомова Н. Г.* Составляющие водного и теплового балансов на водосборе Ладожского озера по фактическим и модельным данным //Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. Ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск КарНЦ РАН, 2000. С. 312-319.
9. *Давыдов А.А.* Изменения температуры воздуха на Кольском полуострове и ледовитости Баренцева моря во второй половине двадцатого века // Вековые изменения морских экосистем Арктики. Климат, морской перигляциал, биопродуктивность. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. С. 291-297.
10. *Даценко Н. М., Сонечкин Д. М., Шабалова М. В.* Сезонные различия в длинных рядах приземной температуры воздуха в Европе. Метеорология и гидрология, 2000 № 7. С. 33-41.
11. *Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А.* Анализ современных и ожидаемых в будущем изменений климата и криолитозоны в северных регионах России. // Метеорология и гидрология, 1999, № 3. С. 18-27.
12. *Карпечко Ю.В., Бондарик Н.Л., Карпечко В.А.* Влияние антропогенных факторов на формирование речного стока на водосборе Белого моря // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера: Материалы II (XXV) Международной конференции (22-26 ноября 1999 г., Петрозаводск). Изд-во ПГУ, 1999. С. 328-331.
13. *Кобак К.И., Кондрашева Н.Ю., Лугина К.М., Торопова А.А., Турчинович И.Е.* Анализ многолетних метеорологических наблюдений в Северо-Западном регионе России // Метеорология и гидрология, 1999, № 1. С. 30-38.
14. *Кондратьев К.Я., Иоханессен О.М.* Арктика и климат. СПб., 1995. 139 с.
15. *Назарова Л.Е., Сало Ю.А., Филатов Н.Н.* Изменение климата и водные ресурсы Восточной Фенноскандии. Препринт доклада. Петрозаводск, КарНЦ РАН, 2001. 35 с.
16. *Руховец Л.А., Астраханцев Г.П., Мениуткин В.В., Минина Т.Р., Петрова Н.А., Полосков В.Н.* Моделирование экосистемы ладожского озера: результаты и

перспективы. // Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. Ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск КарНЦ РАН, 2000. С.405-425.

17. Трапезников Ю.А., Григорьев А.С., Хорбаладзе М.А. Уровень Ладожского озера под влиянием климатических факторов// Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. Ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск КарНЦ РАН, 2000. С. 581-365.

18. Федоров К.Н., Островский А.Г. Климатически значащие физические параметры океана. Л.Гидрометеоиздат, 1986. 41 с.

19. Филатов Н.Н., Поздняков Д.В. Сравнительный анализ современного состояния больших озер Северной Европы и Америки. // Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. Ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск КарНЦ РАН, 2000. С. 17-31.

20. Филатов Н.Н. Изменение климата Восточной Фенноскандии и уровня воды крупнейших озер Европы. Петрозаводск, КарНЦ РАН, 1997. 148 с.

21. Филатов Н.Н. Гидродинамика озер. С.Петербург, Наука. 1991. 191 стр.

22. Шварцман Ю. Г., Болотов И. Н., Игловский С. А. Региональные изменения климата и состояние экосистем европейского Севера России // Вековые изменения морских экосистем Арктики. Климат, морской перигляциал, биопродуктивность. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. С. 101-119.

23. Шнитников А.В. Межгодовая изменчивость общего увлажнения в бассейне Ладожского озера // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Ленинград, 1966. С. 5-57.

24. Beletsky D., Saylor D., Schwab D. 1999. Mean circulation in the Great Lakes. *J. Great Lakes Res.* Vol. 25. No. 1. pp. 78 - 93.

25. Bengtsson L., Numerical modeling of the Earth's Climate. Publ. of Max-Planck Inst. for Meteorology, Hamburg, 1997. 94 p.

26. Climate of Europe, 1995. First European Climate Assessment. ECSN, Netherlands, 731 p.

27. Heino R., 1994. Climate in Finland during the period of meteorological observations // Finnish Meteorol. Inst., Contr. № 12, Helsinki, 212 p.

28. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callandar B.A., Harris N, Kattenberg A, Maskell (Eds.)/ Climate Change 1995, The Science of Climate Changes. Contribution of working group I. Intergovernmental Panel of Climate Change (Cambridge Univ. Press), 1995.

29. Kondratyev, N.Filatov, D.Pozdnjakov et al. Limnology and Remote sensing. Ed. By K.Kondratyev, N.Filatov. Springer-Praxis. London. 1999. 412 p.

30. Kuusisto E. Runoff from Finland in the period 1931-1990. *J. Aqua Fennica*, v. 22, 1, 1992. Pp. 9-22.

31. Mortsch L., Quinn F. 1996. Climate change scenarios for Great Lakes Basin ecosystem studies. *Limnol. Oceanogr.* Vol. 41. No.5. pp. 903 - 911.

32. The Global Climate System Review, 1995 // Princ. edit. D. Philips. Publ. WMO № 819, 152 p.

33. The Finnish Research Programme of climate change (SILMU). Final report, 1996 // Ed. by J. Roos, 507 p.

СЕКЦИЯ 3

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ**РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ
ПО ГЕОТЕРМИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

Голованова И.В., Селезнева Г.В.

Институт геологии Уфимского Научного Центра РАН

Одним из способов оценки естественных колебаний климата является реконструкция его изменений по измерениям температуры в скважинах. Метод позволяет восстановить историю изменения температуры поверхности Земли (ТПЗ), которая связана со средней температурой воздуха и, следовательно, с изменениями климата в широком временном интервале (до десятков и сотен тысяч лет), отфильтровывая высокочастотные компоненты климатического сигнала. При этом влияние антропогенного фактора максимально ослабляется, так как исследуемые скважины, как правило, расположены вдали от городов.

На Южном Урале имеется большое количество высокоточных данных по температурам в скважинах, которые до сих пор использовались для определения теплового потока. При этом верхняя часть скважины исключалась из рассмотрения из-за заметного воздействия рельефа, вариаций климата и движения вод и анализировались данные, только начиная с глубины 150–200 м, где поле считалось практически стационарным. Однако, если исключить влияние других факторов, можно получить из скважинных температур сведения об истории изменения климата на территории Южного Урала.

В работе представлены результаты реконструкции изменений климата на Южном Урале, выполненные в Институте геологии УНЦ РАН, для двух различных интервалов времени. Температуры, измеренные в скважинах глубиной от 300 до 1000 м, использовались для реконструкции истории изменений климата за последнее тысячелетие. Данные по скважине глубиной около 2000 м использованы для изучения изменений климата за поздне- и послеледниковое время. Изучены термограммы по 46 скважинам в регионе, ограниченном 48–56° с.ш. и 57–63° в.д. Скважины были пробурены большей частью в кристаллических горных породах. Измерения температуры выполнены с точностью до 0,02°С в 1972–1995 годах. Детально изучена теплопроводность образцов пород, слагающих разрез, кроме самой верхней его части, сложенной выветрелыми породами. Для анализа были выбраны данные по скважинам, где отсутствуют прямые свидетельства о движении подземных вод, а возмущения, вызванные влиянием топографии, пренебрежимо малы. К сожалению, из огромного количества скважин для реконструкции изменений климата пригодна только незначительная часть. Это связано с тем, что обрабатывались не результаты специально проведенных измерений, а данные, использовавшиеся ранее для определения теплового потока. Этим объясняется недостаток сведений, которые должны были быть известны при отборе материала для обработки: тепловые свойства пород в самой верхней части разреза, гидрогеологические условия, особенности рельефа, и др. Практиче-

ски не было сведений о геологическом строении участков работ, однако, известно, что расположение тел с контрастной теплопроводностью вблизи скважины, но не вскрытых ею, может исказить термограмму и дать ложный климатический сигнал. Поэтому параллельно с обработкой материала недостающие сведения по возможности пополнялись. В результате были предложены некоторые критерии для дополнительной отбраковки термограмм, и часть данных была исключена из рассмотрения. В дальнейшем рассматриваются данные по 31 скважине. На рис. 1. показана схема изученного региона с расположением скважин и ближайших метеостанций.

Для реконструкции изменений климата решается обратная задача геотермии. Первоначально при инверсии температурных данных по скважинам Южного Урала предполагалось, что изменение температуры на поверхности произошло в виде скачка, и отыскивалось время, когда этот скачок произошел, и его амплитуда. Результаты инверсии показали увеличение температуры на поверхности Земли на 0,5–1,5 °С за последние 150 лет на всей изученной территории [2].

Позже стал применяться более сложный, но позволяющий получить больше информации метод инверсии в функциональном пространстве [3]. В этом случае задача решается в предположении об одномерности среды и отсутствии конвективного теплопереноса. Достоинством метода является то, что все параметры среды могут быть определены одновременно. Для решения задачи необходимо задать полное априорное описание параметров модели, таких как: температура на поверхности, теплофизические свойства пород, плотность теплового потока на нижней границе, начальное распределение температур в скважине, а также дисперсию этих свойств. Известно, что чем более точно будет задано начальное приближение и сужены интервалы входных параметров, тем ближе будет результат инверсии к истинному. Поэтому лучшие результаты можно получить по скважинам, для которых имеются достаточно полные и качественные данные о температуре и теплофизических свойствах разреза.

Геотермические данные, используемые для реконструкции климата, осложнены “термическим шумом” и ошибками измерений, которые при инверсии могут быть интерпретированы как ложные климатические сигналы. Для подавления ложного сигнала рекомендуется ослаблять ограничения, накладываемые на априорные входные параметры (особенно на температуру и теплопроводность). Это приводит к уменьшению влияния шума, однако, за счет потери части климатического сигнала. Напротив, инверсия с жестко ограниченными входными параметрами дает кривую ТПЗ с хорошим разрешением. При этом вариации в исходных данных, как действительно связанные с изменениями климата, так и шум, интерпретируются как результат прошлых изменений климата. И результаты, полученные по нескольким скважинам в одном регионе, могут сильно отличаться друг от друга. Если предположить, что в изучаемом регионе температура поверхности Земли имела одну и ту же историю, то шум вызван локальными геологическими условиями, т.е. имеет случайный характер. Тогда влияние шума можно уменьшить либо при совместной инверсии данных по группе скважин, либо осреднением результатов инверсии.

При обработке скважинных данных использовались три пары стандартных отклонений для температуры (σ_T) и теплопроводности (σ_λ) и изучались изменения в разрешении и согласованность полученных кривых истории ТПЗ. В значения стандартных отклонений были увеличены до $\sigma_T = 0,03^\circ\text{C}$ и $\sigma_\lambda = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м К})$ — набор b. В третьем варианте принималось $\sigma_T = 0,05^\circ\text{C}$ и $\sigma_\lambda = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м К})$ - набор

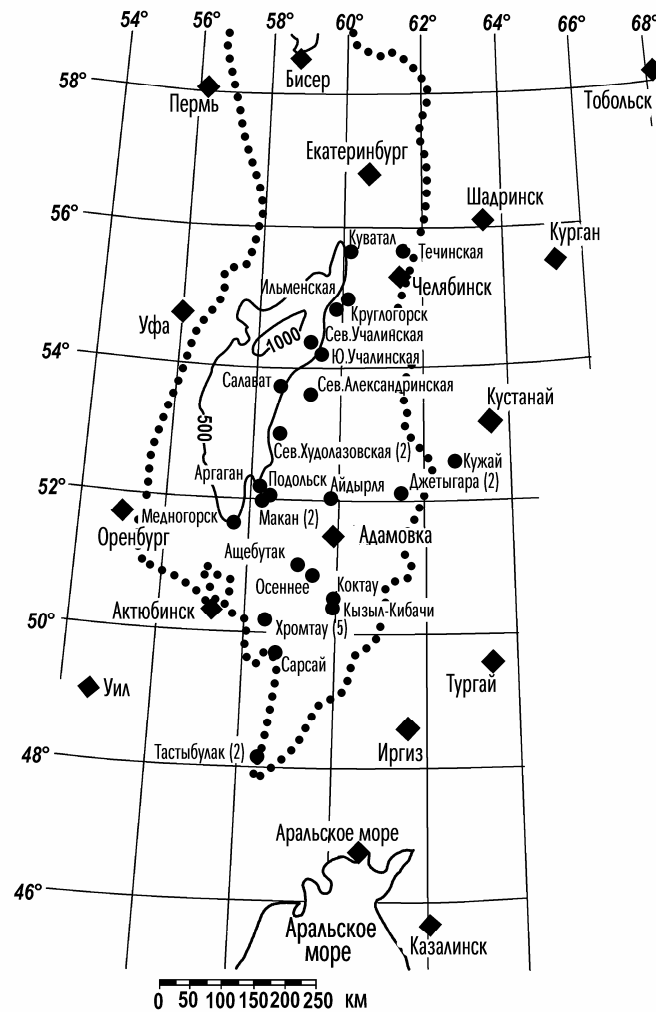


Рис. 1. Схема изученного региона с расположением скважин и ближайших метеостанций. В скобках указано количество скважин, объединенных в один пункт. Показана также упрощенная топография с шагом по вертикали 500 м и граница распространения сплошного мезо-кайнозойского покрова на прилегающих к Уралу платформах

с. Сначала рассматривались результаты инверсии по отдельным скважинам. Затем по всем скважинам была охарактеризована региональная история температуры поверхности Земли. Было изучено влияние глубины скважины на результаты расчетов. Затем была сделана попытка выявить пространственные вариации прошлых изменений климата в изученном регионе. И, наконец, результаты инверсии были сопоставлены с метеоданными о среднегодовой температуре воздуха в регионе.

Как уже отмечалось, для инверсии использовались не данные специально проведенных измерений. Поэтому в ходе работы недостающие сведения по возможности пополнялись. В процессе обработки материала выявилось 14 скважин, результаты инверсии по которым резко отличались от других. Этим скважинам было уделено особое внимание. В каждом конкретном случае выявились основания, достаточные для исключения скважины из рассмотрения: влияние движения жидкости по стволу скважины, подтвержденное данными расходомерии, влияние рельефа и др. Нам представляется, что на этом основании можно предложить следующие критерии для дополнительной отбраковки термограмм: 1) соответствие характера изменений кривых ТПЗ за последние полтора столетия изменению среднегодовой температуры воздуха по метеоданным; 2) соответствие характера кривых ТПЗ глобальным изменениям климата за последнее тысячелетие, известным из других данных; 3) выполнение условий 1 и 2 для набора **b** и особенно для набора **c**. В любом случае, невыполнение этих условий должно служить основанием для более тщательной оценки качества исходных данных для реконструкции изменений климата. В общем случае, для уменьшения влияния локальных неоднородностей геологической природы и других неучтенных факторов необходимо проводить осреднение результатов инверсии для близко расположенных скважин.

Для оценки минимальной глубины исследуемых скважин были проведены прямые расчеты современного температурного профиля под поверхностью Земли при условии двойного (П-образного) скачка температуры амплитудой 1°C, произошедшего в различные интервалы времени в прошлом. Исходя из модельных расчетов, для реконструкции изменений климата до 1000 года н.э. минимальная глубина исследуемых скважин была принята 400–500 м.

По результатам расчетов построены графики изменения температуры поверхности Земли по всем скважинам для трех наборов. Графики для наборов **a** по всем скважинам отличаются большими амплитудами экстремумов, на всех них отмечается дополнительный максимум температуры в начале 20 столетия. Графики для всех наборов имеют минимумы температуры, которые во времени смещаются от начала 16 до середины 19 столетий, и заметное повышение температуры после 1950 года. Для близко расположенных скважин формы кривых в основном совпадают даже при “жесткой” инверсии, несмотря на некоторые различия в амплитуде пиков, например, Джетьгара–175 и 350 (рис. 2). Однако в ряде случаев наблюдаются резкие различия, что, вероятно, можно объяснить влиянием гидрогеологических и других неучтенных факторов. Примером могут служить результаты по двум скважинам на Северо-Худозаводской площади. “Жесткая” инверсия по скважине 184 дает результаты, прямо противоположные полученным по скважине 187 в период от 1000 до 1800 года. Это различие не воспроизводится при “мягкой” инверсии, в этом случае характер изменения кривых изменения ТПЗ соответствует результатам, полученным по другим скважинам.

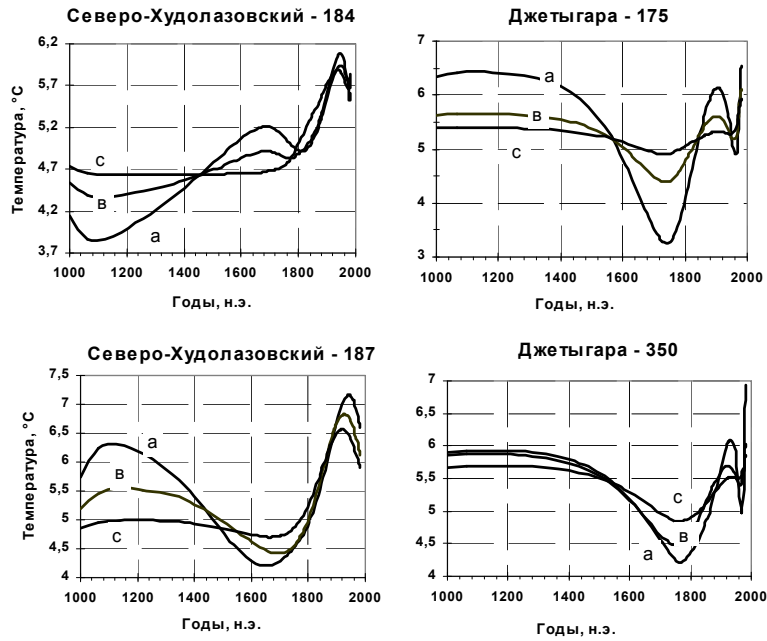


Рис. 2. Результаты инверсии температуры, измеренной в некоторых скважинах.

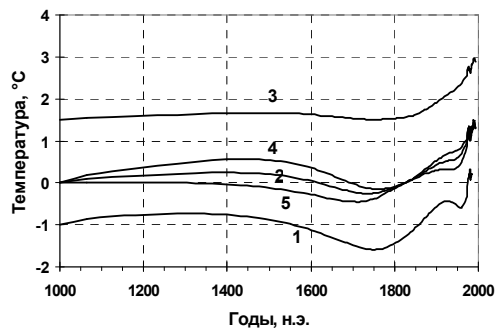


Рис. 3. Осредненные кривые изменения температуры поверхности Земли после вычитания длинноволновой компоненты (температуры в 1000 г. н.э.). 1 – набор а, 2 – набор б, 3 – набор с. 4 и 5 – по глубоким и мелким скважинам (набор б). Графики разнесены по оси температур

На рис. 3 представлены объединенные результаты для всех скважин после вычитания длинноволновой компоненты (температура в 1000 г. н.э.). Для наглядности кривые **a** и **c** сдвинуты относительно кривой **b**. Как видно, существует заметная разница между кривыми ТПЗ для наборов **a**, **b**, **c** по разрежению. На всех кривых выявляется похолодание с минимумом в 1700–1800 г.г. (“малый ледниковый период” после “средневекового оптимума”) и последующее повышение температуры, более отчетливо выраженное в последнее столетие. На рис. 3 дополнительно показаны осредненные кривые ТПЗ для набора **b**, рассчитанные по глубоким (глубже 800 м) и более мелким скважинам. Ход кривых для отдельных

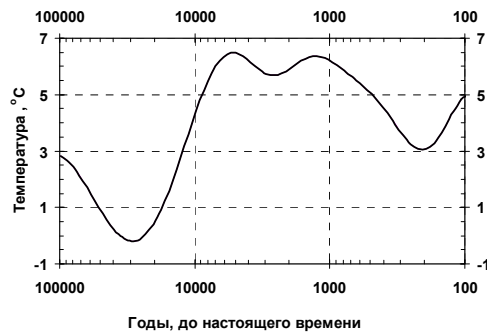


Рис. 4. Изменение температуры поверхности Земли по результатам инверсии скважинных температур (скв. Ильменская – 1)

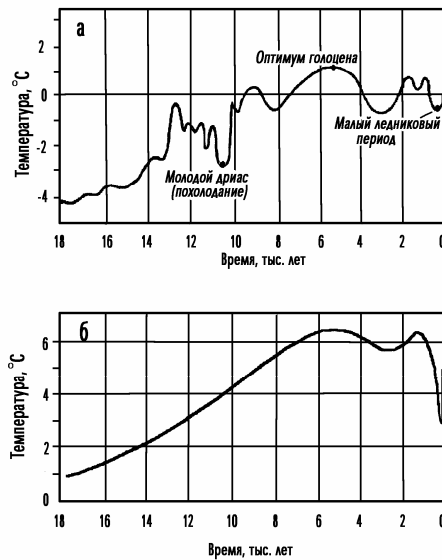


Рис. 5. Изменения температуры поверхности Земли за 18 тыс. лет, а) полученные по исследованиям кернов льда в Гренландии /Climate change, 1990/; б) реконструированные по измерениям температуры в скважине Ильменская – 1.

групп скважин имеет одинаковый характер. Однако положение и амплитуда экстремумов несколько смещается в зависимости от глубины, принятой для расчета. В итоге, средняя кривая по всем скважинам разной глубины получается более сглаженной и не отражает всей информации. Таким образом, на наш взгляд, для характеристики региональной истории изменения климата в рассмотрении должны приниматься скважины одинаковой глубины. Выбор значения глубины зависит от того, на какой период будет проводиться реконструкция.

Различия в истории изменения температуры поверхности Земли могут отражать локальные вариации климата, связанные с географическим положением. Ранее [4] отмечалось, что потепление несколько более выражено на южной части территории. Однако этот вывод был сделан, исходя из анализа скважин разной глубины, что может исказить результат. Сравнение результатов инверсии только для глубоких скважин, расположенных севернее 53° с.ш. (7 скважин), и южнее этой широты (9 скважин), не подтверждают предыдущие выводы. Более убедительное заключение можно будет сделать при сопоставлении более представительных выборок скважин одинаковой глубины, а также, если удастся продлить изучаемый регион далее на север.

Таким образом, результаты инверсии показывают потепление примерно на 1°C с локальными вариациями, начавшееся между 1800 и 1900 г.г. Сравнение с метеоданными подтверждает соответствие характера изменения реконструированной температуры поверхности Земли и температуры воздуха за последние полтора – два столетия. Это позволяет с достаточной уверенностью расширить описание истории температуры поверхности в общих чертах на несколько столетий, предшествующих размещению сети метеорологических станций. Геологические условия на Урале позволяют оценить его как благоприятный регион для изучения глобальных изменений климата по геотермическим данным.

Для реконструкции более ранней истории изменений климата использовались данные по скважине глубиной около 2000 м, расположенной в Ильменском заповеднике на Южном Урале. Эта скважина была выбрана как наиболее глубокая на изученной части восточного склона Южного Урала и, кроме того, достаточно хорошо удовлетворяющая условиям задачи.

Перед тем, как использовать метод для обработки скважинных данных, была исследована его разрешающая способность для реконструкции изменений климата за поздне- и послеледниковое время. Для этого выполнено моделирование влияния палеоклимата на распределение геотермического поля. Затем полученное распределение температуры с глубиной использовалось для инверсии. Расчеты показали, что наиболее значительные искажения температуры вызваны потеплением примерно на 10 градусов, произошедшим в конце ледникового периода около 10 тыс. лет назад. Эффект от последующих вариаций климата выражен гораздо слабее. Поэтому шансы для реконструкции послеледникового потепления гораздо лучше, чем для реконструкции последующих вариаций. При решении обратной задачи реконструированная ТПЗ зависит от глубины скважины, принятой для инверсии. При глубине 2 км, соот-

ветствующей реальной глубине изученной скважины, амплитуда реконструированного потепления составляет примерно 80 % от действительного.

Качество исходных геотермических данных по скважине позволяет использовать при инверсии значения стандартных отклонений для температуры $\sigma_T = \pm 0,02^\circ\text{C}$. Для теплопроводности принималось $\sigma_\lambda = 0,3 \text{ Вт / (м К)}$ в интервале глубин 0–500 м, и $\sigma_\lambda = 0,1 \text{ Вт / (м К)}$ ниже 500 м, где разрез становится достаточно однородным. Результаты инверсии для скважины Ильменская-1 (рис. 4) воспроизводят минимум ледникового периода примерно 30 тыс. лет назад и последующее потепление на $6,9^\circ\text{C}$. С учетом результатов моделирования можно оценить амплитуду реального потепления приблизительно в $8,5^\circ\text{C}$.

Представляется, что полученные результаты довольно хорошо согласуются с данными, полученными другими методами как для северного полушария в целом, так и для соседней территории - Башкирского Предуралья. Один из примеров приведен на рис. 5. Несмотря на значительные интервалы осреднения, четко выделяется оптимум голоцена 5–6 тыс. лет назад с пиком примерно на $1,3^\circ\text{C}$ больше современной температуры. Малый климатический оптимум, максимум которого был примерно 1000 лет назад и предшествовавшее ему потепление нашли отражение во втором максимуме, примерно 1–2 тыс. лет назад. В данном исследовании основное внимание уделялось более отдаленным во времени событиям, однако, климатические изменения за последние несколько столетий также довольно четко выражены в реконструированной кривой.

Таким образом, показана возможность получить среднюю температуру поверхности Земли для периода последнего оледенения, преобладавшего в период 80–10 тыс. лет назад. Впервые выполнены реконструкция изменений климата на период до 100 тыс. лет назад и прямая оценка амплитуды послеледникового потепления по геотермическим данным для Южного Урала. Этот результат хорошо согласуется с данными, полученными другими методами, и является независимой оценкой послеледникового потепления на Южном Урале.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 01–05–64776.

Литература

1. *Climate change: The GPCC Scientific Assessment. Report of working group I of the Intergovernmental panel on climate change.* N-Y.: Cambridge Univ. press, 1990, 364 p.
 2. *Golovanova, I.V., Stulc, P.* Climate change inferred from borehole temperature data – an example from the Urals / *Manifestation of climate on the Earth's surface at the end of holocene.* Prague, 1995. p. 38–46.
 3. *Shen P.Y., Beck A.E.* Least squares inversion of borehole temperature measurements in functional space / *J.Geophys.Res.*, 1991, v. 96, N B12, p.19965–19979.
 4. *Stulc, P., Golovanova, I.V., Selezniova, G.V.* Climate change record in the Earth – example of borehole data analysis in the Urals region, Russia / *Phys.Chem Earth*, 1998, Vol. 23, No. 9–10, p. 1109–1114.
-

КВАНТОВАННЫЕ ГИСТОГРАММЫ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ
ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Нигматуллин Р.Р.

*Казанский Государственный Университет***Введение**

В настоящее время сложные статистические системы являются объектом интенсивного изучения [1-9]. Они характеризуются сильной нелинейностью и нестационарностью на коротких и длинных временных масштабах и обладают стохастическим и самоподобным (фрактальным) поведением. Их поведение зависит от большого числа различных переменных и обычно представляются в виде некоторого случайного временного ряда, который содержит множество сигналов (или аномальных флуктуаций), сильно связанных с исходным шумом и обладающих различными уровнями случайного самоподобия. Интересно отметить также, что сейчас мы имеем некую возможность [10] записать кинетические уравнения для сложных негамильтоновых систем с дискретным временем и исследовать с их помощью эффекты памяти.

Расчет гистограмм и распределений случайных рядов является важной составляющей в анализе сложных систем. Идентифицированные распределения позволяют естественным образом реализовать идею *сокращенного* описания, т.е. свести большое количество управляющих переменных, присутствующих в любой сложной системе, к нескольким переменным. Но попытки движения в этом направлении, наталкиваются на необходимость решения следующих важных проблем:

1. Развить метод, который был бы достаточно эффективен в распознавании соответствующих распределений с высоким уровнем достоверности.
2. Решить проблему, связанную с большими отклонениями измеренных или вычисленных точек, которые образуют искомое распределение.

Недавно в работе [11] был развит подход, который оказался достаточно эффективным в решении двух вышеупомянутых проблем. Основные идеи неэкстенсивной статистической механики [12] и метод, предложенный в [11], были успешно применены для изучения статистических свойств землетрясений. Этот комплексный подход, основанный на процедуре идентификации подгруппных функций и развитый далее в работе [13], позволяет установить определенное соотношение между распределениями относительных частот сейсмограмм и параметрами неэкстенсивных распределений, которые следуют из новой статистической механики [12]. Но помимо этих проблем, необходимо найти также некие "универсальные" статистические параметры или функции, которые были бы пригодны для сравнения случайных рядов или выборок самой различной природы.

Внимательный анализ гистограмм и распределений, образованных различными выборками, дает некую возможность для введения новой "универсальной" функции, применимой для анализа широкого класса случайных рядов. Мы определим эту новую функцию как *квантованную гистограмму* (КГ). Число квантованных уровней (ЧКУ) и число относительных частот на каждом уровне могут служить основными параметрами этой функции.

Основная цель этой статьи состоит в том, чтобы показать, как использовать метод КГ при анализе сейсмограмм. В результате применения метода КГ были получены определенные статистические различия (мы определяем их как предвестники землетрясений) между землетрясениями и техногенными взрывами.

Как получить квантованную гистограмму?

Можно ли получить гистограмму, которая содержит оптимальное число колонок или разбиений, обеспечивающих минимальное отклонение "точек" (относительных частот), рассчитанных для заданной случайной выборки? Ответ на этот вопрос позволяет определить новый статистический параметр, который оказывается весьма важным для последующего анализа. Предположим вначале, что число разбиений мало.

В этом случае мы получим большие отклонения точек, которые соответствуют вычисленным гистограммам. Для того, чтобы уменьшить величины этих отклонений, необходимо, по крайней мере, увеличить число колонок или, другими словами, уменьшить длину соответствующего разбиения. В результате этой процедуры число относительных частот увеличивается, и, соответственно, уменьшаются отклонения этих частот друг относительно друга. Но что случится, если мы будем продолжать уменьшать длину разбиения? В этом случае можно прийти к ситуации, когда новая величина относительной частоты не может быть получена и некоторые "новые" частоты будут иметь нулевые значения. Предыдущий набор относительных частот в этом случае будет разрушен большими отклонениями "новых" частот с нулевыми значениями и экспериментальное распределение достигнет предела *статистического насыщения*. Это наблюдение, основанное на реальных данных (рис.1), показано на рис. 2. Стрелками отмечены "новые" нулевые частоты. Поэтому существует возможность найти, по крайней мере, эмпирически, *статистический коэффициент насыщения* (СКН) который определит оптимальное число колонок (разбиений), зависящих количественно от длины L анализируемого случайного ряда. Новый параметр, определенный таким образом, может служить в качестве относительной меры стохастичности. Можно ожидать, что для выборки, содержащей большое число независимых относительных частот, СКН будет принимать большие значения. С другой стороны, если частоты в анализируемой выборке сильно коррелированы или квазипериодичны, то можно ожидать, что величина СКН уменьшится. Вычисления, сделанные с различными выборками, подтверждают это предположение. Необходимо отметить также, что величина СКН зависит также от уровня дискретизации (числа значащих цифр), задаваемом АЦП. Влияние АЦП на значения уровня разбиения K становится пренебрежимо малым, если число значащих цифр после запятой выше пяти. Это эмпирическое правило получено в результате анализа случайных выборок, имеющих различное число значащих цифр. Если анализируемые выборки удовлетворяют этому правилу, то величина СКН полностью определяется статистическими свойствами анализируемой выборки. Поэтому для расчета величины СКН можно предложить следующую процедуру:

1. Для заданной выборки длины L строится гистограмма с заданным числом разбиения K . Если частоты располагаются в положительной полуплоскости соответствующих координатных осей, то процесс разбиения продолжается, т.е. $K' > K$.

2. Если для некоторого значения K' появляется промежуточная нулевая частота между двумя предельными (и, возможно, нулевыми) частотами, определяющими амплитудные границы выборки, то процесс разбиения прерывается.

3. Значение СКН определяется как: $СКН = K' - 1$ (см. рис.2, где СКН равен 40).
 Здесь мы хотим подчеркнуть, что наше определение *оптимальной* гистограммы, основанное на концепции СКН, отличается от общепринятых определений. Разнообразные соотношения между величинами K и L , предлагаемые для

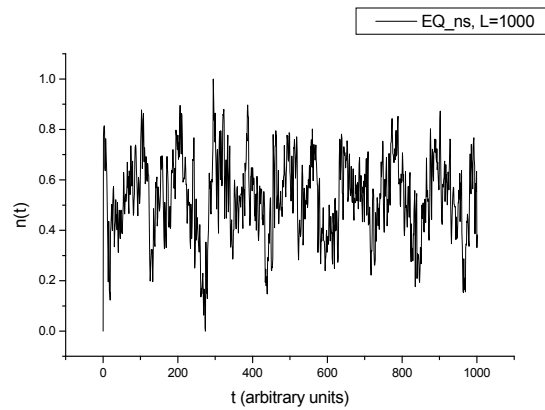


Рис.1

P

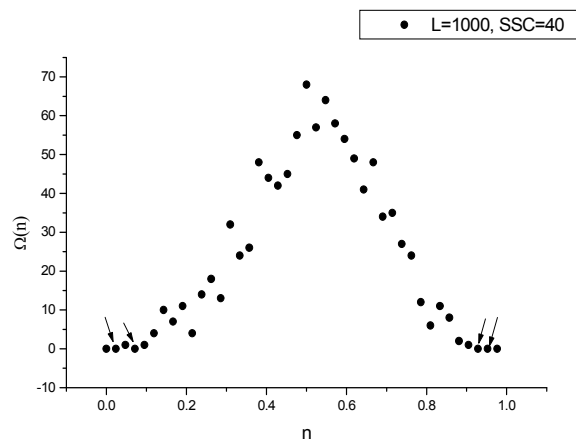
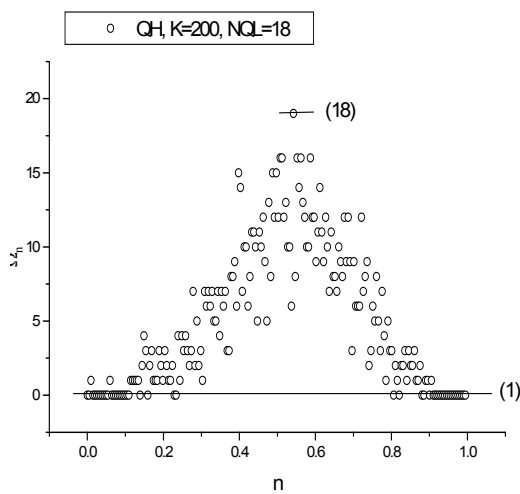


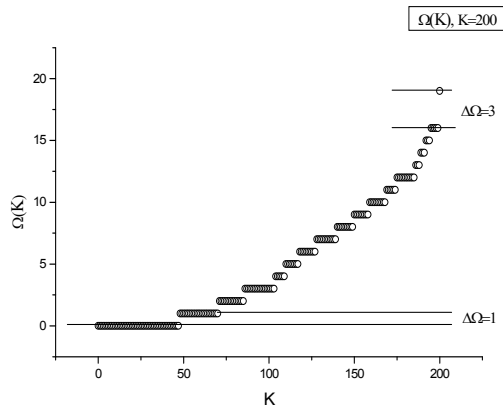
Рис.2

вычисления "оптимальной" гистограммы и основанные на различных статистических и эмпирических подходах, являются в силу их неоднозначности неудовлетворительными и обсуждаются в книге [14].

Для того, чтобы прочувствовать смысл второго статистического параметра необходимо найти ответ на следующий вопрос: как множество относительных частот, полученное для коротких выборок, преобразуется в гистограмму? Можно ожидать, что для коротких выборок число относительных частот является малой величиной. Мы можем проанализировать, по крайней мере, два предельных случая в их расположении по отношению к вертикальной оси. Каждая относительная частота имеет свое и вполне определенное значение. В другом предельном случае все, без исключения, частоты локализируются на одном горизонтальном уровне и имеют лишь одно значение. Такая предельная ситуация может соответствовать равномерному распределению. Для самых разнообразных случайных рядов, мы нашли, что гистограммы, вычисленные для коротких случайных выборок, образуют своеобразный *квантовый спектр*, где все множество относительных частот, присутствующих в заданной выборке, распределяется по небольшому числу дискретных уровней. Каждый уровень содержит определенное число "частиц" (относитель-



a



b

Рис. 3

тельные частот, полученное для коротких выборок, преобразуется в гистограмму? Можно ожидать, что для коротких выборок число относительных частот является малой величиной. Мы можем проанализировать, по крайней мере, два предельных случая в их расположении по отношению к вертикальной оси. Каждая относительная частота имеет свое и вполне определенное значение. В другом предельном случае все, без исключения, частоты локализируются на одном горизонтальном уровне и имеют лишь одно значение. Такая предельная ситуация может соответствовать равномерному распределению. Для самых разнообразных случайных рядов, мы нашли, что гистограммы, вычисленные для коротких случайных выборок, образуют своеобразный *квантовый спектр*, где все множество относительных частот, присутствующих в заданной выборке, распределяется по небольшому числу дискретных уровней. Каждый уровень содержит определенное число "частиц" (относитель-

ных частот), разделенных друг от друга "энергетической щелью" (промежутком) между уровнями. Рис. 3а и 3б отображают КГ, полученные для выборки, изображенной на Рис. 1 для $K=200$. Рис. 3б соответствует упорядоченной КГ и число уровней может служить некой "универсальной" характеристикой при анализе коротких отрезков случайных рядов. Можно определить эту характеристику как *число квантованных уровней* (ЧКУ) для заданной гистограммы.

Здесь мы должны отметить, что для большинства проанализированных случайных рядов увеличение длины выборки L приводит к разрушению КГ, т.е. каждая частота имеет тенденцию иметь свое "собственное значение". В этом случае можно говорить о непрерывном спектре относительных частот, который характеризуется величиной ЧКУ \cong СКН. Другими словами, случай непрерывного спектра соответствует образованию огибающей рассматриваемой гистограммы. Поучительно также исследовать зависимость ЧКУ(K) для выборок, имеющих различные длины.

С этой целью мы сформировали отрезки случайных рядов для исходного шума длины $L=400$ и сравнили зависимости ЧКУ(K). Соответствующие графики показаны на рис. 4а.

Можно отметить следующие особенности этого графика:

1. В начале этого графика мы наблюдаем гистограмму, когда ЧКУ $\sim K$ и каждое разбиение (колонка гистограммы) имеет свою собственную частоту. Эту начальную стадию можно определить как *предквантовое состояние*-ПКС.

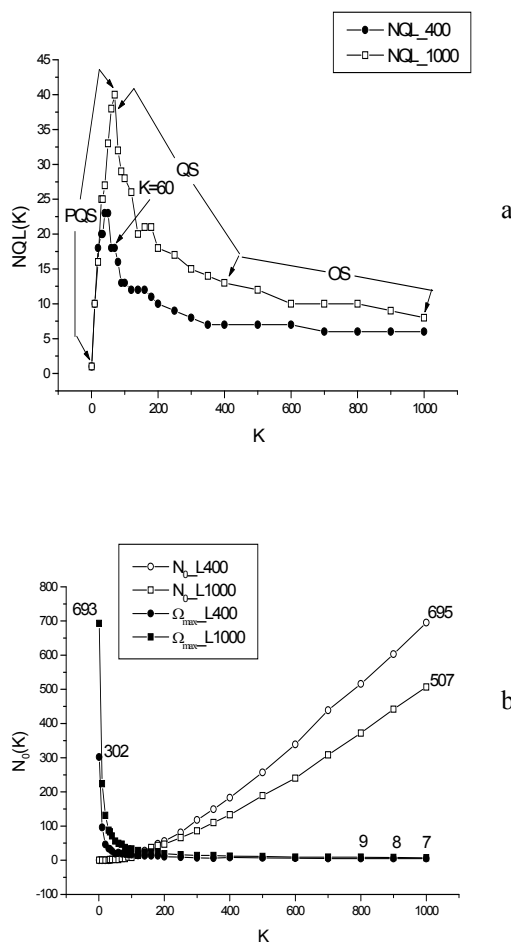


Рис. 4

2. Затем после достижения максимального значения $K \cong 40$ некоторые точки начинают образовывать локальные отрезки с одинаковыми значениями частот. Нормальный квантовый спектр образуется при $0.5 \leq K/L \leq 0.8$. Пределы этого отношения были определены эмпирически при анализе широкого класса случайных рядов самой различной природы. Это состояние может быть определено как *квантовое состояние* - КС.

3. При $K/L \geq 1$ ЧКУ вместе с величиной максимальной частоты имеет тенденцию к уменьшению и локализуется в пределах: $3 < NQL < 10$. Это состояние (хвосты графика) можно определить как *пересыщенное состояние*-ПС. Эти три стадии показаны на рис. 4а.

ПС характеризуется большим количеством нулевых частот. Полезно также показать график зависимости нулевых и максимальных частот как функцию параметра разбиения K . Эти величины также могут служить некоторыми "универсальными" характеристиками; их зависимость от K представлена на рис. 4б. На практике лучше всего использовать КС, которое имеет достаточное ЧКУ с ясно выраженными промежутками между ними. Стрелка на рис. 4а при $K = 60$ соответствует КГ для длины выборки $L = 400$. Это значение K будет использовано ниже для построения КГ, соответствующих различным сейсмограммам.

Эталонный шум и детектирование неясных неустойчивостей

Упорядоченную квантовую гистограмму мы определим как функцию $E(n, N_k, \Omega_k)$, где параметр n соответствует ЧКУ, N_k определяет число относительных частот, локализованных на k -ом уровне, а Ω_k соответствует значению частоты k -го уровня. Эта функция служит своеобразным отпечатком пальца и характеризует отрезок анализируемого случайного ряда. При выбранной величине K (число разбиений, определенных в области КС) мы можем получить спектр КГ для заданной длины L . Можно сравнить КГ, имеющие одинаковую длину L , но описывающие статистически различные отрезки (окна). Для того, чтобы отличать КГ, полученные для различных окон, можно определить их флуктуационный спектр соотношением

$$\langle E \rangle \pm \sqrt{\langle (\Delta E)^2 \rangle} \quad (1)$$

Здесь $\langle E \rangle = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W E_i$, среднее значение квантованных спектров, полученное

усреднением по заданному числу сегментов W ($l=1,2,\dots,W$); $\sqrt{\langle (\Delta E)^2 \rangle}$ среднее значение их флуктуаций. Можно определить *эталонный шум* (ЭШ), для которого $\sqrt{\langle (\Delta E)^2 \rangle} = 0$. Это требование означает, что эталонный шум остается неизменным для большого числа отрезков случайного ряда. Концепция ЭШ может сыграть существенную роль в детектировании скрытых неустойчивостей и сверхслабых сигналов.

На практике весьма затруднительно реализовать идеальный ЭШ с нулевыми флуктуациями на большом числе отрезков случайного ряда, но модельные эксперименты показывают, что для обнаружения сверхслабых сигналов можно предложить "шумовую" линейку, т.е. использовать усредненную КГ, имеющую минимальную дисперсию. Флуктуационная "вилка", вычисленная для "нор-

мального" отрезка случайного ряда может быть использована в качестве чувствительного детектора для обнаружения скрытых неустойчивостей, присутствующих в заданной случайной выборке, и для сравнения КГ различных отрезков случайных рядов одинаковой длины L друг с другом. Это сравнение позволяет выявить статистически значимые различия отрезков случайного ряда, выходящие за пределы флуктуационной "вилки", и выявить отрезки случайных рядов не содержащие статистически значимых различий, которые попадают внутрь флуктуационной "вилки", построенной для невозмущенного шума.

Применение квантованных гистограмм к предсказанию землетрясений

Представляется заманчивым применить метод КГ к предсказанию землетрясений. Эта проблема является наиболее "горячей" в современной сейсмологии и поэтому в настоящее время существует несколько подходов для ее решения. Мы отметим работы [15, 16]. Важные факты, связанные с современными подходами и пониманием механизма землетрясений, обсуждаются в обзоре [17]. Можно проверить идею, высказанную в работах [6-8], о возникновении о диночной ударной волны натяжения, которая *предшествует* основному землетрясению. Если, действительно, такая ударная волна-предвестник существует, то статистические свойства шума вблизи основного сигнала должны отличаться от исходного шума, удаленного от основного сигнала. Такая одиночная ударная волна должна отсутствовать для техногенного взрыва, полученная в условиях спокойной (ненапряженной)

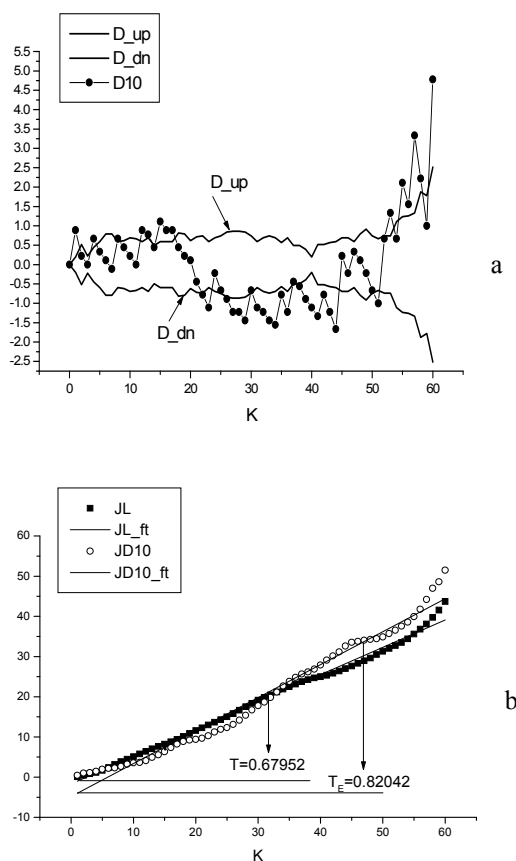


Рис. 5

Земли. Для возможного детектирования одиночных ударных волн, предшествующих землетрясению, мы отобрали 12 локальных землетрясений и 5 техногенных взрывов, которые были любезно предоставлены автору национальной лабораторией геофизики и сейсмологии (Амман, Иордания). Статистическая обработка реальных данных осуществлялась следующим образом:

1. Из каждой сейсмограммы извлекался предшествующий "шум", который содержал в среднем 2000-6000 зарегистрированных точек. Реальный временной шаг между точками соответствовал интервалу 0.05 sec. Затем все сейсмограммы сдвигались в положительную полуплоскость и нормировались на единицу.

2. Затем, полученная таким образом, шумовая дорожка была разделена на десять частей. Для первых 9 частей мы рассчитывали КГ (число разбиений $K = 60$) и флуктуационный спектр в соответствии с выражением (1). Для последней десятой части шумовой дорожки мы рассчитали разность $\Delta E = E_{10} - \langle E \rangle$. Если эта разность преимущественно локализована внутри "вилки", определяемой как $2 \cdot \sqrt{\langle (\Delta E)^2 \rangle}$, то можно считать, что последняя часть

статистически эквивалентна прежним девяти частям. Если же разность ΔE выходит за пределы "вилки", то можно считать, что эта часть отрезка случайного ряда является статистически значимой и содержит скрытую ударную волну. Прежде чем применить эту идею к реальным сейсмологическим данным и увидеть статистически значимые различия, мы усреднили КГ и вычислили средние параметры по формуле (1) для десяти отрезков заданной шумовой дорожки. Затем мы искусственно добавили возмущение в виде уединенной волны. Начиная с амплитуды $a \geq 0.1$, величина ΔE начинает выходить за пределы флуктуационной вилки. Это может служить указанием, что скрытая уединенная волна может быть обнаружена статистически для амплитуд $a \geq 0.1$.

3. Для количественного сравнения результатов, полученных для различных отрезков, мы заметили, что численное значение интеграла взятое от величины $\sqrt{\langle (\Delta E)^2 \rangle}$ может быть с хорошей точностью заменено прямой линией

$$\int_1^K \sqrt{\langle (\Delta E_K)^2 \rangle} dK \cong T \cdot K + B. \quad (2a)$$

Подобная аппроксимация может быть использована для численной оценки интеграла от модуля отклонения ΔE

$$\int_1^K |\Delta E_K| dK \cong T_E \cdot K + B_E. \quad (2b)$$

Поэтому для количественной оценки статистической эквивалентности можно использовать следующий критерий:

Если $T_E < T$, то можно считать, что рассматриваемый отрезок шумовой дорожки является статистически эквивалентной. На рис. 5a изображена флуктуационная "вилка", созданная девятью предшествующими сегментами. Рис. 5b показывает применение приближений (2), использованное для количественной оценки. В противном случае, когда $T_E > T$ шумовая дорожка может рассматриваться как статистически значимая и содержит скрытый слабый сигнал или

уединенную ударную волну, предшествующую главному "событию". Вычисленные параметры T_E , B_E и T , B для 12 случайно выбранных землетрясений и 5 техногенных взрывов представлены в Таблице 1. Интересно отметить, что гипотеза о статистической значимости участка шумовой дорожки, предшествующей землетрясению действительно находит свое подтверждение. Для 10 землетрясений КГ выходит за пределы флуктуационного спектра, созданного предыдущими 9 случайными выборками. Для 5 техногенных взрывов мы наблюдаем противоположную картину. Отклонение $\Delta E_{10} = E_{10} - \langle E \rangle$ десятого отрезка не выходит за пределы "вилки" и статистически эквивалентно предыдущим девяти выборкам. Мы нашли только два исключения из этой гипотезы. Отклонения 11-го и 12-го землетрясений остаются в пределах флуктуационной "вилки". Такую аномалию можно объяснить, по крайней мере, двумя причинами: а) изначальные данные были ошибочно перепутаны; б) амплитуда ударной волны меньше порога чувствительности ($a < 0.1$) или предвестник выходит за пределы десятого отрезка и статистически "размывается".

Таблица 1

Files	T	T_E	B	B_E	Comments
JEQ_1	0.67952	0.82042	-1.68559	-4.82311	$T_E > T$
JEQ_2	0.73708	0.76339	-31.57062	-29.56393	$T_E > T$
JEQ_3	0.75308	0.91596	-11.48898	-18.47552	$T_E > T$
JEQ_4	0.73312	0.81903	-4.95874	-6.52342	$T_E > T$
JEQ_5	0.72645	0.81802	-3.40843	-4.94392	$T_E > T$
JEQ_6	0.44743	0.50968	-2.63421	-2.48531	$T_E > T$
JEQ_7	0.59915	0.72667	-3.96177	-5.66896	$T_E > T$
JEQ_8	0.64084	1.16213	-3.22377	-7.43761	$T_E > T$
JEQ_9	0.42329	0.57707	-1.39011	-3.95681	$T_E > T$
JEQ_10	0.83151	1.62177	-3.55272	-9.98196	$T_E > T$
JEQ_11	0.65631	0.37646	-5.22675	-1.42599	$T_E < T$
JEQ_12	0.55945	0.38859	-3.45481	-1.66579	$T_E < T$
TEXP_1	0.50665	0.49119	-2.18093	-3.85681	$T_E < T$
TEXP_2	0.81304	0.58351	-2.79833	-1.65656	$T_E < T$
TEXP_3	0.33658	0.28029	-1.78201	-1.61179	$T_E < T$
TEXP_4	0.80959	0.78829	-4.80265	-6.64231	$T_E < T$
TEXP_5	0.74089	0.49998	-3.90048	-2.07475	$T_E < T$

Результаты применения метода КГ, полученные для детектирования предвестников землетрясений могут рассматриваться как предварительные. Для более углубленного анализа необходимо иметь более надежную статистику, связанную с оптимальным выбором величин K и L для сейсмограмм, представляющих землетрясения различной силы и полученными из различных источников.

Литература

1. J.-C. Anifrani, C. Le Floc'h, D.Sornette and B. Souillard, "Universal log-periodic correction for rupture stress prediction from acoustic emissions." *J. Phys. I France*, **5**, 631, (1995).
 2. Y. Huang, G. Ouillon, H. Saleur, and D. Sornette, "Spontaneous generation of discrete scale invariance in growth models." *Phys. Rev. E*, **55**, 6433, (1997).
 3. D. Stauffer, D.Sornette, "Log-periodic oscillations for biased diffusion on random lattice." *Physica A*, **252**, 271, (1998).
 4. P. Jogi and D. Sornette, "Fine structure and complex exponents in power-law distributions from random map." *Phys. Rev.E*, **57**, 120, (1998).
 5. A. Johansen, D.Sornette, "Evidence of discrete scale invariance in DLA and time-to-failure by canonical averaging". *Int. J. of Mod. Phys C*, **9**, 433, (1998).
 6. Y. Huang, H. Saleur, C. Sammis and D. Sornette, "Precursors, aftershocks, criticality and self-organized criticality." *Europhys. Lett.*, **41**(1), 43, (1998).
 7. M.W.Lee and D.Sornette, "Novel mechanism for discrete scale invariance in sandpile models." *Eur. Phys. J. B* **15**, 193, (2000).
 8. M.W. Lee, D. Sornette, and L. Knopoff, "Persistence and quiescence of seismicity on fault systems." *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 4219, 1999.
 9. D. Sornette, "Discrete-scale invariance and complex dimensions." *Physics Reports*, **297**, 239, (1998)
 10. R.Yulmetiev, P. Hanggi, F. Gafarov, "Stochastic dynamics of time correlation in complex systems with discrete current time." *Phys.Rev.E*, **62**, 6178, 2000.
 11. R.R. Nigmatullin, Recognition of nonextensive statistical distributions by the eigen-coordinates method, *Physica A*, **285**, 547, (2000).
 12. C. Tsallis, "Nonextensive statistics: theoretical, experimental and computational evidences and connections." *Braz. J. Phys.*, **29**, 1, (1999).
 13. R.R. Nigmatullin, "Eigen-coordinates: new method of analytical functions identification in experimental measurements." *Appl. Magn. Resonance* **14**, 601, (1998).
 14. П.В. Новицкий, И.А. Зограф, *Оценка погрешностей результатов измерений*, Ленинград, "Энергоатомиздат", (1985).
 15. D.Sornette, Ch. G. Sammis, "Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: implications for earthquakes predictions." *J. Phys. I France*, **5**, 607, (1995).
 16. D.D. Bowman, G. Ouillon, C.G. Sammis, A. Sornette, and D. Sornette, "An observational test of the critical earthquake concept", *J. of Geophys. Research*, **103**, 24, 359, (1998).
 17. D. Sornette, "Earthquakes: from chemical alteration to mechanical rapture." *Phys. Reports*, **313**, 237, (1999).
-

СЕКЦИЯ 4
БИОФИЗИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА МИТОЗ У СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ
(PINUS SYLVESTRIS L.)

Буторина А.К., Миронов А.Н., Панкратьева Е. А., Левин М.Н.

*Воронежский госуниверситет, физический факультет, Воронеж 393693,
e - mail: levin@lev.vsu.ru*

В последнее время электромагнитные излучения антропогенной природы приобретают значение экологического фактора. И эта проблема становится международной. В научной литературе появился даже термин «энергетическое загрязнение среды». В литературе широко обсуждается действие электромагнитных излучений на биологические объекты и человека. Это в основном исследования, которые показывают, что существуют два механизма воздействия электромагнитных излучений (ЭМИ) на биологические системы: возбуждение нервных клеток и клеток тканей, а также нагрев тканей организма за счет поглощения ими энергии поля (1). Одна из важнейших проблем – это изучение генетических последствий воздействия электромагнитных полей (ЭМП). Литературные данные очень противоречивы. Одни авторы утверждают, что существует мутагенный эффект ЭМП, другие утверждают обратное. Например, были выявлены слабые мутагенные изменения в половых клетках самцов мышей при действии микроволн (2). При изучении влияния импульсного магнитного поля (ИМП) на мутационный процесс у самцов и самок дрозофилы в потомстве было обнаружено достоверное увеличение частоты ранних леталей и суммарных частот доминантных леталей по сравнению с контролем при воздействии импульсных магнитных полей напряженностью 0,012 Тл с частотой повторения 0,1 Гц (3). В культуре ткани сердца эмбриона курицы, помещенной в магнитное поле, обнаруживали атипичные клетки, иногда многоядерные и гигантских размеров (4). Таким образом, необходимо признать, что механизм влияния ЭМП на генетический аппарат клетки слабо изучен и нельзя не согласиться, что электромагнитные поля требуют тщательных исследований.

Поэтому, целью настоящей работы была оценка характера влияния импульсных электромагнитных полей (ИЭП) с разным временем экспозиции на митоз у сосны обыкновенной, поскольку митоз – это фундаментальный процесс в онтогенезе организмов. Митозом определяется рост организма и он играет важную роль при дифференциации генеративной ткани. Все события митоза генетически детерминированы. В задачи исследований входило:

1) определить уровень митотической активности клеток меристемы корешков проростков обработанных ИЭП в 3 различных режимах; 2) определить

частоту и спектр нарушений митоза, отражающих уровень мутационного процесса; 3) определить весь возможный спектр цитогенетических аномалий под воздействием ИЭП.

Материал и методика

Материалом для исследования служили семена сосны обыкновенной, собранные осенью 2000 г. в Усманском бору (Воронежский лесхоз). Из 4 фракций семян, 3 обрабатывали ИЭП в различных режимах. Одна фракция использовалась как контроль. Воздействовали ИЭП частотой 50 Гц, при длительности следования импульсов ~ 20 мкс и максимальной индукции поля 0,08 Тл в течение 6 с, 22 с. и 2,5 мин (I, II и III режимы). После обработки семена (по 50 штук в каждой фракции) высевали для прорастивания). Проростки длиной 0,7- 1 см фиксировали в 9 утра по зимнему времени в ацетоалкоголе. Готовили постоянные давленные микропрепараты по стандартной методике. Просмотр микропрепаратов и микрофотосъемку проводили на микроскопе LABOVAL-4 (Carl Zeiss, Jena).

Исследовали следующие цитогенетические характеристики проростков семян: митотическую активность (МА), а так же уровень и спектр патологий митоза (ПМ). О митотической активности судили по митотическому индексу (МИ), который определяли (в пик митотической активности в 9 ч. по зимнему времени) как долю делящихся клеток от общего числа учтенных меристематических клеток (%); ПМ подсчитывали как отношение числа клеток с нарушениями митоза к общему числу делящихся клеток (%). ПМ классифицировали по Алову (1965) (5). Всего было проанализировано свыше 18000 клеток.

Результаты и обсуждение

Спектр патологий митоза у сосны в контроле был представлен: отставанием хромосом в метакинезе и анафазе, мостами. При изучении микропрепаратов, изготовленных из обработанных ЭИП проростков, были выявлены следующие патологии митоза: мосты (в том числе и сложные), отставание хромосом в метакинезе и анафазе, агглютинация и амитозоподобные структуры (см. рис. 1). Необходимо отметить, что при I режиме обработки были выявлены мосты и отставание хромосом в метакинезе и анафазе, а во II и III режимах – мосты, отставание в метакинезе и анафазе, агглютинация хромосом в анафазе и метафазе. Наблюдалось достоверное ($P < 0,05$) снижение МИ (см. рис. 2) в опыте – $6,5 \pm 0,7$ % (II реж.), $6,4 \pm 0,9$ % (III реж.) при $10,1 \pm 0,4$ % -- в контроле (I реж. не отличался от контроля); повышение уровня ПМ (см. рис. 3) при втором и третьем режимах обработки семян по сравнению с контролем ($4,4 \pm 0,7$ %, $7,2 \pm 3,0$ % и $1,5 \pm 0,1$ % в контроле соответственно). Нами также были отмечены случаи амитозоподобных структур в опыте, при III режиме обработки их больше, чем при II (II режим – $0,3 \pm 0,1$ %, III режим – $3,0 \pm 0,6$ %) (см. рис. 4). При сравнении режимов выявлено различие по МИ и уровню ПМ между I режимом и II и III (II и III не отличаются), при II и III режимах обработки процент патологий выше, чем при I ($4,4 \pm 0,7$ %, $7,2 \pm 3,0$ % и I режим – $1,8 \pm 0,2$ %), однако, нет достоверных различий по ПМ между II и III режимами. Таким образом, воздей-

ствии ИЭП вызывает увеличение ПМ, появление «амитозоподобных» структур, депрессию МА и агглютинацию хромосом при напряженности ИЭП 0,08 Тл и экспозиции свыше 6 сек.

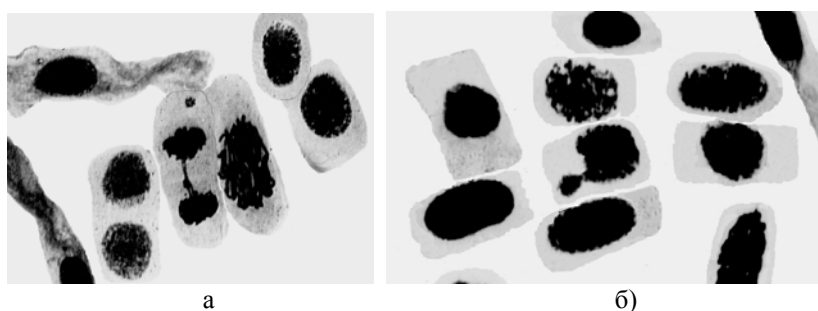


Рис. 1. Цитогенетические нарушения в митозе образующиеся в результате воздействия импульсных электромагнитных полей на сухие семена сосны обыкновенной: а) сложный мост в анафазе; б) амитозоподобное ядро (увеличение – $40 \times 1,5 \times 7$)

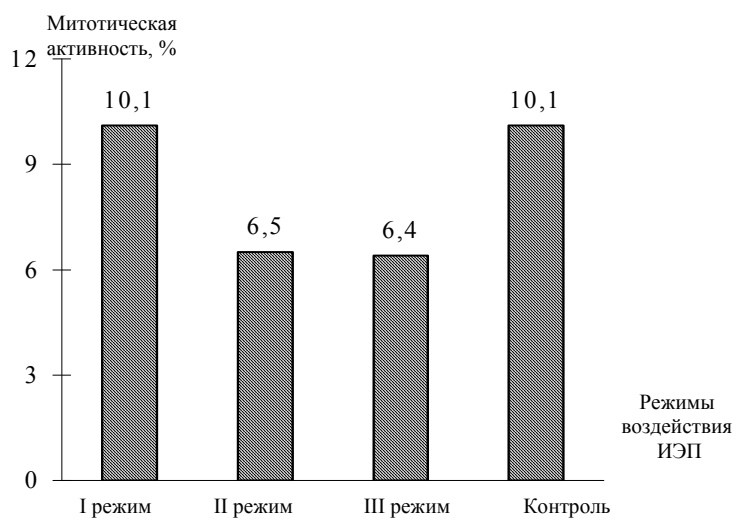


Рис. 2. Изменение митотической активности при разных режимах обработки семян ИЭП

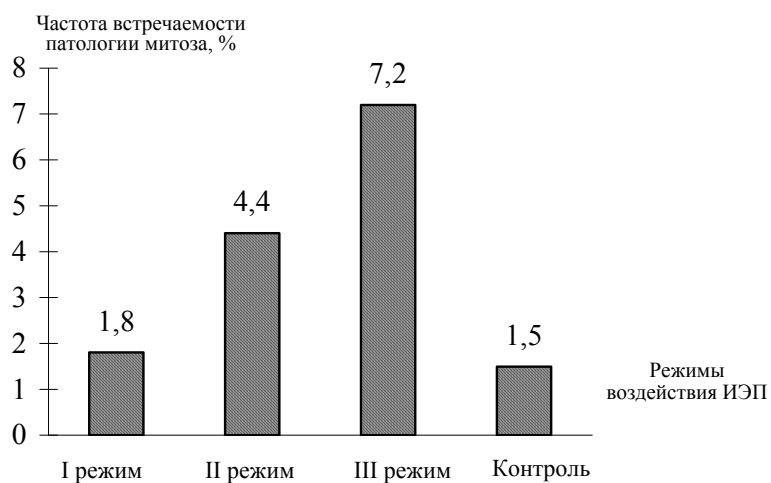


Рис. 3. Изменение частоты встречаемости патологии митоза при разных режимах обработки семян ИЭП



Рис. 4. Частота встречаемости клеток с «амитозоподобными» структурами (в контроле и первом режиме их не было обнаружено)

Нами также было установлено, что уровень клеток с амитозоподобными структурами возрастает со временем воздействия ИЭП. Появление таких структур свидетельствует о тенденции к замене нормального митотического деления,

на амитоз, более характерный для дегенерирующих тканей и нередко наблюдающийся в раковых опухолях. Первый режим (0,08 Тл, 6 сек обработки) не отличается от контроля по всем показателям, однако всхожесть семян была выше, чем в контроле, поэтому I режим можно считать стимулирующим. Понижение митотической активности отражает снижение уровня метаболических процессов в клетках, обеспечивающих в частности рост растения и темпы его развития. Увеличение уровня ПМ является результатом воздействия ИЭП. Появление агглютинации хромосом в метафазе и анафазе может быть следствием уменьшения связи гистонов с ДНК, а это делает ДНК хроматина более доступной для ДНК-азы (6), что может способствовать возникновению структурных перестроек хромосом. «Амитозоподобные» структуры могут служить иллюстрацией нарушений контроля начальных этапов митоза. При амитозе хромосомы и характерные для митоза структурные изменения в клетке не обнаруживаются, веретено не образуется, ядерная оболочка не разрушается. Было показано, что лопастная форма ядра вместо шаровидной, нормальной для клеток корня лука, получается из-за дезорганизации веретена в результате действия колхицина и вследствие этого не закономерного перемещения хромосом (7). Поэтому, мы можем предположить, что замена митоза на амитоз следствие нарушения деления, а именно дезорганизация веретена деления (на что косвенно указывает и появление агглютинации хромосом). Меньшее время обработки семян, а именно 6 секунд, оказывает стимулирующее действие на всхожесть.

Выводы

Воздействие ИЭП вызывает увеличение ПМ, появление амитозоподобных структур, незначительную депрессию МА и агглютинацию хромосом. При изучении микропрепаратов из корешков проростков семян сосны были выявлены следующие патологии: мосты (в том числе и сложные), отставание хромосом в метакинезе и анафазе, агглютинация и «амитозоподобные» структуры. Установлено, что частота и спектр патологий митоза при различных режимах обработки семян сосны ИЭП различаются. При I режиме обработки были выявлены мосты и отставание хромосом в метакинезе и анафазе, а во II и III режимах – мосты, отставание в метакинезе и анафазе и агглютинация хромосом в анафазе и метафазе. Было показано, что уровень клеток с амитозоподобными структурами возрастает со временем воздействия ИЭП. Время экспозиции не более 6 секунд, оказывает стимулирующее действие на всхожесть. В связи с этим существенный интерес представляет возможность использования ИЭП для стимулирования биологических процессов у сельскохозяйственных и лесных объектов, в частности для увеличения всхожести семян и энергии роста молодых растений. Поэтому можно сделать вывод о возможном мутагенном эффекте ИЭП при напряженности 0,08 Тл и экспозиции свыше 6 сек.

Литература

1. Холодов Ю. А. Реакции нервной системы на электромагнитные поля. – М.: Наука, 1975. – 208 с.
 2. Давыдов Б. И., Тихончук В. С., Антипов В. В. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 176 с.
 3. Зими́на Н. В., Бе́ляцкая О. Я., Кузнецова И. В., Труханов А. К. Изучение влияния импульсного магнитного поля на частоту доминантных летелей у
-

самок и самцов дрозофилы // Эколого - генетические последствия воздействия на окружающую среду антропогенных факторов: тез. докл. I - ого Всесоюзного Координационного совещания. – Сыктывкар, 1989. – С. 62

4. Холодов Ю. А. Влияние электромагнитных полей на центральную нервную систему. – М.: Наука, 1966. – 283 с.

5. Алов И.А. Цитофизиология и патология митоза. – М.: Медицина, 1972. – 264 с.

6. Новиков В. В., Кувечкин В. В., Фисенко Е. Е. Структурно-функциональные изменения белков в водных растворах под действием слабых комбинированных, постоянных и переменных электромагнитных полей // Тез. докл. 2-ого съезда биофизиков России. – М., 1999, Т. 3. – С. 822 – 823

7. Бродский В. Я., Урываева И. В. Клеточная полиплоидия. Пролиферация и дифференцировка.–М.: Наука, 1981.–260 с.

ПОВЫШЕНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ГЕНОМА ПОТОМСТВА САМЦОВ МЫШЕЙ, ПОДВЕРГНУТЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ НИЗКОИНТЕНСИВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ¹³⁷CS

Безлепкин В.Г., Васильева Г.В., Ломаева М.Г., Сирота Н.П., Газиев А.И.

*Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН
Пуццо, Московской обл., 142290, Россия*

Поля ионизирующей радиации (ИР), являясь составным компонентом природного радиационного фона планеты и околоземного пространства, обычно рассматриваются в биосферных исследованиях как нормальный экологический фактор. Бурное развитие атомной энергетики и создание ядерного оружия своим побочным эффектом имели радиоактивное загрязнение обширных регионов со значительной численностью населения. Это обстоятельство требует специального учета по широкому кругу вопросов экологического, популяционно-демографического и социально-экономического прогнозирования.

Результаты эпидемиологических и экспериментальных исследований позволяют предполагать возможность возникновения нестабильности генома (НСГ) у потомства родителей, подвергавшихся воздействию ИР. Эта НСГ, прежде всего, проявляется повышением темпов мутирования и увеличением риска возникновения опухолевых и других патологий у потомства [1–3]. Предполагается, что повышенный уровень НСГ в соматических клетках потомства, является результатом реализации нерепарированных или ошибочно репарированных повреждений генома половых клеток родителей [2, 4–6]. До недавнего времени оценки частоты мутаций в половых клетках и возможности трансмиссии НСГ в соматические клетки потомства у человека и животных после воздействия малых доз ИР, в значительной мере базировались на экстраполяции эффектов больших доз, что весьма уязвимо для критики. Результаты эпидемиологических наблюдений за большой когортой детей, родившихся от родителей, переживших атомные бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, по сей день остается предметом противоречивых суждений [7–9]. Что касается экспериментальных исследова-

ний, то для определения частоты мутаций, индуцируемых малыми дозами в однокопийных генах, требуются десятки тысяч животных [10]. В этой связи для оценки генетического риска ИР представляются весьма перспективными подходы с использованием в качестве генетических маркеров повторяющихся последовательностей генома, таких как гипервариабельные микро- и минисателлиты [11, 12]. Результаты экспериментальных [13–15], и эпидемиологических [16]. исследований с применением методов геномной дактилоскопии в пересчете на дозу ИР существенно отличаются от данных, полученных на Японской когорте [9, 16] и принимаются специалистами неоднозначно [7, 9]. Тем не менее, они указывают на необходимость пересмотра представлений о генетических последствиях хронического воздействия малых доз низкоинтенсивной ИР и продолжения работ по созданию более чувствительных тест-систем для оценки генетического риска.

Поиски методического подхода, адекватного задаче экспериментального определения НСГ, индуцированной малыми дозами низкоинтенсивного излучения, привели нас к одному из вариантов полимеразной цепной реакции (ПЦР), где в качестве матрицы используется тотальный препарат геномной ДНК и один, "случайно выбранный", праймер (метод AP-PCR) [17, 18]. Продукты AP-PCR в основном представлены простыми повторяющимися последовательностями типа микро- и минисателлитов [17, 18]. Набор полиморфных продуктов стабильно воспроизводится при строгом соблюдении условий AP-PCR, отражает индивидуальную и видовую специфику организма [19], и по некоторым данным, может быть использован для оценки уровня индуцированного мутагенеза в соматических и половых клетках человека и животных [6, 20, 21].

Изложенные обстоятельства, определяют цель настоящего исследования как попытку прямой экспериментальной оценки уровня генетической вариабельности в геноме потомства самцов мышей, облученных низкоинтенсивным гамма-излучением в малых (до 50 сГр) дозах, на основе анализа полиморфизма продуктов, генерируемых в AP-PCR.

Материалы и методы

В экспериментах использованы двухмесячные мыши линии BALB/c из питомника ФИБХ РАН (Пушино): 4 группы самцов и 4 группы самок, по 10 животных в группах. Три группы самцов подвергались хроническому воздействию γ -радиации (^{137}Cs) в дозах 10 сГр, 25 сГр и 50 сГр, соответственно, при мощности дозы 1сГр/сутки. Контрольные самцы (4-я группа) и все 4 группы необлученных самок содержались в аналогичных условиях, только с нормальным естественным радиационным фоном. За 3 дня до начала облучения у самцов брали образцы ткани кончика хвоста, обрезая по 3–4 мм. Через 15 сут после окончания облучения самцов всех четырех групп спаривали в отдельных клетках с необлученными самками. Через 2 недели самцов убивали от самок, собирали в исходные группы и брали повторно биопсию ткани хвоста. Самки оставались в отдельных клетках, где появлялось потомство. Регистрировались число и пол потомков F_1 поколения каждой пары животных. Через два месяца у всех потомков и у самок взяли пробы ткани хвоста. Препараты ДНК из ткани хвоста получали как описано [14] и хранили при $-20\text{ }^\circ\text{C}$ под этанолом. После предварительного тестирования 20 различных олигонуклеотидов в качестве "случайного праймера" для AP-PCR был выбран 20-мерный олигодезоксинуклеотид 5'-TGG TGT TCC TGC CAC AGA AA-3', который является фрагментом последовательности,

фланкирующей микросателлитный локус *Atp1b2* в окрестностях гена *p53* на 11-й хромосоме мышей [22]. AP-PCR выполнялась с соблюдением условий, рекомендованных в работах [23, 24], на термоциклере MiniCycler PTC-150 (MJ Research, Inc.) в течение 35 циклов в режиме: 1 мин при 95°C, 1 мин при 53°C, 5 мин при 70°C. Реакционная смесь содержала 67 мМ трис-HCl (pH 8,8), 16 мМ (NH₄)₂SO₄, 0,01% твин-20, 4 мМ MgCl₂, по 200 мкМ каждого из четырех dNTP, 0,2 мкМ праймера, 0,75 ед. *Taq*-полимеразы (Promega Corp.), 2 нг исследуемой ДНК и 15 мкл минерального масла. Продукты ПЦР были разделены электрофорезом в 6%-ном полиакриламидном геле (ТАЕ-буфер, pH 8.0; 200 V; 2,5 часа) и визуализированы окраской азотнокислым серебром по методу [25]. Гели сканировались сканером HP ScanJet 3p (Hewlett Packard) и оцифровывались с применением программы WinDig 2.5. С использованием программ Excel и SigmaPlot определяли значения подвижности полос (R_f) и соответствующих им размеров продуктов ПЦР в диапазоне от 872 п.о. до 281 п.о., где показано наилучшее разрешение и воспроизводимость полос. Для корректного сравнения ДНК-фингерпринтов на разных гелях был разработан собственный вариант программного обеспечения [26]. Количественный анализ спектров полиморфных продуктов позволил оценить уровень генетической вариабельности у потомства облученных самок мышей по трем параметрам: 1 - среднее число полос на одно животное; 2 - доля полос в рамках условных "классов"; 3 - средняя частота «неродительских» полос на одного потомка.

Результаты и обсуждения

Наблюдавшиеся колебания числа животных в помете в пределах 10-17% от среднего значения (данные не приводятся), по-видимому, не являются следствием воздействия малых доз ИР на самцов-родителей, и отражают, скорее, естественную вариабельность этого параметра. Вместе с тем, с повышением дозы облучения самцов-родителей отмечено увеличение соотношения численности самцов и самок в F₁ поколении до величины 1,25 у потомства самцов, облученных в дозе 50 сГр. Это не согласуется с результатами работ [27-29], где не было выявлено изменений в соотношении полов. Нельзя исключить, что на определяемый в экспериментах "половой индекс" влияют размер выборки животных и условия их содержания. Однако следует отметить, что в отличие от наших данных, в цитируемых исследованиях, облучение самцов-родителей в дозах 1-3 Гр, приводило к существенному снижению количества животных в помете [28, 29], что указывает на формирование в половых клетках летальных повреждений. Отсутствие в литературе данных, полученных с использованием различных доз и мощностей доз ИР, оставляет пока открытым вопрос об изменении соотношения полов в потомстве облученных самцов-родителей.

Основными результатами наших экспериментов являются удачный подбор "случайного праймера" и обнаружение повышенной вариабельности продуктов AP-PCR, генерируемых на ДНК потомства самцов-мышей, облученных малыми дозами ИР за 15 дней до спаривания. При указанных условиях на ДНК-фингерпринтах, удастся регистрировать до 75 амплифицированных продуктов, часть из которых обнаруживает свойства полиморфных генетических маркеров. Для машинного анализа мы использовали участки фингерпринтов в диапазоне величин продуктов от 872 до 281 п.о.. Сканограммы отдельных дорожек на рисунке 1 демонстрируют различия в количестве и интенсивности полос (соответствующих дискретным по размеру типам продуктов) в спектре продуктов ПЦР

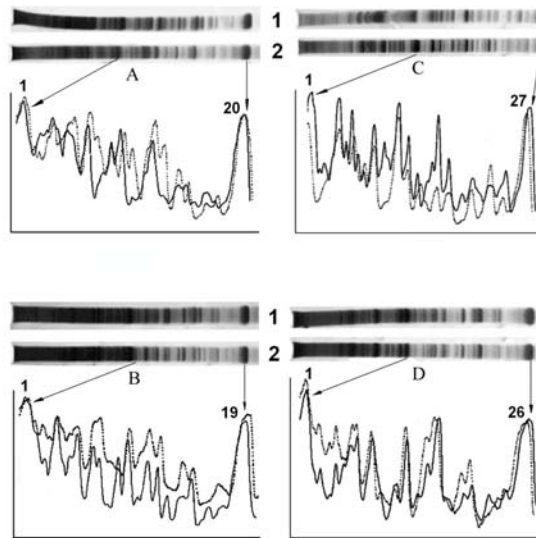


Рис.1 Сканогаммы фингерпринтов продуктов AP-PCR на ДНК-матрице ткани хвоста мышей. Показаны: наверху - фингерпринты самца-родителя (1) и одного из его потомков (2); внизу - сканогаммы участков фингерпринтов в диапазоне от 872 п.о. до 281 п.о. (сплошная линия - самец-родитель, прерывистая - потомство). Номерами на сканогаммах потомков отмечены первый и последний пики, соответствующие полосам анализируемого диапазона. **A**, контрольная группа; **B**, **C**, и **D**, группы, облученные в дозах 10 cГр, 25 cГр, и 50 cГр, соответственно.

облученного самца-родителя и его потомства. Число полос было использовано для расчетов количественных параметров генетической variability у потомства. В частности, выявлено повышение на 30-50% ($p < 0.01$) среднего числа полос в пересчете на одно животное на фингерпринтах потомства самцов, облученных в дозе 25-50 cГр, по сравнению с таковым у потомства контрольных самцов (табл. 1). Для общей оценки изменения спектра амплифицированных продуктов была определена доля полос в каждом из пяти равных по длине отрезков («классов») в пределах участка фингерпринтов от 872 до 281 п.о. (рис.2). Такой способ представления результатов не только показывает изменение количества маркерных полос у потомства облученных самцов, по сравнению с контрольными животными, но и выявляет тенденцию их перегруппировки по размерам на анализируемом участке фингерпринта, а именно, увеличение размера дополнительных продуктов AP-PCR на ДНК-матрице потомства самцов, облу-

ченных в дозе 25 сГр (рис.2). В таблице 2 показаны результаты количественного анализа варибельности продуктов AP-PCR как средней частоты полос на ДНК-фингерпринтах, отсутствующих у обоих родителей, но имеющих у их потомков (частоты "неродительских полос"). Полученные данные демонстрируют повышение полиморфизма (приращение по отношению к контрольной группе) на 13% и 37% после хронического облучения в дозах 10 сГр и 25 сГр, соответственно (табл. 3). Различия, выявляемые у потомков облученных и контрольных животных, дают нам основание рассматривать этот показатель как один из наиболее приемлемых для оценки радиационно-индуцированной НСГ и допускают возможность трансмиссии НСГ от самцов, облученных низкоинтенсивной ИР, в соматические клетки их потомства. Вместе с тем, расчеты индуцированной генетической варибельности на 1 гамету на поколение на единицу дозы облучения самцов-родителей не выявляют пропорциональной зависимости эффекта с повышением дозы до 50 сГр.

Таблица 1. Варибельность продуктов AP-PCR на ДНК-матрицах потомства самцов-мышей, хронически облученных γ - лучами.

Доза облучения самцов (сГр)	Количество обследованных потомков	Среднее число полос на 1 потомка
необлученные	61	17,93 \pm 2,43
10	48	18,38 \pm 1,84
25 сГр	19	27,67 \pm 3,23
50 сГр	66	23,68 \pm 3,42

Таблица 2. Полиморфизм продуктов AP-PCR на ДНК-матрицах потомства самцов-мышей, подвергавшихся хроническому γ - облучению.

Доза облучения самцов (сГр)	Суммарное число полос на группу ^A	Средняя частота «неродительских» полос	Увеличение «неродительских» полос, %
Необлученные	431 (24)	0,179 \pm 0,015	–
10	883 (48)	0,201 \pm 0,023	13%
25	526 (19)	0,245 \pm 0,036	37%*
50	1042 (44)	0,247 \pm 0,031	38%**

^A В скобках: общее количество животных, по которым проводились расчеты.

* Отличия от необлученной группы по *t*-критерию Стьюдента достоверны ($p < 0.05$).

** То же ($p < 0.01$).

Возможность радиационной индукции НСГ, сохраняющейся во многих поколениях культивируемых клеток, хорошо продемонстрирована. Она характеризуется повышением частоты хромосомных и генных мутаций, микро-минисателлитной варибельности, злокачественной трансформации и клоновой

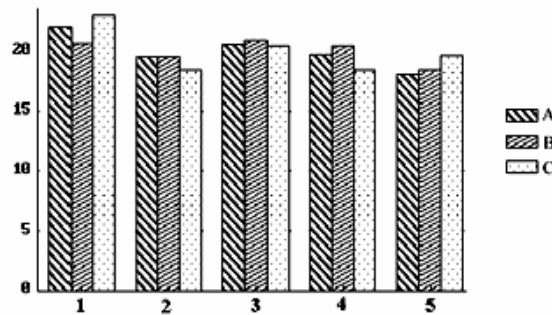


Рис. 2. Распределение среднего числа полос по дискретным, произвольно выбранным "классам" на фотопечатах ДНК потомства самцов мышей, подвергавшихся γ - облучению. По оси абсцисс - номера равных по длине "классов", на которые был разделен участок фотопечата (в диапазоне от 872 до 281 п.о.). По оси ординат - % от суммарного количества полос в анализированном участке, в расчете на одного потомка. А - необлученные мыши; В- 10 сГр; С - 25 сГр.

гетерогенности клеток. У этих клеток также наблюдается повышенный уровень амплификации генов, изменение характера генной экспрессии, задержка репродуктивной гибели и проявление других фенотипических признаков, отличающих их от необлученных культур [3, 30, 31]. В ряде исследований на грызунах получены доказательства трансмиссии радиационно-индуцированной НСГ от самцов-родителей, облученных в сублетальных дозах, в соматические клетки их потомства. Эта переносимая в соматические клетки потомства генетическая нестабильность оценивалась как по увеличению частоты мутаций в клетках, так и по повышению риска развития опухолевых патологий у потомства [29, 32–35]. В экспериментах на трансгенных мышах, подвергнутых острому гамма-облучению в дозе 4 Гр, [33] было показано, что уровень НСГ в гемопоэтических клетках потомства F_1 поколения существенно повышается, тогда как при дозах 0,1-1 Гр частота мутаций, характеризующая НСГ, соответствовала данным, полученным для контрольных животных [33]. Наши результаты демонстрируют возможность использования метода AP-PCR для регистрации повышенного уровня НСГ у F_1 потомства мышей от самцов, подвергнутых хроническому облучению в значительно меньших дозах (25 - 50 сГр). Отметим также, что в наших экспериментах облученных самцов спаривали с необлученными самками через 15 дней после облучения. При указанном режиме спаривания облученных самцов с необлученными самками в оплодотворении яйцеклеток могли участвовать в основном сперматозоиды, которые были подвергнуты радиационному воздействию на той стадии сперматогенеза (сперматиды, [14, 15]), когда система репарации ДНК функционирует менее эффективно [4]. Поэтому надо полагать, что в ДНК сперматозоидов мышей-родителей, хронически облученных

малыми дозами радиации, на момент оплодотворения сохранялись больше нарушений, которые способствовали формированию НСГ в соматических клетках их потомства.

В ряде исследований, благодаря использованию минисателлитных локусов в качестве генетических маркеров, был обнаружен высокий уровень мутаций у потомства мышей-самцов, облученных в дозах 2-4 Гр [13-15]. Как предполагают многие авторы, в основе выявляемой НСГ в соматических клетках потомства самцов, подвергнутых воздействию повреждающими агентами, лежат не прямые (или немишенные) механизмы изменений, возникающих в геноме половых клеток [7, 29, 33, 35]. Часть этих нарушений, являясь нелетальными, остается нерепарированными и фиксируется в геноме соматических клеток потомства в процессе дифференцировки. Можно предполагать, что уровень НСГ в различных типах клеток потомства облученных отцов, будет различаться, в зависимости от степени дифференциации и специализации этих клеток.

Имеются достаточное количество экспериментальных и эпидемиологических данных, которые позволяют полагать, что облучение родителей является фактором риска возникновения опухолевых патологий у потомства [7, 34, 36-38]. Возможно, повышенная генетическая нестабильность в клетках потомства играет роль в этиологии частых случаев лейкемии детей, родители которых подвергались воздействию малых доз низкоинтенсивного излучения в силу профессиональной занятости или в результате ядерных аварий. Неожиданно высокий уровень минисателлитных мутаций был обнаружен у детей, родители которых подвергались облучению в зонах радиоактивного загрязнения в Могилевской области, после Чернобыльской аварии [16]. Уровень этих мутаций, у потомства облученных родителей, существенно превышал, ожидаемые значения частоты точечных мутаций, определяемых по кодирующим локусам. Результаты наших экспериментов, хотя их невозможно количественно выразить частотой мутаций для сравнения, не противоречат данными, полученным анализом минисателлитных мутаций в клетках крови детей, отцы которых подвергались облучению в дозе около 20 сГр [16].

Таким образом, результаты настоящего исследования демонстрируют возможность применения AP-PCR для выявления трансмиссии генетической нестабильности в соматические клетки потомства отцов, подвергшихся хроническому воздействию низкоинтенсивного гамма-излучения в малых дозах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 97-04-48243) и ГНТП «Приоритетные направления генетики».

Список литературы

1. Tomatis L. // Jpn. J. Cancer Res. 1994. V. 85. P. 443-454.
 2. Genetic Instability and Tumorigenesis. (Edited by M.B. Kastan). Berlin: Springer, 1997. PP. 210.
 3. Harms-Ringdahl M. // Mutat. Res. 1998. V. 404. P. 27-33.
 4. Vogel E.W., Natarajan A.T. // Mutat. Res. 1995. V. 330. P. 183-208.
 5. Ashwood-Smith M.J., Edwards R.G. // Mol. Human Reprod. 1996. V. 2. P. 46-51.
-

6. Lypetz A., Xamena N., Cabré O., et al. // *Mutat. Res.* 1999. V. 435. P. 63-75.
 7. Little M.P. // *J. Radiat. Protect.* 1992. V. 12. P. 203-218.
 8. Шевченко В.А. // "Последствия Чернобыльской катастрофы: Здоровье человека." // под ред. Бурлаковой Е.Б. М.: ЦЭПР, 1996. С. 50-67.
 9. Neel J.V. // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1998. V. 95. P. 5432-5436.
 10. Russel L.B., Russel W.L. // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1996. V. 93. P. 13072-13077.
 11. Jeffreys A.J. // *Biochem. Soc. Trans.* 1987. V. 15. P. 309-317.
 12. McMurray C.T. // *Chromosoma.* 1995. V. 104. P. 2-13.
 13. Dubrova Y.E. et al. // *Nature Genet.* 1993. V. 5. P. 92-94.
 14. Sadamoto S. et al. // *Int. J. Radiat. Biol.* 1994. V. 65. P. 549-557.
 15. Fan Y.J. et al. // *Int. J. Radiat. Biol.* 1995. V. 68. P. 177-183.
 16. Dubrova Y.E. et al. // *Nature.* 1996. V. 380. P. 683-686.
 17. Welsh J., McClelland M. // *Nucleic Acids Res.* 1990. V. 18. P. 7213-7218.
 18. Williams J.G.K. et al. // *Nucleic Acids Res.* 1990. V. 18. P. 6531-6535.
 19. Потапов С.Г. и др. // *Генетика.* 1999. Т. 35. № 4. С. 484-492.
 20. Sood A.K., Buller R.E. // *Oncogene.* 1996. V. 13. P. 2499-2504.
 21. Shimada A., Shima A. // *Mutat. Res.* 1998. V. 399. P. 149-165.
 22. Santos J. et al. // *Cytogenet. Cell Genet.* 1995. V. 71. P. 223-224.
 23. Welsh J. et al. // *Nucleic Acids Res.* 1991. V. 19. P. 303-306.
 24. Gupta M. et al. // *Theor. Appl. Genet.* 1994. V. 89. P. 998-1006.
 25. Caetano-Anolles G., Gresshoff P.M. // *Promega Notes Magazine.* 1994. V. 45. P. 13-18.
 26. Супота Н.П. и др. // *Генетика.* 2000. Т. 36. С. 570-574.
 27. Stadler J., Gowen J.W. // *Effects of Ionizing Radiation on the Reproductive System* / Eds. Carlson W.D., Gassner F.X. N.Y.: Pergamon Press. 1964, PP. 111-122.
 28. Iwasaki T. et al. // *Int. J. Radiat. Biol.* 1996. V. 69. P. 487-492.
 29. Mohr U. et al. // *Carcinogenesis.* 1999. V. 20. P. 325-332.
 30. Morgan W.F. et al. // *Radiat. Res.* 1996. V. 146. P. 247-258.
 31. Little J.B. // *Int. J. Radiat. Biol.* 1998. V. 74. N. 6. P. 663-671.
 32. Воробцова И. Е. // *Радиобиология.* 1987. Т. 23. № 3. С. 377-381.
 33. Luke G.A., Riches A.C., Bryant P.E. // *Mutagenesis.* 1997. V. 12. P. 147-152.
 34. Nomura T. // *Nature.* 1982. V. 296. P. 575-577.
 35. Jeffreys A.J. et al. // *Electrophoresis.* 1997. V. 18. P. 1501-1511.
 36. Gardner M.J., Snee M.P., Hall A.J. et al. // *Br. Med. J.* 1990. V. 300. P. 423-429.
 37. McLaughlin J.R. et al. // *Br. Med. J.* 1993. V. 307. P. 959-965.
 38. Draper G.J. et al. // *Br. Med. J.*, 1997. V. 315. P. 1181-1188.
-

О ЗАВИСИМОСТИ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ В НОВОСИБИРСКЕ ОТ БЫТОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Гвоздарев¹ А.Ю., Дмитриев² А.Н.

¹ Новосибирский государственный технический университет,
² Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО РАН

Введение

Работы последних лет убедительно показали важную роль естественных электромагнитных полей (ЭМП) для жизнедеятельности человека и всей биосферы в целом [1–3]. Между тем, за последние годы сформировался новый значительный фактор окружающей среды – электромагнитные поля техногенного происхождения [2, 4]. Большинство населения, особенно городов-мегаполисов, живет в сложном ЭМП, интенсивность которого в миллионы раз превосходит уровень естественного ЭМП и все еще продолжает бесконтрольно нарастать. Исследования гигиенистов указывают на существование значимого неблагоприятного воздействия электромагнитного загрязнения на здоровье человека.

Среди зарегистрированных последствий воздействия электромагнитного загрязнения на человека – повреждение основных функций организма, в том числе поражение нервной, эндокринной и сердечно-сосудистой систем, расстройство пищеварительной функции, развитие психических расстройств и др. Отмечается связь электромагнитного загрязнения с развитием злокачественных опухолей, риском появления врожденных пороков развития, показано негативное воздействие на внутриутробное развитие плода. Особенно высока чувствительность к неблагоприятному воздействию ЭМ загрязнения у детей. Также более ранимы люди, страдающие аллергиями.

Проблема усложняется существованием взаимодействия естественного ЭМП и электромагнитного загрязнения. Особенность ситуации заключается в том, что природные ЭМП – фактор поддержания жизни на Земле, а вызванное деятельностью человека искусственное электромагнитное загрязнение, интенсивность которого во много раз превышает естественный фон, угрожает всему живому.

В связи с развитием работ по электромагнитной экологии возникает вопрос о влиянии техногенных электромагнитных полей на здоровье населения в г. Новосибирске. В данной работе проведена попытка исследования этого влияния.

Методика исследований и полученные результаты

В 1995 году сотрудниками ГорСЭН были проведена работа по построению карты-схемы плотности бытового потребления электрической энергии в городе Новосибирске [5]. При этом использовалась следующая идея. Так как почти все бытовые приборы работают от напряжения $U = 220$ В (либо 380 В), а потребляемая мощность описывается формулой $P=I \cdot U$, где I – сила тока, то потребление энергии пропорционально силе тока I . Сила тока, в свою очередь,

линейно связана с напряженностью магнитного поля, поэтому плотность потребления электроэнергии может дать оценку амплитуды магнитного поля на частоте 50 Гц, конечно лишь приблизительно, так как конкретное распределение поля зависит от конфигурации проводников. Однако на первом, поисковом этапе исследований такой подход имеет смысл, так как не требует создания специальной аппаратуры, а позволяет использовать имеющиеся в наличии данные.

С этой целью в геоинформационной системе *ArcView 3.1* на карту города было нанесено расположение трансформаторных подстанций (кроме ведомственных и производственных) с указанием их мощности, и при помощи пакета *Spatial Analyst* посчитано распределение плотности энергопотребления с использованием квадратной сетки с размером ячейки 100×100 м и радиусом сглаживания $R=300$ м. Расчет сводился к вычислению в каждой точке сетки отношения суммы мощностей p_j всех трансформаторных станций, находящихся внутри круга сглаживания, к его площади:

$$w = \frac{\sum p_j}{\pi R^2}.$$

Полученная в результате карта распределения плотности бытового энергопотребления w показана на рисунке 1.

Далее по этому распределению строились линии уровня плотности бытового потребления электроэнергии на карте с шагом $\Delta w = 2; 3; 5$ Вт/м², и вычислялась удельная площадь застройки для каждого района города, попавшей между двумя изолиниями ($w \in [w_{i-1}, w_i)$, где $w_i = \Delta w \cdot i$ – уровни плотности потребления электроэнергии, соответствующие изолиниям; $w_i < 52$ Вт/м²). Застройка, где потребление электроэнергии было неизвестно (производственные площади и некоторые ведомственные учреждения) исключалась из рассмотрения. По этой же причине был исключен из анализа Калининский район, в котором многие жилые здания подключены к производственным станциям, и нельзя сделать объективного заключения об уровне энергопотребления.

Таким образом, для восьми районов Новосибирска (исключая Калининский и Советский р-ны) были получены характеристики энергопотребления, при помощи пакета *Statistica 5.0* был проведен корреляционный анализ этих параметров с данными о заболеваемости населения из [6] за 1990–92 годы, и выделены заболевания, для которых отмечена связь между заболеваемостью и бытовым потреблением электроэнергии.

В результате анализа выделилось пять групп заболеваний, связанных с различными зонами энергопотребления. Значения коэффициентов корреляции, полученные в результате анализа, показаны на рисунке 2 (уровень значимости $p < 0.01$).

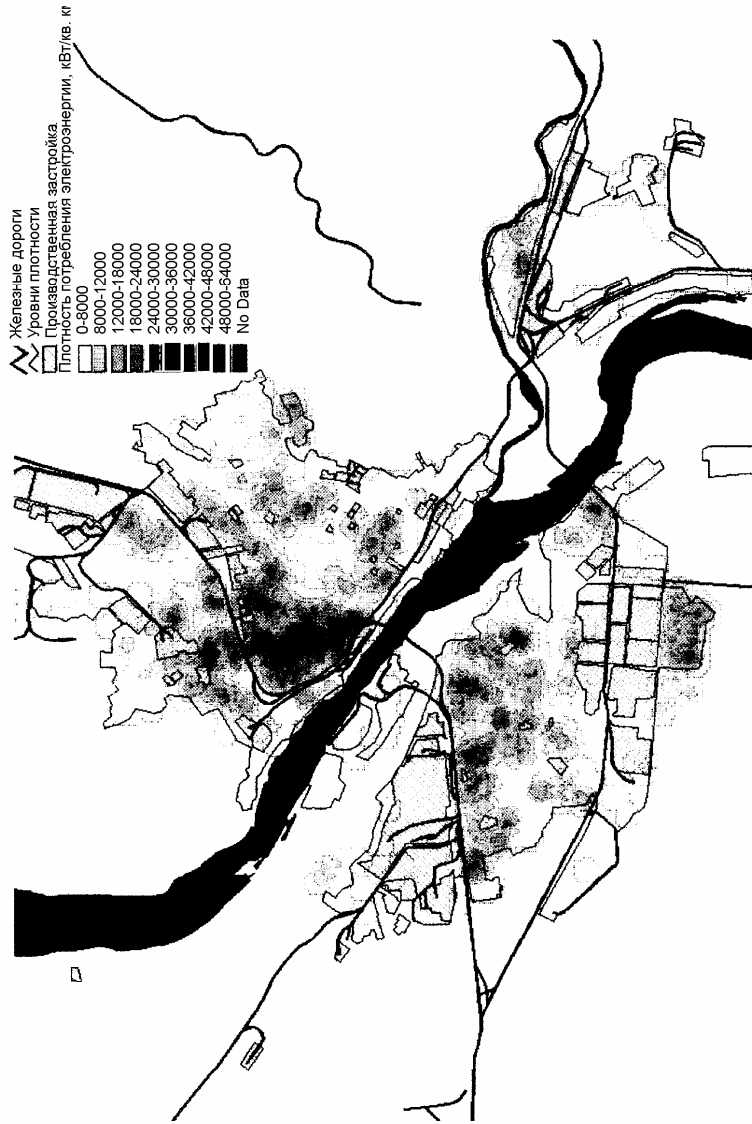


Рис. 1. Карта плотности потребления электроэнергии в Новосибирске

В первую группу, связанную положительной корреляцией с зонами с низким энергопотреблением (до 10 Вт/м^2), попали наркомания и удельный вес больных с запущенными онкозаболеваниями. При этом для наркомании наблюдается сильная отрицательная корреляция с удельной площадью зон с потреблением выше 20 Вт/м^2 , а у запущенных онкозаболеваний – антикорреляционная связь средней силы с энергопотреблением около 18 Вт/м^2 , поэтому эту группу можно разбить на две подгруппы.

Вторая группа включает в себя одно заболевание – туберкулез, и связана с зонами с энергопотреблением $10 - 18 \text{ Вт/м}^2$, с зонами с бытовым энергопотреблением выше 26 Вт/м^2 наблюдается отрицательная корреляция.

В третью группу вошли заболевания кожи и подкожной клетчатки, инфаркты, а также язва желудка и двенадцатиперстной кишки и, возможно, болезни дыхательных органов. Заболеваемость этими болезнями имеет положительную корреляцию с удельной площадью зон с энергопотреблением $14-20 \text{ Вт/м}^2$.

Четвертая группа – самая обширная и включает в себя нервные расстройства, болезни эндокринной системы, в том числе сахарный диабет, заболевания крови и кроветворных органов, заболевания системы кровообращения, ишемическую болезнь сердца, а также травмы и отравления, пневмонию и бронхит. Заболевания этой группы скоррелированы с удельной площадью зон с бытовым потреблением электроэнергии $18 - 27 \text{ Вт/м}^2$. Для зон с низким энергопотреблением (до 10 Вт/м^2) у этих заболеваний наблюдается отрицательная корреляция. В этой группе можно выделить подгруппу, включающая заболевания системы кровообращения, сахарный диабет, и возможно, пневмонию – у них максимальное значение коэффициента корреляции достигается при уровне потребления $20-24 \text{ Вт/м}^2$, в то время как у прочих заболеваний – при $18-20 \text{ Вт/м}^2$, то есть эти заболевания проявляются при более высоком энергопотреблении.

В последнюю группу вошли заболевания костно-мышечной системы, болезни органов системы пищеварения и гонорея. Они, по-видимому, проявляются в тех участках застройки города, где потребление превышает 24 Вт/м^2 .

Заболеваемость болезнями первых двух групп в исследуемый период была невысокой, болезни третьей группы дают 6 или 27% больных от общей заболеваемости по городу в зависимости от того, включаются в нее болезни органов дыхания, или нет, а четвертая и пятая группа – 27 и 23 % от общего количества больных по городу соответственно. Таким образом, влияние энергопотребления на заболеваемость может быть весьма существенным – заболеваемость болезнями, скоррелированными с ним, превышает 50 % .

Обсуждение результатов

Обнаруженные закономерности позволяют выдвинуть гипотезу о распределении болезней по площади застройки города в зависимости от уровня энергопотребления. Так как с энергопотреблением связан уклад жизни – зоны с низким энергопотреблением – это районы с деревянной застройкой, а с высоким – центральные районы города, можно ожидать, что эти закономерности подчиняются также социальным явлениям. В данном случае для разделения

эффектов необходимо поддержать статистику экспериментальными результатами исследований влияния ЭМП на состояние здоровья.

В работе Удинцева [7] приведены результаты исследований воздействия переменного магнитного поля (ПемП) промышленной частоты с большой амплитудой (20 мТл). Кратко они сводятся к следующему. При воздействии происходит активация гипоталамо-гипофизарного комплекса, приводящая к усиленной активности половых и щитовидной желез. При длительном воздействии наблюдается истощение как в аденогипофизе, так и в железах, управляемых им. Наиболее сильно при этом страдают семенники. Воздействие на эндокринную систему проявляется также в снижении уровня инсулина в крови. Описанные явления наблюдались при воздействии ПемП большой амплитуды, однако возможно, что для бытовых ПемП (1–10 мкТл) наблюдаются сходные явления. Этот механизм позволяет объяснить влияние ПемП на заболеваемость болезнями эндокринной системы, в том числе сахарным диабетом.

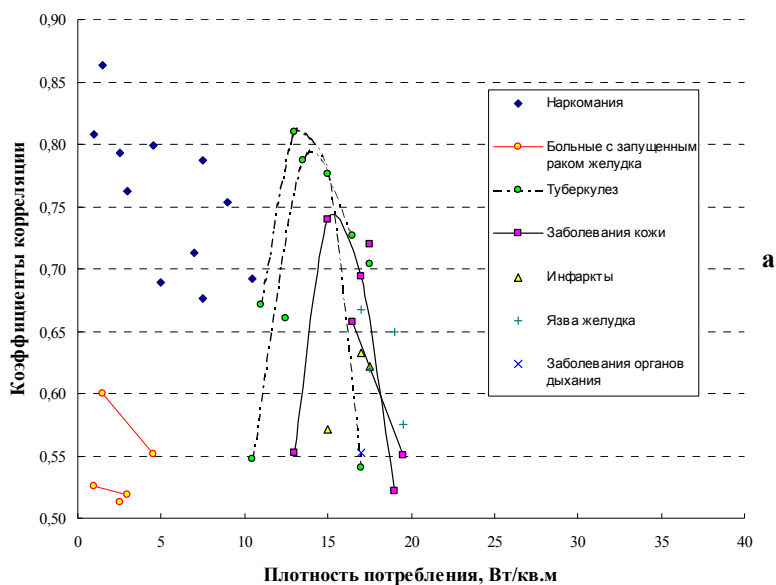
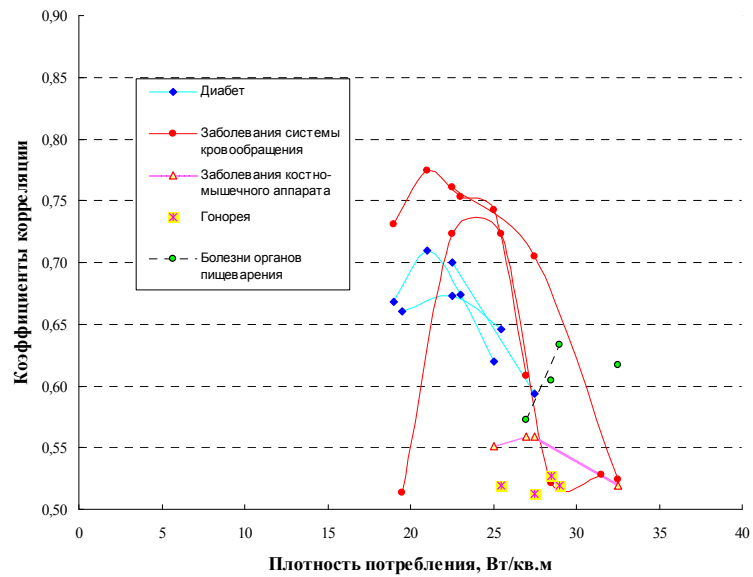
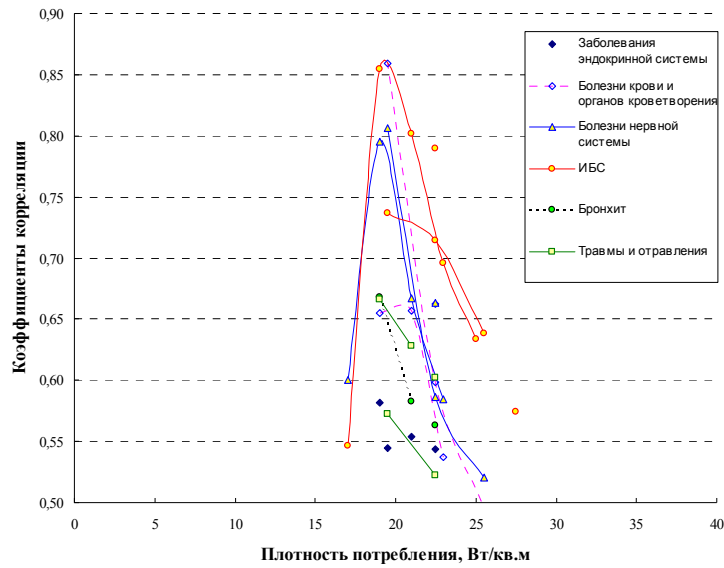


Рис. 2. Значимые коэффициенты корреляции между порайонной заболеваемостью в Новосибирске и удельной площадью застройки с плотностью бытового потребления электроэнергии ниже 20 Вт/м^2 (а), от 18 до 27 Вт/м^2 (четвертая группа) (б) и для районов с высоким уровнем потребления электроэнергии (в)



Воздействие на сердечно-сосудистую систему, согласно Удинцеву, проявлялось в изменении свойств гемоглобина, повышении проницаемости мембран эритроцитов и сосудистых стенок. Это приводило к нарушению динамики крови и лимфы, которое вызывало тканевую гипоксию, проявлявшуюся в угнетении ферментов тканевого дыхания и значительном усилении менее эффективного аварийного анаэробного гидролиза. Возможно, что по этому механизму воздействия происходит обострение течения ИБС, что и обеспечило связь данного вида заболеваемости с зонами с высокой плотностью потребления электроэнергии.

Наконец, одним из наиболее часто встречающихся выводов о воздействии ЭМП на человека и животных является утверждение о повышении вероятности стресса в результате электромагнитного загрязнения среды [4]. Видимо, с этим механизмом связаны заболевания третьей группы.

Обнаружение связей с болезнями первой и второй группы объяснить пока трудно, возможно, это социальный эффект. Однако литературе [4] указывается на возможность изменения проницаемости гематоэнцефалического барьера в результате действия ЭМП, и таким образом, влияния на развитие наркомании.

Необходимо иметь в виду, что рассчитанные параметры энергопотребления не являются независимыми, а наличие корреляции заболеваемости с удельной площадью зоны еще не означает, что именно в этой зоне она и наблюдается, поэтому необходимо относиться к результатам анализа с осторожностью. Однако возможности выделения порогов заболеваемости и учета их при застройке города для снижения заболеваемости населения настоятельно требуют дальнейших исследований в этом направлении.

Выводы

Таким образом, проведенная нами работа показала наличие зависимости заболеваемости в Новосибирске от бытового потребления электроэнергии. Выделены классы болезней, связанных с ним. Показано, что наиболее широкий класс таких заболеваний связан с зонами, где потребление составляет 18–27 Вт/м². Полученные результаты согласуются с результатами исследований по воздействию переменных магнитных полей частотой 50 Гц на животных и человека [7, 4], что и является основанием для предположения о связи этих видов заболеваемости с электромагнитным загрязнением окружающей среды.

Обнаруженные закономерности позволяют выдвинуть гипотезу о распределении болезней по застройке города в зависимости от уровня энергопотребления и связанного с ним электромагнитного фона и указывают на необходимость продолжения работ в данном направлении.

Литература

1. Сидякин В. Г., Темурьянц Н. А., Макеев В. Б., Владимирский Б. М. Космическая экология. – Киев: Наук. думка, 1985. – 176 с.
 2. Колесник А.Г. Электромагнитный фон и его роль в проблеме охраны окружающей среды и человека // Изв. ВУЗов. Физика. – 1998. – №8. – С. 102–112.
-

3. Гусев В.А., Орлов В.А., Панов С.В. Размножение гетеротрофных микроорганизмов в условиях отсутствия источников органического субстрата и динамика квазистационарных состояний популяции // Биофизика. – 1998. – Т. 43, вып. 4. – С. 746–750.

4. Электромагнитное загрязнение окружающей среды и здоровье населения России / Под ред. А.К. Демина. Доклад по политике в области здоровья. – М.: Российская ассоциация общественного здоровья, 1997. – 91 с. – Библиография – 608 ист.

5. Отчет о выполнении работ по созданию карты электромагнитного загрязнения города Новосибирска. – Новосибирск, гор. центр Госсанэпиднадзора, 1995.

6. Основные показатели состояния здоровья и развития здравоохранения Новосибирска (1980 – 1992 гг.). – Новосибирск, 1993.

7. Удинцев Н. А. Особенности обмена веществ и его регуляция при воздействии электромагнитных полей // Электромагнитные поля в биосфере, – М.: Наука, 1984, т. 2, с. 108.

ЭКОЛОГИЯ: ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ОКРУЖЕНИЕ И МОЗГ

Чиженкова Р.А.

*Институт биофизики клетки РАН, Пущино Московской области,
142292*

Развитие современного общества связано с экстенсивным использованием электромагнитных (а также магнитных и электрических) полей широкого диапазона частоты и интенсивности. Прогресс не существует без радиокommunikаций, радарных систем, технологических процессов на производстве, транспорта, исследовательской аппаратуры, электропроводки и даже бытовых приборов. Повсеместное распространение электромагнитного загрязнения создало новые условия жизни. В связи с этим возникло ряд серьезных проблем, в частности воздействия данных физических факторов на здоровье человека, а также их функционального влияния на деятельность головного мозга. Первая из указанных проблем вполне осознана в современном обществе. Вторая пока скрыта от глаз стороннего наблюдателя.

Проведенное нами рассмотрение литературных сведений на основе базы данных Medline за последние 30 лет показало, что лидируют исследования в области прикладных аспектов биологического действия электромагнитных полей (дозиметрических и гигиенических) [10]. Фундаментальным исследованиям деятельности мозга в электромагнитных полях уделяется более, чем скромное внимание.

На животных посредством разрушения некоторых структур головного мозга, нейрональной изоляции его отделов и параллельной регистрации биопотенциалов от разных структур мозга ранее нами было установлено, что электрические реакции мозговой ткани (в том числе и коры больших полушарий) на электромагнитные поля разной частоты и магнитные поля представляют результат их прямого действия на эту ткань [4-6, 10, 14].

Позднее нами было обнаружено, что СВЧ облучение не вызывает выраженных частотных сдвигов нейронной активности неокортекса, но тем не менее продуцирует существенные изменения вызванной активности [7, 9]. Последующий математический анализ импульсных потоков корковых нейронов показал, что перестройки фоновой активности при СВЧ облучении затрагивают не столько ее усредненные параметры, сколько внутренний рисунок [10, 12-14].

Цель настоящей работы заключалась в рассмотрении рисунка импульсных потоков популяций корковых нейронов при коротких СВЧ воздействиях низкой интенсивности. Использование спайковой активности популяций корковых нейронов в этих исследованиях было более желательным, чем одиночных нейронов. Надо учесть, что "a priori" не ожидалось значительных изменений нейронной импульсации. При этом известно, что одновременная регистрация разрядов нескольких клеток нивелирует случайные сдвиги и подчеркивает лидирующие перестройки [15].

Методика

Эксперименты проведены на 14 бодрствующих необездвиженных кроликах (самцах) новозеландской породы массой около 2,5 кг. Предварительно животным вживляли под нембуталовым наркозом электроды в сенсомоторную область коры для регистрации спайковой активности. Электродами служили стеклянные микропипетки с диаметром кончика 20 мкм, заполненные 1% агаром на физиологическом растворе.

Во время экспериментов животные мягко фиксировались на деревянной раме. Голова животного подвергалась СВЧ облучению (длина волны 37,5 см). Длинная ось головы была параллельна вектору E . Интенсивность облучения составляла 0,5-1 мВт/см². Длительность экспозиции, как в предыдущих наших исследованиях [4-7, 9, 10, 12-14], равнялась 1 мин.

Три одноминутных периода записи импульсации, полученные до, во время и непосредственно после воздействия, подвергали компьютерному анализу. Основным предметом анализа были объединения нейронных разрядов, представляющие пачечную активность. Рассматривали пачечную активность на основе трех порогов ее выделения: 5, 10 и 20 мс. В первом случае выделялись объединения спайков при межспайковом интервале менее 5 мс, во втором - менее 10 мс, и в третьем - до 20 мс. Такой унифицированный подход был необходим для возможности последующего суммирования данных и сопоставления результатов, полученных в различных периодах регистрации и в разных сериях исследований. Определяли число пачек, среднюю частоту спайков в пачке, среднее число спайков в пачке, среднюю длительность пачки и отношение об-

щей продолжительности импульсного потока, занятого пачками, к доле импульсного потока без пачек. Все вычисления проводили по эпохам анализа в 20.

Результаты, полученные во время облучения и в первую минуту после его прекращения, сравнивали с исходными величинами посредством непараметрических критериев, преимущественно критерия Уайта [3].

В контрольных исследованиях проводили аналогичный анализ импульсных потоков популяций корковых нейронов, однако СВЧ облучение не осуществлялось. Дополнительные подробности исследований описаны в другом месте [12, 13].

Результаты

Экспериментальные материалы были получены на основе 87 СВЧ воздействий, что составило 783 20-сек проанализированных участков записи нейронной импульсации. Соответственно общее число вычисленных значений было 11745.

Исходная пачечная активность

Характеристики пачечной активности при всех трех порогах ее выделения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики пачечной активности до облучения

Показатели	Порог идентификации спайков		
	5 мс	10 мс	20 мс
1	408,44±10,81	273,34±10,37	91,81±4,49
2	398,39±5,42	212,60±2,73	157,28±2,14
3	2,69±0,03	20,06±3,31	51,58±4,59
4	5,80±0,08	125,39±20,71	317,09±25,44
5	0,54±0,01	5,27±0,76	12,21±0,94

(1) число пачек за 20 сек,
 (2) средняя частота спайков в пачке (Гц),
 (3) среднее число спайков в пачке,
 (4) средняя длительность пачки (мс),
 (5) отношение суммарной длительности пачек к части импульсного потока без пачек.

Число всплесков активности в виде пачек было связано с порогом их выделения. Число обнаруженных пачек понижалось с повышением данного порога.

Внутренние особенности пачечной активности также зависели от выбранных порогов ее определения. Пачки, определяемые на основе порога 5 мс, обладали наиболее высокой частотой составляющих их спайков, наименьшим числом последних и наименьшей длительностью. Пачки, определяемые при пороге 20 мс, демонстрировали противоположные качества. А пачки, определяемые посредством порога 10 мс, имели промежуточные черты.

Эффекты СВЧ облучения на пачечную активность

Перестройки пачечной активности под влиянием СВЧ облучения отражены на рис. 1.

Как следует из рисунка, имело место различное поведение пачечной активности при СВЧ облучении в зависимости от выбранного порога ее обнаружения.

Пачечная активность, выделяемая на основе порога 5 мс, претерпевала наименьшие, хотя и статистически значимые, изменения. Пачечная активность, выделяемая при пороге 10 мс, обладала сложным комплексом сдвигов. Наблюдались разнонаправленные отклонения со стороны "частотных" и "временных"

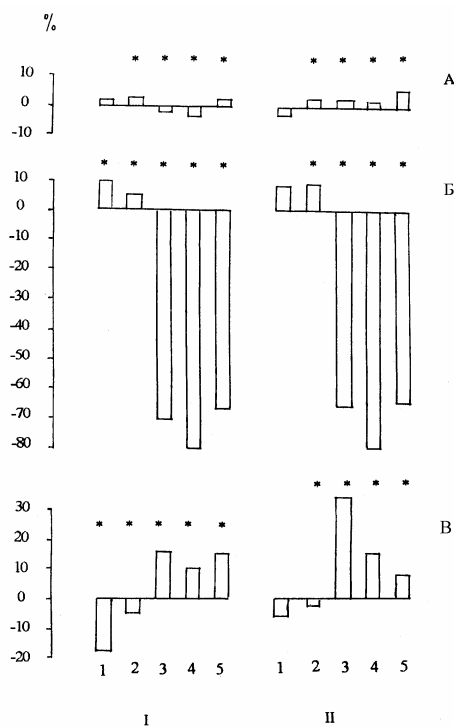


Рис 1. Эффект СВЧ облучения на характеристики пачечной активности, выделенной на основе порогов 5 мс (А), 10 мс (Б) и 20 мс (В), во время одноминутного воздействия (I) и в первую минуту после его прекращения (II). (1) число пачек; (2) средняя частота сайков в пачке; (3) среднее число спайков в пачке; (4) средняя длительность пачки; (5) отношение длительности пачек к общей продолжительности межпачечных интервалов. Исходные величины приняты за 100%. Звездочками отмечены статистически значимые изменения ($p < 0,01$)

показателей. Некоторое увеличение первых сопровождалось значительным

уменьшением вторых. Пачечная активность, выделяемая посредством порога 20 мс, наоборот показывала понижение частоты спайков в пачках при одновременном увеличении числа спайков в пачках, что приводило к увеличению длительности пачек и увеличению части импульсного потока, занимаемого пачками.

В контрольных исследованиях описанные отклонения со стороны пачечной активности отсутствовали.

Заключение

Таким образом, СВЧ облучение одноминутной продолжительности и довольно низкой интенсивности вызывает глубокую структурную перестройку импульсных потоков популяций корковых нейронов. Значительно видоизменяется пачечная активность, выявляемая на основе порогов 10 и 20 мс. Можно предположить, что происходит уменьшение представительства малых пачек в импульсном потоке (по числу спайков в пачке, длительности пачек и отношению - длительность пачек: длительность межпачечных интервалов) и одновременное увеличение представительства больших пачек (по тем же показателям). В результате подчеркиваются изначально заложенные различия в пачечной активности, определяемой при использованных порогах, (малые пачки становятся еще меньше, а большие пачки – больше), и весь импульсный поток приобретает большую структурированность.

Происхождение пачечной активности определяется свойствами самих нейронов и функционированием контуров с обратными связями. Предполагается, что эта нейронная активность имеет отношение к кодированию информации и играет роль в детекции параметров сигнала [1, 2, 8, 11, 16].

Следовательно, при внешней относительной стабильности усредненных показателей частоты импульсации корковых нейронов в результате СВЧ облучения происходят существенные изменения интегративных функций в нейронных популяциях коры. Кроме того, формально благополучное состояние здоровья при низкоинтенсивных кратковременных электромагнитных воздействиях не исключает возможность принятия неправильных решений и возникновения неадекватного поведения в критических ситуациях.

Формирование техногенного электромагнитного окружения, помимо развития уже в какой-то мере изученной "электромагнитной болезни", таит в себе опасность продуцирования отклонения в когнитивных функциях, которое не описывается в терминах патологии. Последнее явление может носить случайный (артефактный) и, к сожалению, преднамеренный (управляющий) характер. Отсюда идея древнекитайского мыслителя Конфуция (Кун-цзы, 551-479 до н.э.), что "народом можно управлять посредством музыки", может быть предвзвешена в жизнь совершенно неожиданным путем.

Работа поддержана РФФИ, грант 00-04-48139.

Литература

1. Ваганес В.А., Рукшенас О.Б., Кетлерис Й.Й., Шатинскас Р.В., Пуртулис А.В. Роль пачечной активности в детекции признаков зрительными нейронами коры кошки. *Нейрофизиология*, т. 19, N 3, с.335-343.
2. Немцов А.В. Особенности следования импульсных "пачек" фоновой активности корковых нейронов у кроликов. *Журнал высш. нерв. деят.*, 1987, т. 37, N 1, с. 163-164.

3. Урбах В.Ю. Математическая статистика для биологов и медиков. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 323 с.
 4. Чиженкова Р.А. Роль различных образований головного мозга в электроэнцефалографических реакциях кролика на постоянное магнитное поле и электромагнитные поля УВЧ и СВЧ. Журнал высш. нервн. деят., 1967, т. 17, N 2, с. 313-321.
 5. Чиженкова Р.А. Электрическая реакция коры больших полушарий головного мозга кролика на различные электромагнитные поля. Журнал высш. нервн. деят., 1967, т. 17, N 6, с. 514-519.
 6. Чиженкова Р.А. Биопотенциалы головного мозга кролика при воздействии электромагнитным полем. Физиол. журнал СССР, 1967, т. 53, N 5, с. 514-519.
 7. Чиженкова Р.А. Фоновая и вызванная активность нейронов зрительной коры кролика после воздействия полем СВЧ. Журнал высш. нервн. деят., 1969, т. 19, N 3, с. 495-501.
 8. Чиженкова Р.А. Структурно-функциональная организация сенсомоторной коры (морфологический, электрофизиологический и нейромедиаторный аспекты). М.: Наука, 1986. 241 с.
 9. Chizhenkova R.A. Slow potentials and spike unit activity of the cerebral cortex of rabbits exposed to microwaves. Bioelectromagnetics, 1988, v. 9, No 4, p. 337-445.
 10. Chizhenkova R.A. Neuronal activity under microwave exposure. In: Electromagnetic fields: biological effects and hygienic standardization. Geneva: World Health Organization, 1999, p. 389-395.
 11. Chizhenkova R.A., Chernukhin V.Yu. Nonlinear relationships in the patterns of neuronal spiking in cortical neurons. Journal of Biological Physics, 2000, v. 26. No 1, p. 67-75.
 12. Chizhenkova R.A., Safroshkina A.A. Effect of low-intensity microwaves on the behaviour of cortical neurones. Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 1993, v. 10, No 1, p. 287-391.
 13. Chizhenkova R.A., Safroshkina A.A. Electrical reactions of the brain to microwave irradiation. Electro- and Magnetobiology, 1996, v. 15, No 3, p. 253-256.
 14. Chizhenkova R.A., Safroshkina A.A., Pylyukh T. Low-intensity microwaves affect the spike flow patterns of a cortical neuron population. In: Microwaves in medicine. Rome, 1993, p. 289-292.
 15. Dormont J., Schmied A., Conde H. Motor command in the ventrolateral thalamic nucleus: neuronal variability can be overcome by ensemble average. Exp. Brain Res., 1982, v. 48, No 3, p. 315-322.
 16. Serafin M., Williams S., Khatev A., Fort P., Muhlethaler M. Rhythmic firing of medial septum non-cholinergic neurons. Neuroscience 1996, v. 75, No 3, p. 671-675.
-

СЕКЦИЯ 5

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ СРЕД

**РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРНЫХ
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ И ГРАДИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МОРСКОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ПО ЕЁ ТЕПЛОВОМУ РАДИОИЗЛУЧЕНИЮ.**

Бубукин И.Т., Станкевич К.С., Иванов В.П.

*Научно-исследовательский радиофизический институт
603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д.25.
E-mail: bubn@nirfi.sci-nnov.ru*

Мониторинг естественных излучений сред позволяет проводить оперативную оценку природно-техногенного состояния биосферы и её изменений. Поскольку интенсивность этого излучения определяется температурой и состоянием земных покровов, то собственные излучения чутко реагируют на изменения в этих средах. В докладе рассматриваются методы и результаты дистанционных измерений температуры морской поверхности по её тепловому радиоизлучению в сантиметровом диапазоне длин волн (с толщиной скин-слоя 1-2 мм) в условиях ветрового волнения. Основной проблемой при дистанционном определении температуры взволнованной морской поверхности является разделение температурных и излучательных эффектов. В ходе проводившихся в НИРФИ исследований флуктуирующих радиоизлучений взволнованной морской поверхности были открыты неизвестные ранее флуктуационно-поляризационные свойства радиоизлучения моря. На их основе была создана специальная радиометрическая система, позволяющая почти полностью исключить влияние крупномасштабного волнения на излучательную способность и проводить точные абсолютные измерения температуры морской поверхности. Были применены алгоритмы чистки данных дистанционного зондирования от влияния ряби построенные по данным натуральных измерений радиационно-ветровых зависимостей. Приведены результаты натуральных измерений температуры морской поверхности на глубине 1.4 мм в условиях реального морского волнения при скоростях ветра до 7 м/с. Созданные метод и аппаратный комплекс позволяют перейти к измерениям температурных градиентов в поверхностной плёнке и получению данных о тепловых потоках на границе морская поверхность-атмосфера.

Радиофизический метод определения температуры в поверхностном слое воды в условиях меняющегося морского волнения.

Интенсивность излучения в СВЧ-диапазоне в приближении Рэлея - Джинса принято описывать с помощью радиояркостной температуры T_J , которая связана с интенсивностью излучения I соотношением:

$$I \approx \frac{2k \cdot T_J}{\lambda^2}$$

интенсивность I измеряется в $вт/(м^2 \cdot ср \cdot эц)$, температура T_y - в градусах Кельвина, $k = 1.38 \cdot 10^{-23} вт/(эц \cdot град)$ - постоянная Больцмана, λ - длина волны излучения. Радиояркая температура моря T_y является функцией положения антенны, времени t и равна

$$T_y(h, t) = J(h, t)T_{воды} + (1 - J(h, t)) T_{атм}(h)$$

где $T_{воды}$ - температура воды в скин-слое. $T_{атм}(h)$ - температура радиоизлучения атмосферы по зеркальному лучу, $J(h, t)$ - излучательная способность морской поверхности, h - угол возвышения антенны (отсчитывается от горизонта). Вторая компонента, связанная с отражением радиоизлучения атмосферы по зеркальному лучу, в сантиметровом диапазоне длин волн незначительна. Излучательная способность морской поверхности - $J(h, t)$ зависит от температуры, диэлектрических характеристик, структуры волнения и является в общем случае случайной функцией времени. Толщина скин-слоя, формирующего собственное тепловое радиоизлучение водной поверхности $d = \frac{\lambda}{4}(\pi \cdot Jm\sqrt{\epsilon})$, где ϵ - диэлектрическая проницаемость воды. Для волн сантиметрового диапазона толщина скин-слоя d составляет от 1 до 15 мм. Таким образом, яркая температура T_y зависит от температуры воды в тонком поверхностном слое $T_{воды}$ и излучательной способности морской поверхности J , которая определяется её формой и структурой. Из-за наличия волн величина J непрерывно изменяется, что приводит к флуктуациям яркой температуры T_y . То есть, необходимо либо компенсировать величину коэффициента излучения, либо определить его независимым способом. При этом характер влияния волнения зависит от соотношения между длиной волны принимаемого излучения λ и масштабом волны на морской поверхности Λ . Поэтому для анализа влияния крупномасштабного ($\Lambda \gg \lambda$), мелкомасштабного ($\lambda \gg \Lambda$) и волн с $\Lambda \sim \lambda$ используются разные методы и подходы.

В ходе проводившихся в НИРФИ исследований флуктуирующих радиоизлучений взволнованной морской поверхности были открыты неизвестные ранее флуктуационно-поляризационные свойства радиоизлучения моря [1]. Крупномасштабное морское волнение приводит к появлению четырёх флуктуационных компонент на поляризационных углах 0° , 90° и 45° , 135° , флуктуации радиоизлучения которых попарно отрицательно коррелированы. Первая пара связана с наклонами волн в плоскости визирования, вторая - в перпендикулярной плоскости. На этой основе была разработана специальная радиометрическая система позволяющая почти полностью исключить влияние крупномасштабного ($\Lambda \gg \lambda$) морского волнения на принимаемый сигнал. Эффективность работы системы показана на рис.1 и 2. На рис.1 показаны флуктуации радиоизлучения моря при приёме обычной радиометрической системой с пятном разрешения на морской поверхности ~ 50 см. На рис.2 - флуктуационная дорожка при приёме

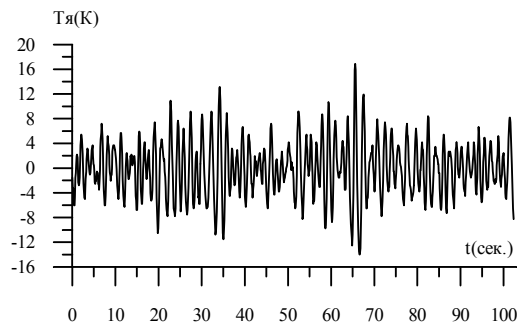


Рис.1

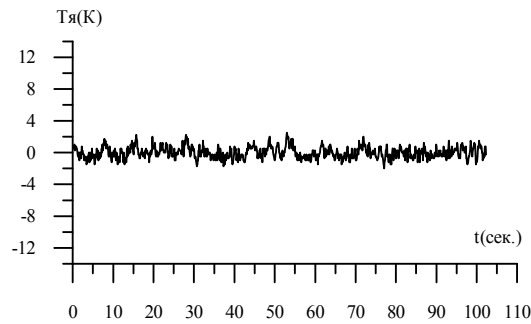


Рис.2

фазово-поляризационной системой. Влияние крупномасштабного волнения устраняется до уровня шумов аппаратуры.

Алгоритм исключения влияния мелкомасштабного волнения (ряби) основан на зависимости приращения яркостной температуры, вызванной рябью, от скорости ветра. Примеры зависимостей приращений яркостной температуры морской поверхности от скорости ветра для $\lambda = 4\text{ см}$, полученные по натурным измерениям в октябре 2000 г. (рис.3,4) и в августе 1999 г. (рис.5) при углах возвышения $h = -37, -41.5^\circ$ приведены на рис.3-5. Измерения проводились при скоростях ветра не превышающих 7-8 м/с, до появления значительного пенного покрытия. Не смотря на то, что мелкомасштабное волнение быстро реагирует на изменения скорости ветра, не удалось получить универсальной радиационно-ветровой зависимости для ряби. Даже зависимости полученные в два последовательных дня (рис.3, 4) могут существенно отличаться. Амплитуда мелкомасштабного волнения зависит как от эффективности взаимодействия воздушного потока с поверхностью, так и от поверхностного натяжения воды, которое является функцией температуры. Излом при скорости ветра $V \sim 4.5\text{ м/с}$ на рис.5 очевидно связан с наличием нескольких факторов по разному влияющих на яркостную температуру моря T_y : рябь увеличивает яркостную температуру, а ис-

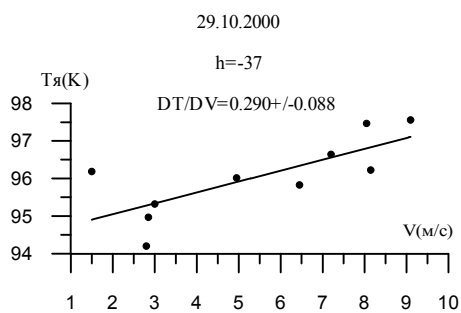


Рис.3

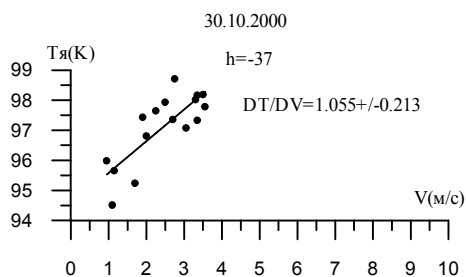


Рис.4

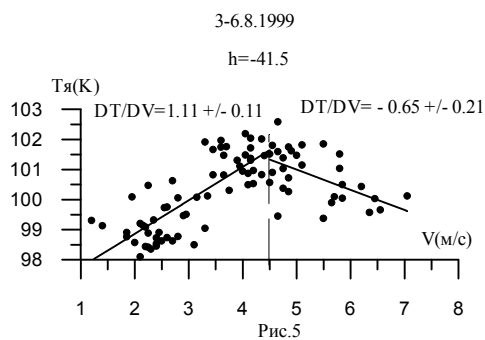


Рис.5

парение уменьшает. Таким образом, модель влияния мелкомасштабного волнения на яркостную температуру морской поверхности не может быть универсальной и для исключения влияния мелкомасштабного волнения должны использоваться экспериментальные радиационно-ветровые зависимости полученные в день наблюдений.

Абсолютные измерения интенсивности теплового радионизлучения и температуры морской поверхности на глубине 1.4 мм.

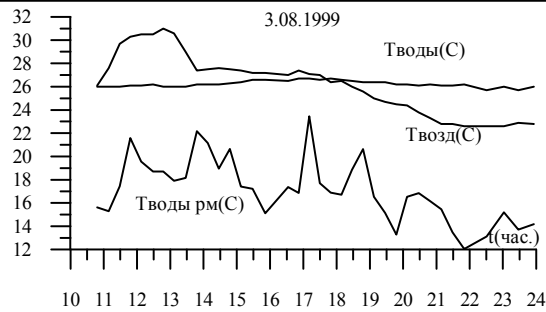


Рис.6

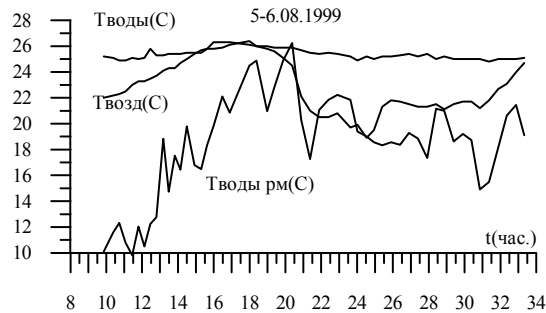


Рис.7

Натурные измерения проводились в июле-августе 1999 г. и в октябре-ноябре 2000 г. на южном побережье Чёрного моря с пирса, имеющего свайное основание, на расстоянии ~100м от берега. Измерительный комплекс был оснащен параболическим зеркалом с диаграммой $\sim 2^\circ$ по уровню половинной мощности и модуляционным приёмником на длину волны $\lambda = 4\text{см}$ с флуктуационной чувствительностью $\sim 0.1\text{К}$ при постоянной времени 1 сек., а также систему калибровочных эталонов. Опорно – поворотное устройство позволяло сканировать по углу места и азимуту. Абсолютная калибровка проводилась по радиоизлучению “чёрного диска” находящегося при температуре окружающего воздуха и излучению атмосферы в зените, которая для $\lambda = 4\text{см}$ стабильна и имеет величину менее 10°К . Полученные этим методом значения температуры воды на глубине 1.4 мм приведены на рис.6 и 7 для 3.08.1999 и 5-6.08.1999. На этих же графиках приведены значения температур воздуха и воды, измеренные термометром. Видно, что имеет место существенное падение температуры в “холодной плёнке”, формирующейся на морской поверхности вследствие выключения механизма турбулентной теплопроводности вблизи поверхности. Температура воды на глубине 1.4мм оказывается сильно переменной величиной с характерным временем изменения менее 30 минут. Очевидно, что переменность не может быть связана с изменением температур воздуха и воды в глубине. Единст-

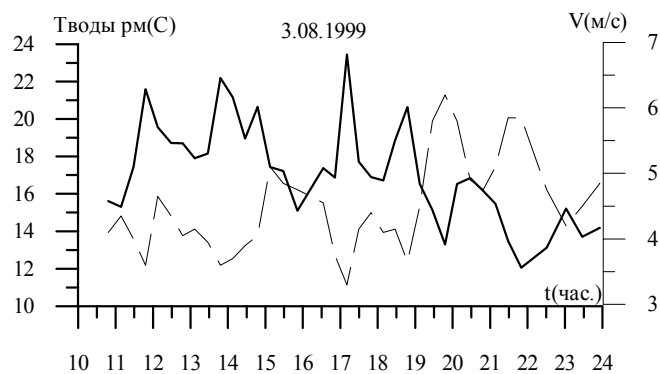


Рис.8

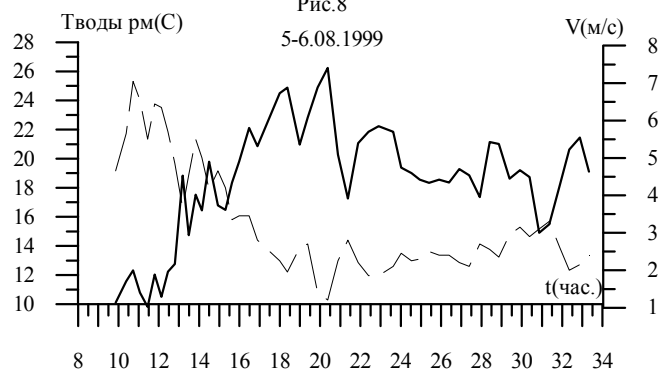


Рис.9

венным метеопараметром который существенно изменяется на таких временных масштабах является скорость ветра. На рис. 8 и 9 на одной временной шкале показаны зависимости от времени температуры воды на глубине 1.4 мм и скорости ветра 3.08.1999 и 5-6.08.1999. Имеет место отрицательная корреляция температуры на глубине скин – слоя и скорости ветра. Особо отметим подъём температуры 5.08.1999 около 20 часов. Спад скорости ветра до 1м/с привёл к выравниванию глубинной температуры и температуры на глубине скин-слоя.

Отрицательная корреляция температуры на глубине 1.4 мм и скорости ветра свидетельствует о том, что существенную роль в теплообмене морской поверхности и атмосферы в августе 1999 г. играло испарение. Другая ситуация наблюдалась в ходе измерений в октябре 2000г. На рис.10 и 11 приведены графики временного хода температуры на глубине 1.4 мм и температур воздуха и воды измеренных термометром 29 и 30 октября 2000 г. Методика измерений

Секция 5. Физические методы мониторинга природных сред 139

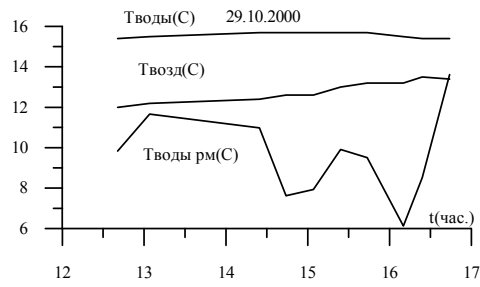


Рис.10

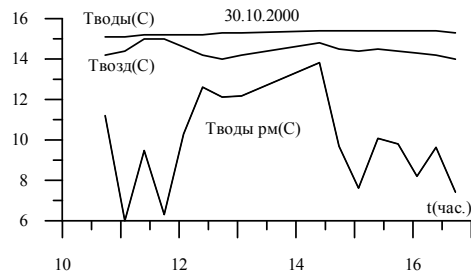


Рис.11

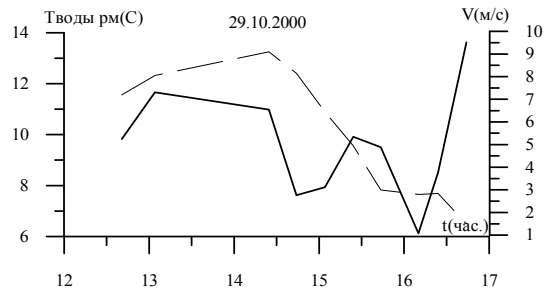


Рис.12

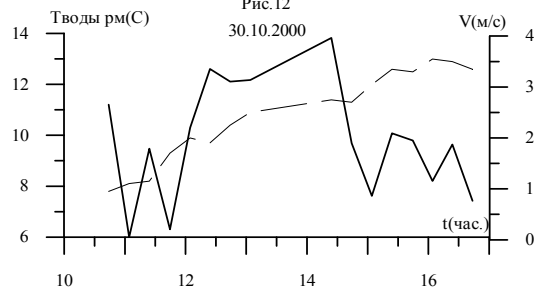


Рис.13

аналогична использованной для получения рис.6 и 7. Для чистки от влияния ряби использованы радиационно-ветровые зависимости, полученные в дни наблюдений. Видно, что разницы температур меньше летних, меньше и изрезанность кривых. На рис.12 и 13 показан временной ход температуры в скин-слое и скорости ветра. В отличие от летних наблюдений корреляция со скоростью ветра отсутствует. Таким образом, в летнее время на отдачу тепла оказывает влияние испарение, осенью оно уменьшено.

Созданные метод и аппаратный комплекс позволяют перейти к измерениям температурных градиентов в поверхностной плёнке и получению данных о тепловых потоках на границе морская поверхность-атмосфера.

Измерения проводились с пирса Карадагского природного заповедника на восточном побережье Крыма. Работа поддержана грантами РФФИ (№ 98-05-64545 и № 00-05-79062) и Министерства образования РФ (№ 3-14).

Литература

Бубукин И.Т., Станкевич К.С., Иванов В.П. Корреляционные эффекты в тепловом радиоизлучении взволнованной морской поверхности. //Радиотехника и электроника. – 2000.-т.45.-№5.-С.531-538.

КОМПАКТНЫЙ ЛИДАР ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ВОДОЕМОВ, ПОЧВЫ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ

А.Ф.Бункин, С.М.Першин

*Институт общей физики РАН, Научный центр волновых исследований,
Москва, 117942, ул.Вавилова, 38, abunkin@orc.ru*

Быстрый рост загрязнения окружающей среды обуславливает повышенный интерес к развитию методик и аппаратуры для экспрессного измерения содержания примесей в атмосфере, водоемах, почве и растительности. Эффективным подходом к решению такого рода задач является использование лидарных методов [1-3], позволяющих получать в реальном времени достаточно полную информацию о исследуемой среде, в том числе с борта авианосителя [2-4]. Такие измерения часто используются для калибровки спутниковых изображений поверхности Земли [5,6]. Однако, одним из недостатков большинства существующих в настоящее время лидарных систем является их громоздкость и недостаточная универсальность. Мы создали компактный флуоресцентный лидар, применимый для зондирования водоемов, почвы и растительности с борта вертолетов, автомобилей и судов. Некоторые результаты натурных и лабораторных экспериментов, иллюстрирующие возможности такого зондирования являются предметом данной работы.

Эксперимент

Оптическая схема лидара приведена на рис. 1. В качестве излучателя использовался специально разработанный для полевых условий, устойчивый к вибрациям Nd:YAG лазер со следующими параметрами:

длительность импульса	8 нс,
частота повторения импульсов	до 25 Гц,
энергия в импульсе основного излучения (1064нм)	600мДж,
энергия в импульсе второй гармоники (532 нм)	280 мДж
энергия в импульсе третьей гармоники (354 нм)	100мДж

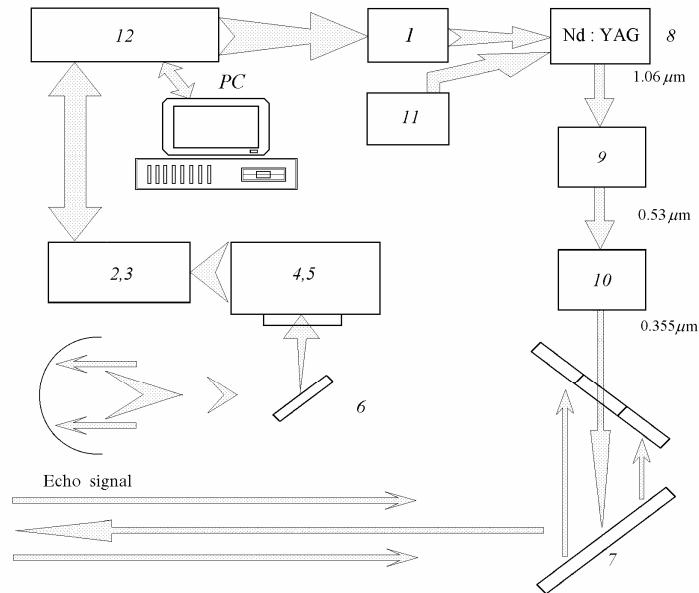


Рис. 1. Схема лидара. 1- блок питания лазера, 2,3 - ПЗС камера с предварительным усилителем яркости, 4,5- спектрометр с устройством ввода сигнала, 6 - приемный телескоп, 7 - поворотное зеркало, 8 - излучатель на кристалле Nd:YAG, 9 - генератор второй гармоники, 10- генератор третьей гармоники, 11- система охлаждения лазера, 12 - процессор предварительной обработки сигналов, PC- компьютер

Металлическое зеркало 7 направляет зондирующее излучение на исследуемый объект (водоем, почву, растительность). Это же зеркало отклоняет регистрируемый эхо-сигнал в приемный зеркальный телескоп 6 (относительное отверстие 1/3, диаметр 200 мм). Далее эхо-сигнал через специальное устройство ввода 4 фокусируется на входную щель спектрометра 5, собранного по автоколлимационной схеме. В спектрометре используются дифракционные решетки 300 и 1200 ш/мм, дисперсия спектрометра (решетка 300 ш/мм) в первом порядке дифракции 42 нм/мм и 2 нм/мм в девятом.

На выходе спектрометра спектры эхо-сигнала регистрируются охлаждаемой линейкой ПЗС 3 (1024 элемента, спектральная область чувствительности на уровне 10 фотонов/отсчет 350 - 900 нм). Предварительное усиление яркости (до 3×10^4) осуществляется с помощью электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 2, с выхода которого изображение спектра переносится на вход линейки ПЗС широкоугольным объективом. Усиление в ЭОП происходит в момент подачи строб-импульса (в наших экспериментах длительностью 1 мкс), что наряду с аппаратным вычитанием шумов позволяет регистрировать спектры эхо-сигнала при любых уровнях солнечной освещенности.

В первом порядке дифракции спектрометра (решетка 300 ш/мм) рабочий диапазон составляет 525 нм, спектральное разрешение около 0.5 нм/канал, что вполне достаточно для регистрации спектров флуоресценции загрязняющих примесей в водоемах. Конструкция спектрометра позволяет использовать первые девять порядков дисперсии и доводить спектральное разрешение до 0.022 нм/канал, что дает возможность, например, регистрировать тонкую структуру эмиссионных спектров лазерной плазмы [4].

Работа линейки ПЗС и усилителя яркости управляется специализированным процессором 12, осуществляющим первичную обработку и накопление спектров, которые затем транслируются в компьютер. Процессор 12 управляет также работой блока питания Nd:YAG лазера 1 (на рис. 1 - 11 - система охлаждения лазера, 9, 10- генераторы второй и третьей гармоник соответственно).

Были проведены четыре типа экспериментов:

- в лабораторных условиях исследовались образцы воды, почвы, растительности;
- в натуральных условиях (*in situ*) регистрировались спектры аналогичных образцов;
- из окна лаборатории с различных дистанций регистрировались спектры флуоресценции различных типов растительности (в основном, деревьев);
- с борта исследовательского судна картировалось распределение загрязнений в прибрежной зоне Атлантического океана (район Рио де Жанейро).

Во всех экспериментах в качестве зондирующего излучения использовались вторая или третья гармоники Nd:YAG лазера, которые возбуждали флуоресценцию и спектры комбинационного рассеяния (КР) света в исследуемых объектах.

На рис. 2 (а, б) приведены спектры флуоресценции образцов почвы Бразилии, растительности и морской воды при возбуждении излучением третьей гармоники Nd:YAG лазера, нормированные для количественного сопоставления на сигнал упругого рассеяния зондирующего излучения ($\lambda=355$ нм). Видно, что при качественном совпадении формы спектров эхо-сигнала различных образцов, величины пиков флуоресценции пигментов существенно отличаются, что позволяет проводить сравнение почв по содержанию органических примесей и

минеральному составу. В частности, из рис. 2 (а), ясно видно, что в образцах почвы, взятых с верхнего горизонта существенно больше сигналы флуоресценции фикоэритрина (вблизи 630 нм) и хлорофилла (вблизи 700 нм) по сравнению с нижним горизонтом (2). Разница амплитуд эхо-сигналов характеризует содержание органического вещества в плодородном слое почвы.

На рис. 2 (b) приведены спектры эхо-сигнала (1) образца почвы (из штата *Mato Grosso do Sul*), воды Атлантического океана (3) и листьев дерева *Pao Brazil* (2). Видно, что спектры почвы, морской воды и растительности имеют сходную структуру, при этом в спектре воды дополнительно появляются пики КР валентных О-Н колебаний молекул воды ($\lambda=407$ нм), а в спектре растительности сильнее проявляется сигнал флуоресценции хлорофиллов "а" и "b" ($\lambda=690$ и 740 нм). Количественное совпадение спектрального положения всех основных максимумов флуоресценции минеральных компонент и органических примесей образцов почв, морской воды и растительности является, по видимому, фундаментальным свойством земной поверхности и указывает на глубокую связь химического состава верхнего слоя суши, морской воды и наземной растительности.

Предварительные результаты анализа спектров эхо-сигнала почв, морской воды, растительности и синтетических образцов почв суммированы в нашей работе [5], из которой видно, что лидар, работающий на

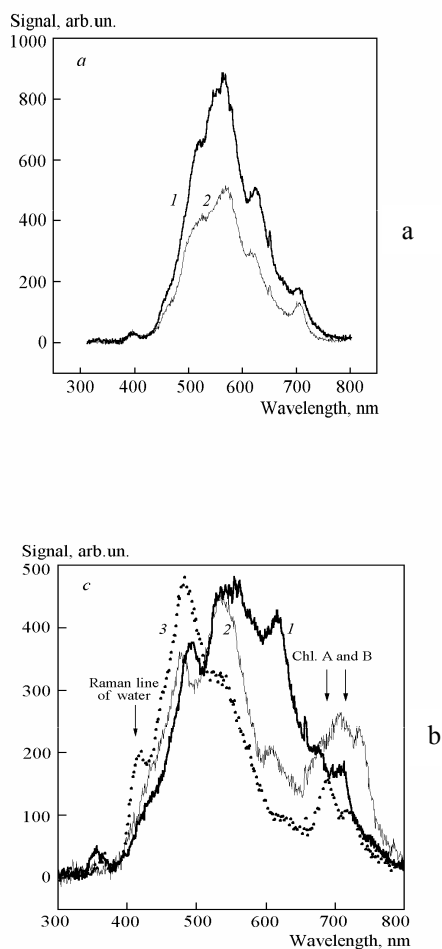


Рис. 2 . Примеры спектров эхо-сигнала из почв: а – почва из штата Amazon. (1)- глубина 0-6 см, (2)- глубина 92 -134 см; б – сравнение спектров эхо-сигнала почвы (1), листьев дерева (2) и морской воды (3).

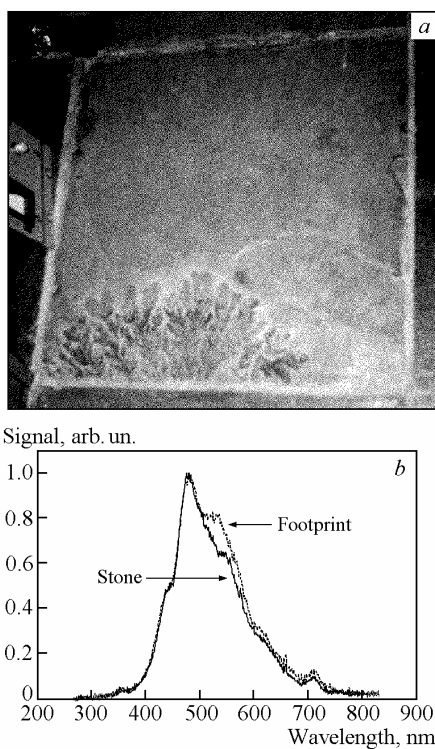


Рис. 3. Отпечаток на камне древнего папоротника:
 а – общий вид образца камня с отпечатком; б – спектры флуоресценции камня внутри
 и вне области отпечатка папоротника. Видно, что в области 520-580 нм появляется
 дополнительный сигнал при зондировании внутри отпечатка

длине волны 355 нм, хорошо детектирует птериновые и флавиновые структуры, то есть два класса принципиально важных для живых организмов коферментов. Поэтому он может использоваться для целенаправленного поиска следов жизни (или хемофоссилий – химических «отпечатков» древней жизни в докембрийских породах или в материалах космического происхождения).

Это приложение лидарного зондирования было проверено в отдельном эксперименте. На каменной плите с отпечатком древнего папоротника (см. рис. 3 а) было выбрано два участка для зондирования, один из которых лежит внутри отпечатка, другой вне этой области. Площади выбранных участков около 1 см², расстояние между центрами участков не более 1.5 см. На рис.3 б показаны спектры флуоресценции каменной плиты внутри и вне отпечатка древнего папорот-

Секция 5. Физические методы мониторинга природных сред 145

ника. Спектры нормированы на величину эхо-сигнала на $\lambda=355$ нм (упругое рассеяние зондирующего излучения). В предварительных экспериментах было выяснено, что характер спектров флуоресценции как вне, так и внутри отпечатков существенно не меняется от положения зондируемой области. Из рис.3 b видно, что в области 540-560 нм в спектре флуоресценции реликтового отпечатка появляется дополнительный сигнал, вызванный, очевидно, присутствием древних конденсированных π -электронных ароматических структур, аналогами которых являются почвенные гумины и керогены горных пород.

Обнаружение и селекция такого сигнала при зондировании поверхности Земли может дать дополнительную информацию палео-археологам при поиске и оконтуривании следов древних цивилизаций. Особый интерес здесь вызывает возможность картирования поверхности Марса с целью обнаружения районов с максимальным значением такого сигнала как индикатора вероятных следов древних органических веществ.

Задача картирования загрязнений мирового океана также является актуальной в связи с участвовавшими неконтролируемыми выбросами в окружающую среду отходов промышленных предприятий, продуктов жизнедеятельности городов, а также авариями на транспорте. Лидарная техника, позволяющая проводить экспрессные измерения загрязнений воды *in situ*, дает неоспоримые преимущества перед любыми традиционными химическими методами анализа. В первую очередь это вызвано тем, что химический состав пробы морской воды довольно быстро меняется со временем и уже через несколько часов (характерное время, необходимое для доставки образца в лабораторию и его химический анализ) спектр флуоресценции пробы воды может отличаться от первоначального, полученного непосредственно после отбора [6].

В развитие этих исследований нами была проведена морская экспедиция в районе порта Макае, штат Рио де Жанейро, Бразилия. Лидарный комплекс был установлен в контейнерной лаборатории на палубе небольшого судна (водоизмещение около 500 Т), расстояние между приемным телескопом и поверхностью воды не превышало 50 м. Судно курсировало вдоль берега (максимальное удаление в море 20 миль), пересекая устье реки, районы под-водных нефтяных трубопроводов, а также области интенсивного движения судов. На рис. 4 продемонстрированы примеры спектров

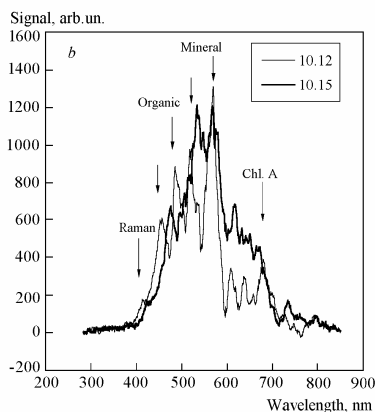


Рис. 4. Спектры эхо-сигнала из морской воды, зарегистрированные на борту судна в Атлантическом океане (район г. Макае, Бразилия) при зондировании излучением третьей гармоники Nd:YAG лазера. Судно двигалось в области перемешивания речной и океанической воды, в рамке указано местное время, скорость судна 7 узлов. Видно, что форма спектра эхо-сигнала быстро меняется, в спектре присутствуют компоненты, соответствующие минеральным и органическим примесям заборной воды, а также пики флуоресценции фитопланктона (в области 600 - 800 нм)

эхо-сигнала (при возбуждении третьей гармоникой Nd:YAG лазера), полученные в районе возможных антропогенных загрязнений океана, поскольку в этой области происходит вынос в океан вод реки, протекающей вблизи промышленных объектов. Там же находятся нефтяные терминалы проходят подводные трубопроводы. Видно, что как концентрация и состав растворенного органического вещества, так и содержание хлорофилла "а" в обследованном районе испытывает существенные вариации (спектры записаны с интервалом 3 минуты), что свидетельствует о возможности существования антропогенных источников загрязнений в обследованном районе во время наших измерений.

Заключение

Таким образом, в ходе наших экспериментов было показано, что созданный нами лидар одинаково успешно решает широкий круг задач, возникающих в процессе экологического мониторинга суши и мирового океана. Этот лидар может быть установлен на авианосителях (самолетах, вертолетах), автомобилях и судах.

Параллельное измерение спектров флуоресценции почвы, наземной растительности и морской воды выявило полное соответствие основных спектральных особенностей этих объектов.

Использование описанного выше лидара открывает реальную возможность (при использовании спутниковой навигационной системы) создания "мгновенных" (в масштабе характерных времен эволюции состояния верхнего слоя океана) карт загрязнения больших акваторий водоемов в зонах промышленных катастроф, вблизи больших городов, судоходных трасс и на других территориях, где требуется оперативная информация об экологическом состоянии водной среды.

Наконец, метод может оказаться полезным для мониторинга загрязнения почв и природных вод чужеродным органическим веществом, например, нефтепродуктами, а также для поисков древних органических веществ и следов жизни.

Работа была выполнена при частичной финансовой и организационной поддержке государственных учреждений Республики Бразилия CNPq, FEEMA, EMBRAPA и PetroBraz, Российских государственных программ "Фундаментальная метрология" и "Фундаментальная спектроскопия", а также Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 99-02-16591.

Литература

1. Measures R.M.. Laser Remote Sensing. Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons. New York, Toronto, Singapore, 1985, 542 p.
 2. Bunkin A.F., Voliak K.I. Laser remote sensing of the ocean. Methods and applications. John Wiley & Sons. New York, Toronto, Singapore, 2001, 273 p.
 3. Hoge F.E., Swift R.N., Appl. Opt. v.20, N 18, 3197-3205, (1981).
 4. Bunkin A.F., Davydov M.A., Rezov A.V., Surovegin A.L., Tsipenyuk D.Yu., Laser Physics, v.4, N 6, p.1198-1201, (1994).
 5. Bunkin A.F., Kolesnikov M.P., Pershin S.M. Physics of Vibrations, v.6, N 4, 249-255, 1998.
 6. A.F.Bunkin, S.M.Pershin BRAS, Physics of Vibrations, v.61, N 3, 158-163, (1997).
-

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА
НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛНАХ

Е.П.Кропоткина¹, Ю.А.Пирогов², С.Б.Розанов¹, С.В.Соломонов²

¹ *Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
117924, Москва, Ленинский пр., 53*

² *Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова,
117234, Москва, Ленинские горы*

1. Введение

Атмосферный озон является одной из важнейших малых газовых составляющих атмосферы, влияющей на климат, тепловой режим атмосферы, излучение, химию и динамику. Крайне важна роль защитного озонового слоя в предохранении жизни на Земле от губительного ультрафиолетового (УФ-Б) излучения Солнца.

Обнаруженные аномальные явления в озоносфере такие, как озоновые «дыры» и «минидыры», намечившееся глобальное уменьшение общего содержания озона [1] ставят ряд серьезных вопросов о причинах этих явлений, о возможном влиянии деятельности человека на озоносферу и об ожидаемых изменениях в озоновом слое в дальнейшем. Особенно важно знать закономерности изменений в озоновом слое над такими густонаселенными областями как Московский регион, т.е. там, где возможное истощение защитного озонового слоя может привести к серьезным последствиям для здоровья большого количества людей.

Целью исследований озонового слоя являются ответы на поставленные выше вопросы. Для этого необходим мониторинг озоносферы, задачами которого является оперативный контроль за ее состоянием путем регулярных наблюдений озонового слоя, постоянный контроль за вертикальным распределением содержания озона (ВРО) в стратосфере и мезосфере (примерные высоты 15-75 км). Полученные при этом экспериментальные данные важны для изучения возможных откликов озоносферы на возмущения естественного и техногенного происхождения, для исследования связей изменений в озоносфере с атмосферной динамикой и химией. Сопоставление этих экспериментальных данных с прогнозами изменений в озоновом слое, полученных из численного моделирования, необходимо для проверки этих прогнозов и развития современных теорий, описывающих атмосферные процессы.

Основная информация о ВРО получается с шаров-озонзондов («потолок» около 30 км), а также традиционными оптическими методами, наземными и бортовыми (ракетными и спутниковыми) в инфракрасной (ИК), видимой и ультрафиолетовой (УФ) областях спектра.

Мониторинг атмосферы на ММ волнах с поверхности Земли имеет ряд преимуществ перед традиционными методами зондирования и характеризуется существенными особенностями [2]. К ним относятся:

- возможность дистанционного зондирования озона и ряда других очень важных газовых составляющих атмосферы (кислород, водяной пар, окись хлора, окись углерода, азотные окислы и др.), на частотах их спектральных радиолний;

- возможность круглосуточных наблюдений молекул указанных газовых составляющих по их собственному тепловому радиоизлучению (в отличие от оптических методов в УФ области, где требуется внешний источник излучения, например, Солнце);

- значительно более слабое негативное влияние облаков на результаты зондирования;

- отсутствие помех от аэрозоля (в отличие от наблюдений в ИК, видимой и УФ областях);

- возможность проведения наблюдений с поверхности Земли, что значительно дешевле бортовых экспериментов;

- возможность регистрации ВРО до высот мезосферы, примерно до 75 км, что недостижимо для традиционных наземных оптических методов и лидаров («потолок» около 40 км).

В данной работе описаны аппаратура, методы и некоторые результаты регулярных наблюдений атмосферного озона на ММ волнах над Москвой.

2. Особенности формирования спектральной линии озона на миллиметровых волнах

Спектральные линии радиоизлучения озона и ряда других атмосферных газов, представляющих интерес для дистанционного зондирования на ММ волнах, формируются при переходах между вращательными уровнями молекул, населенность которых находится из условия термодинамического равновесия. Эти линии расположены в окнах прозрачности атмосферы в диапазоне длин волн 1-3 мм (центральные частоты сильных линий 101,7, 110,8, 142,2, 276,9 ГГц). Поскольку доплеровское уширение спектральных линий пропорционально частоте, то для ММ волн оно примерно в тысячу раз меньше, чем для спектров в видимой и ближней ИК областях. За исключением случаев очень малых давлений воздуха на высотах, превышающих 70-75 км, уширение спектральных линий в ММ диапазоне определяется столкновениями молекул, то есть пропорционально давлению. На больших высотах становится существенным доплеровское уширение.

При наземных наблюдениях на частотах, расположенных в пределах окон прозрачности тропосферы, поглощение в кислороде и водяном паре существенно только в тропосфере и им можно пренебречь в стратосфере. Поглощение в тропосфере определяется радиоастрономическими методами путем независимых широкополосных измерений излучения тропосферного фона и учитывается при спектральных наблюдениях озона [2]. Для наблюдения озона в данной работе выбрана оптически тонкая изолированная линия молекул этого газа, соответствующая вращательному переходу $10_{0,10}-10_{1,9}$. Центральная частота этой линии составляет 142,175 ГГц. Она расположена в центре окна прозрачности атмосферы 2 мм. Согласно расчетам [2], при наблюдениях на частотах этой линии с поверхности Земли под зенитным углом 70 градусов в зимних условиях яркостная температура фонового излучения атмосферы составляет около 100 К, а спектральная линия озона имеет яркостную температуру в центре линии, превышающую 30К, и характеризуется полушириной примерно 20 МГц. Такая линия может быть зарегистрирована супергетеродинамическим спектрорадиометром. Контур ее весьма специфичен и отражает вклад различных слоев мезосферы и стратосферы с быстро меняющимся по мере роста высоты давлением. Поскольку столкновения молекул, как упоминалось, являются основным механизмом

уширения спектральной линии вплоть до мезосферы, то на больших высотах, где давление относительно низко, формируются узкие линии, а на малых – широкие. Расчеты показывают, что форма контура спектральной линии чувствительна к вариациям содержания озона вдоль луча зрения и отражает особенности вертикального распределения концентрации молекул этого газа. Информация об этом распределении заключена в контуре спектральной линии, измеренной на различных частотах, что является физической предпосылкой решения обратной задачи – восстановления вертикального профиля озона из измеренной спектральной линии.

Среди известных методов решения обратной задачи следует отметить подход, основанный на методе Тихонова. Соответствующая методика решения обратной задачи, подробно описанная в [3], характеризуется высокой эффективностью и используется при обработке результатов наблюдений озонного слоя на миллиметровых волнах в ФИАН [2, 3]. Для повышения точности решения обратной задачи применен разностный метод, в котором используются не абсолютные значения яркостных температур, а их относительный спектральный ход. В этом методе вертикальный профиль озона восстанавливается по разностям между яркостными температурами, измеренными на нескольких парах частот в пределах контура спектральной линии, зарегистрированной спектрометрически [2, 3].

3. Аппаратура

Наблюдения атмосферного озона выполнялись на частотах рассмотренной выше спектральной линии 142,175 ГГц с помощью расположенного в Москве спектрометра (ознометра) ФИАН [2]. Спектрометр состоит из малошумящего супергетеродинного приемника, двух анализаторов спектра (АС) и персонального компьютера с интерфейсными модулями и программным обеспечением. В состав приемника входят квазиоптический антенный блок, преобразовательно-усилительный тракт и система стабилизации частот гетеродинов. Спектрометр установлен в лабораторном помещении перед окном, закрытым тонкой радиопрозрачной пленкой. Квазиоптический антенный блок приемника обеспечивает прием сигнала под оптимальным зенитным углом, который зависит от метеоусловий и обычно составляет 60-70 градусов. Антенный блок имеет два практически идентичных входных канала, переключаемых вращающимся плоским зеркалом модулятора с частотой около 75 Гц. Ширина несимметричных гауссовых диаграмм направленности входных каналов приемника составляет 2,8 градуса по уровню -10 дБ при диаметрах входных линз 120 мм.

На вход одного из каналов поступает сигнал от неба, на вход другого – опорный сигнал от охлаждаемой жидким азотом чернотельной нагрузки с яркостной температурой близкой к яркостной температуре неба. Периодически осуществляется калибровка спектрометра с помощью внешних чернотельных нагрузок при комнатной и близкой к азотной температурах. Использование внешних опорной и калибровочной нагрузок и идентичность каналов приемника позволили практически полностью исключить искажения в регистрируемых спектрах излучения неба из-за стоячих волн во входном тракте. Входящий в состав приемника диплексер обеспечивает подачу в смеситель сигнала от неба и колебаний первого гетеродина, а также однопольный режим работы приемника. Для дополнительного подавления шумов гетеродина в сигнальной и зер-

кальной полосах приема в тракте гетеродина перед диплексером установлены интерферометр Фабри-Перо и поляризационный интерферометр Майкельсона. Использование квазиоптических устройств на свободных гауссовых пучках излучения обеспечило низкий (не более $-35\dots-40$ дБ) уровень боковых лепестков диаграммы направленности спектрометра и малые (около 1 дБ) потери мощности сигнала до смесителя.

Созданный в ФИАН волноводный смеситель на планарном диоде Шоттки AA138B-3 (диоды из НИИПП, г. Томск) отличается низким уровнем шумов и потерь преобразования, простотой конструкции, надежностью в эксплуатации, возможностью глубокого охлаждения, низким требуемым уровнем мощности гетеродина [4]. При охлаждении смесителя до 85 К была получена однополосная шумовая температура смесителя 230 К. По своим параметрам смеситель не уступает лучшим известным аналогам как на сотовых, так и на планарных диодах. Однополосная шумовая температура спектрометра с данным смесителем на частоте 142 ГГц составляет около 700К при охлаждении входных каскадов и около 1500К без охлаждения.

Один из двух анализаторов спектра, АС-80, имеет 80 каналов. Полная ширина анализируемой полосы частот составляет 283 МГц, а ширина каналов возрастает ступенями от 0,2 МГц в центре линии до 20 МГц на ее крыльях. Второй анализатор спектра, узкополосный АС-120, имеет 120 одинаковых каналов шириной по 100 кГц при общей полосе 12 МГц. Стабильность частот гетеродинов спектрометра обеспечивается системами фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Разработанные в ФИАН аппаратура и методы дистанционного зондирования позволяют надежно регистрировать вертикальное распределение озона на высотах 15-75 км и изучать изменения в озоновом слое, связанными с быстропротекающими процессами (например, вызванные внутренними гравитационными и планетарными волнами с характерными периодами от нескольких минут до нескольких недель), а также исследовать и более продолжительные изменения, требующие многолетних наблюдений. При обработке результатов наблюдений используются данные аэрологического зондирования (вертикальные профили температуры, давления, поля геопотенциала, значения общего содержания озона и потенциальной завихренности), любезно предоставленные Гидрометцентром (ГМЦ) и Центральной аэрологической обсерваторией (ЦАО). Погрешности восстановленных профилей озона, как правило, не превосходят 5-7% для высот 20-50 км и не превышают 20-30% в остальной части диапазона зондируемых высот 15-75 км. Полученные с помощью этого озонметра профили озона совпадают в пределах погрешностей измерений со спутниковыми и озонзондовыми данными. Озонметр ФИАН был включен в состав глобальной озонметрической сети по ряду международных программ: DYANA (1990 г.), CRYSTA/MAHRSI (1994 г.), CRISTA/MAHRSI-2 (1997 г.), SOLVE 2000 (1999-2000 гг.).

4. Результаты наблюдений

Наблюдения вертикального распределения содержания озона над московским регионом на ММ волнах проводятся в ФИАН с 1986 г. [2, 3]. По результатам этих наблюдений построено высотное-временное распределение озона, проанализированы его особенности и установлены закономерности изменений озона на разных высотах. Зарегистрированные сезонные вариации озона

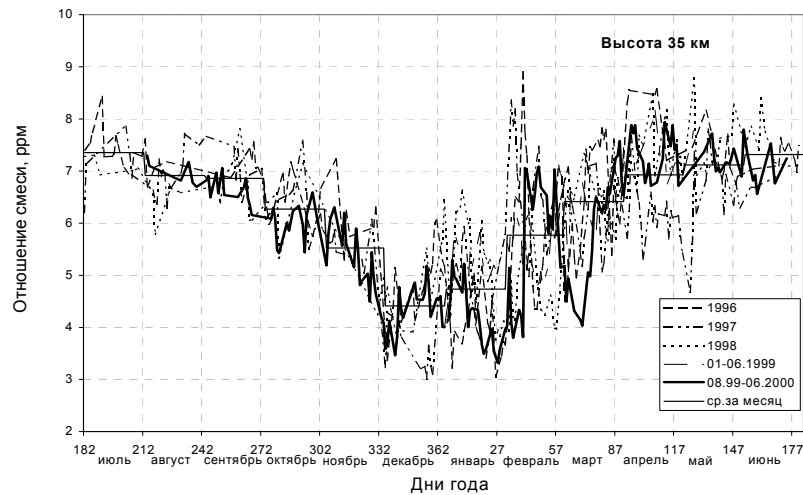


Рис.1. Изменения содержание озона над Москвой на высоте 35 км с 1996 по 2000 г.

приводят к цикличности с периодом 1 год. Этот годовой ход озона хорошо виден на рис.1, где представлены изменения содержания озона на высоте 35 км с 1996 по 2000 гг.

На этом же рисунке представлены среднемесячные значения содержания озона на этой высоте, полученные усреднением результатов наблюдений в пределах каждого месяца за указанный период наблюдений над Москвой. Поскольку на этой высоте на содержание озона влияют и динамика атмосферы (перенос озона воздушными потоками), и фотохимия, то причиной, вызывающей годовой ход озона является сезонная цикличность этих процессов (см., например, [1]), влияющая на концентрацию молекул озона. Анализ показал, что наблюдавшиеся сезонные изменения содержания озона качественно соответствует данным справочной модели озоносферы COSPAR [5]. Вместе с тем было обнаружено заметное систематическое отклонение результатов измерений на ММ волнах от этой модели, наиболее заметное в холодные полугодия. Хотя в отдельные периоды холодного полугодия профили озона были близки к данным модели (примеры на рис.2, а-в), однако в эти же холодные полугодия было обнаружено значительное уменьшение (истощение) озона в слое между 25 и 45 км по сравнению с моделью.

Такое истощение продолжалось до месяца, а величина его в отдельные периоды достигала 30-40% от значений модели (примеры на рис.2, г-е). Истощение озона над Москвой на высотах 25-45 км, как правило, совпадало по времени с некоторым уменьшением (обычно до 10-15%) общего содержания озона, измеренного над Московским регионом оптическими методами в ЦАО.

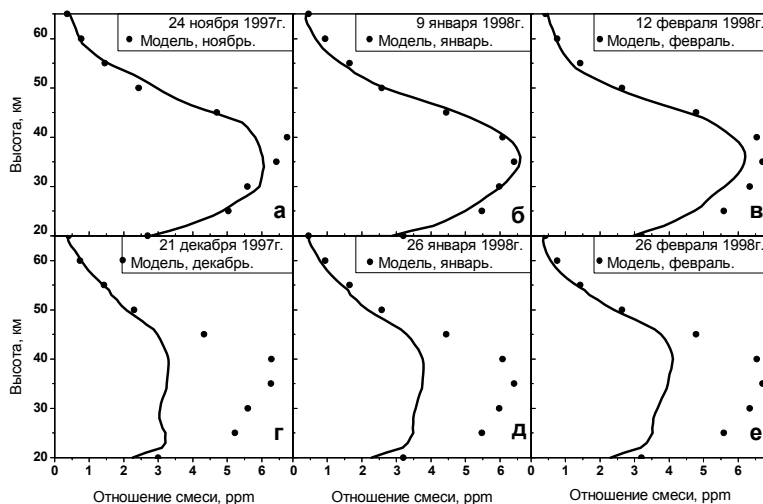


Рис.2. Примеры вертикального распределения содержания озона в холодный период 1997-1998 гг. при различных состояниях стратосферы над Москвой.

На рис.1 видно, что помимо годового хода имеются также более быстропротекающие изменения озона, образующие «шум» озоносферы с характерными временами вариаций от нескольких дней до нескольких недель. Величина (размах) таких колебаний содержания озона возрастает от лета к зиме. Оказалось, что на высоте 35 км короткопериодные колебания приводят к отклонениям от средних значений примерно до 1 ppm летом, а зимой величина этих отклонений возрастает до 2 ppm (в отдельных случаях даже превышает эту величину). Сопоставление полученных на ММ волнах результатов с данными аэрологического зондирования показало, что причинами этих короткопериодных вариаций является влияние на озон атмосферной динамики, перенос воздушных масс. В результате динамических процессов в стратосфере над Москвой происходят чередования воздушных масс, различающихся содержанием озона. При этом в холодное полугодие на смену обогащенному озоном воздуху появляется воздух с пониженным содержанием озона из центральной области зимнего полярного вихря (циркумполярного циклона), в котором, как известно [1], происходит разрушение озона. Известно также, что процессы атмосферной динамики активизируются в холодное полугодие [6]. Этим можно объяснить отмеченное выше возрастание изменчивости содержания стратосферного озона над Москвой в холодное полугодие. Как показали наблюдения, уменьшение содержания озона на высотах 25-45 км над Москвой обычно начинало происхо-

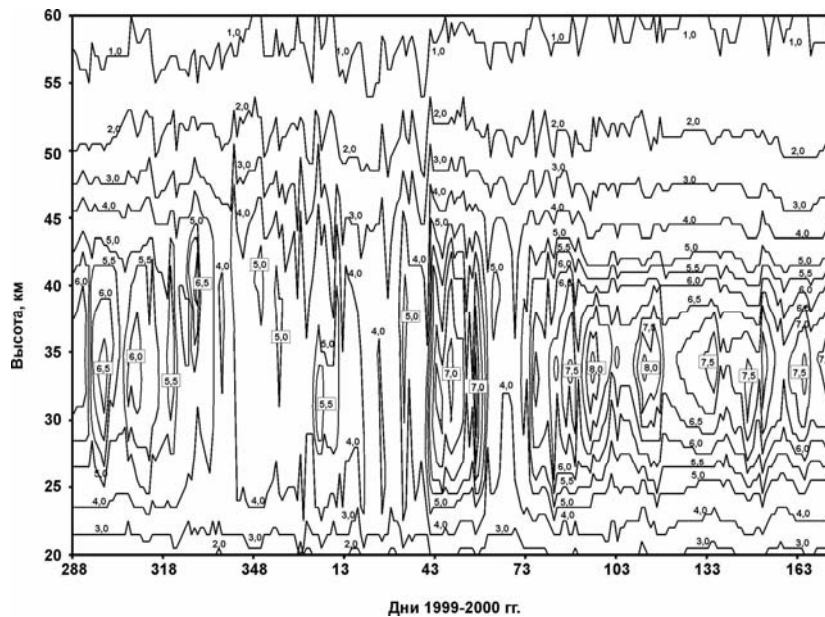


Рис.3. Высотно-временное распределение озона над Москвой в холодный период 1999-2000 гг.

дить в конце ноября - начале декабря, т.е. в период усиления полярного вихря. При большой интенсивности полярного вихря это уменьшение озона было заметно и тогда, когда центральная область вихря была удалена от Москвы и располагалась над Северным полюсом. При смещениях полярного вихря к Москве его влияние на озоновый слой над Москвой возрастало и приводило к еще более значительному понижению содержания озона. Развивалось истощение озонового слоя.

На рис.3 представлено высотно-временное распределение озона над Москвой, полученное в результате наблюдений на миллиметровых волнах в холодное полугодие 1999 - 2000 гг. Изолиниями показаны уровни равного содержания озона (в единицах отношения смеси, ppm). Уменьшение содержания озона в этот период также проявилось наиболее заметно на высотах 25-45 км и происходило при появлении над Москвой воздуха центральной области полярного вихря.

Обнаружено прогнозируемое долговременное уменьшение озона в верхних слоях стратосферы (35-50 км), полученное в результате сопоставления результатов наблюдений в ФИАН, усредненных за период 1996-2000 гг., с усредненными данными спутниковых измерений в конце 70-х – начале 80-х годов на широте Москвы. Для этого были использованы спутниковые данные Nimbus 7 LIMS, Nimbus 7 SBUV, AE-2 SAGE, SME UVS, SME IR, которые были положе-

ны в основу справочной модели озоносферы [5]. Сравнение показало, что зарегистрированное на ММ волнах содержание озона на 35-50 км в среднем несколько ниже, чем по данным этих спутников. Это отличие можно объяснить уменьшением содержания озона со времени указанных спутниковых наблюдений, что позволяет оценить убыль озона и ее скорость. Оказалось, что величина этой убыли зависит от высоты. Наибольшее отличие от модели обнаружено в верхней стратосфере и составляет около -13% на высоте 40 км, что соответствует скорости уменьшения озона около 7,5% за 10 лет, или 0,75% в год (здесь учтено влияние на озон изменений активности Солнца в пределах 11-летнего цикла). Этот результат хорошо согласуется с данными других экспериментов, указанных в работе [1], и соответствуют прогнозам, согласно которым наиболее значительное истощение озонового слоя на ранних стадиях происходит именно вблизи 40 км, где расположен верхний максимум концентрации окиси хлора, участвующей в разрушении озона в газофазных каталитических реакциях.

5. Заключение

С помощью созданного в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН озонметра ММ диапазона волн в течение ряда лет проводятся регулярные наблюдения атмосферного озона над Москвой. Исследованы особенности высотно-временного распределения молекул озона в стратосфере и мезосфере, изучено наметившееся истощение озонового слоя. Анализ показал, что причиной возникающего в холодное полугодие значительного уменьшения содержания озона над Москвой является влияние процессов в полярном вихре. Выполненные наблюдения дают важную информацию об изменениях в озоновом слое различного масштаба времени, подтверждая, в том числе, прогнозы долговременной убыли озона. Результаты этих наблюдений соответствуют общей картине изменений, происходящих в озоносфере Северного полушария и имеющих крупномасштабный характер (см., например, [1]). Наблюдения озонового слоя на миллиметровых волнах важны для решения актуальных задач аэронавтики и экологии, для построения современной модели озоносферы и проверки прогнозируемых изменений в ней. Необходимо создание наземной озонметрической сети на базе передвижных озонметров ММ диапазона волн, а также создание сети для мониторинга на ММ волнах окиси хлора и ряда других важных газовых составляющих атмосферы.

Данная работа выполнена в рамках Федеральной программы "Интеграция" Авторы благодарны чл.-корр. РАН И.И.Собельману за поддержку работы, а также С.П.Перову, Г.М.Крученицкому и В.А.Юшкову (ЦАО) и Т.Г.Иванидзе и Т.С.Кружковой (ГМЦ) за любезно предоставленные данные аэрологического зондирования. Авторы признательны А.Н.Лукину и В.Н.Леонову за участие в работе. Работа поддержана грантами РФФИ 99-02-18132, 00-05-64976 и 00-15-96586.

Литература

1. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998. //World Meteorological Organization. Global ozone research and monitoring project. Rep. No.44. Geneva: WMO, 1999.
 2. Solomonov S.V., Rozanov S.B., Kropotkina E.P., Lukin A.N. //Proc. SPIE, 1998, v.3406, p.135.
-

3. Гайкович К.П., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В. //Изв. АН. Физика атмосферы и океана, 1999, т.35, №1, с.86.
4. Rozanov S.B., Lukin A.N., Solomonov S.V. //Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 1998, v.19, No.2, p.195.
5. Keating G.M., Chiou L.S., Hsu N.S. //Adv. Space Res., 1996, v.18, No.9/10, p. 11.
6. Тарасенко Д.А. Структура и циркуляция стратосферы и мезосферы Северного полушария. Л.: Гидрометеиздат, 1988.

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Ларкина В.И.¹, Ружин Ю.Я.¹, Сергеева Н.Г.², Сенин Б.В.³

¹Институт земного магнетизма, ионосферы, распространения радиоволн РАН, г. Троицк Московской области, 142190.

²Полярный геофизический институт КФ РАН, г. Мурманск, 183010,

³ПО СОЗМОРГЕО, г. Геленджик Краснодарского края, 358470

Анализируя спутниковую информацию над различными тектоническими структурами, отличающимися физическими характеристиками и активностью, над разломами Южно-Баренцевской впадины было обнаружено появление одновременных аномальных всплесков интенсивности низкочастотных (0.1-20 кГц) шумовых излучений и потоков низкоэнергичных электронов (50-120 эВ) на высоте спутника «Интеркосмос-19» ~ 970 км. Корреляционный анализ показал, что наблюдаемые всплески низкочастотных излучений носят электромагнитный характер. Коэффициент корреляции одновременных всплесков интенсивности магнитной и электрической компонент поля излучений в рассматриваемом районе составлял 0.81-0.98. По карте распределения ионов водорода, гелия и кислорода, полученной по измерениям со спутника ISS-b над Южно-Баренцевой впадиной, обнаружено, что область наблюдения одновременных флуктуаций интенсивности низкочастотных шумовых излучений и низкоэнергичных электронов совпадает с областью регистрации интенсивных потоков легких ионов (водорода, гелия, кислорода и т.п.). Показано, что полученные результаты могут быть связаны с двумя главными причинами – активным развитием трещин растяжения над глубинными разломами в земной коре и/или наличием радиоактивного загрязнения в водном слое и донных осадках вдоль западной периферии Новой Земли, а так же вдоль западной и южной окраин Южно-Баренцевской впадины.

Аппаратура волновых экспериментов на ИСЗ «Интеркосмос» представляла собою комбинацию широкополосного приема информации с выполнением на борту ИСЗ спектрального анализа в окрестности нескольких частотных линий. Использование бортовых спектроанализаторов позволило получить полезную информацию об абсолютной интенсивности и о пространственном распределении интенсивности излучений.

При анализе результатов обработки спутниковой информации (ИСЗ «Интеркосмос 19») было установлено, что электромагнитные процессы регистрируемые на высотах верхней (500-1000 км) ионосферы могут быть отражением процессов происходящих в литосфере [1]. Так же нами установлено, что электромагнитные процессы связаны не только с катастрофическими проявлениями сейсмической активности, но и с текущими процессами, происходящими в ли-

тосфере. Так на борту спутника «Интеркосмос 19» при его пролете над глубинными разломами литосферы в Баренцевом и Карском морях были зарегистрированы всплески интенсивности магнитной и электрической составляющих поля низкочастотных излучений [2].

В данном сообщении приведены результаты комплексного анализа спутниковой информации полученной при пересечении его траекторией структур литосферы Земли. Для анализа использовались одновременно зарегистрированные параметры: интенсивность магнитной и электрической компонент поля низкочастотных излучений (0.1-20 кГц), плотность потока электронов и температура плазмы на высоте спутника.

В качестве примера рассмотрим данные за 15 марта 1979 г. Спутниковая траектория пересекала ряд крупных структурных элементов земной коры: Медвежинско-Надеждинскую троговую систему, Центральный массив микроплиты Свальдборда, Нордкапский трог, Восточно-Баренцевский трог, Ново-земельскую микроплиту (см. рис.1). Все эти элементы ограничены или разделены глубинными разломами достаточно древнего заложения, сохраняющими свою активность в течение длительного периода.

Геофизическая активность 15 марта 1979 г. была относительно спокойной, последнее возмущение имело место за неделю. В обсуждаемые дни значение Кр- индекса магнитной активности не превышало 2.

Сравнение структур электромагнитных излучений и разрезов земной коры позволяет увидеть чередование зон спокойных и возмущенных полей низкочастотных излучений в согласии со структурой Земли. Выделено несколько характерных для этого пролета вариаций полей электромагнитных излучений. В результате анализа экспериментального материала установлено, что зонам глубинных разломов литосферы соответствуют устойчивые вариации интенсивности низкочастотных излучений в полосе частот 0.1-20 кГц (диапазон волновой аппаратуры на борту ИСЗ). Всплески излучения носят электромагнитный характер, так как зарегистрированы одновременно магнитная и электрическая составляющие поля низкочастотных излучений. Для характеристики зависимости двух случайных величин X и Y на практике используют безразмерную величину, называемую коэффициент корреляции R. Выполнив корреляционный анализ одновременных всплесков интенсивности поля низкочастотных излучений (магнитной и электрической компонент) мы получили сведения о подобию формы всплесков компонент поля излучений. На витке 233 (высота ИСЗ ~580 км) наблюдаемое излучение, преимущественно электромагнитное, коэффициент корреляции на всех частотах превышал 0.63.

Таблица 1. Вариации коэффициента корреляции R между всплесками интенсивности магнитной и электрической компонент поля низкочастотных излучений

Частота, Гц	R
140	0.6518
450	0.6914
800	0.7846
15000	0.6310

Одновременно со всплесками низкочастотных излучений над зонами глубинных разломов зарегистрированы всплески потоков низкоэнергичных электронов ($E_e=120$ эВ) и увеличение температуры на высоте спутника [2, 3].

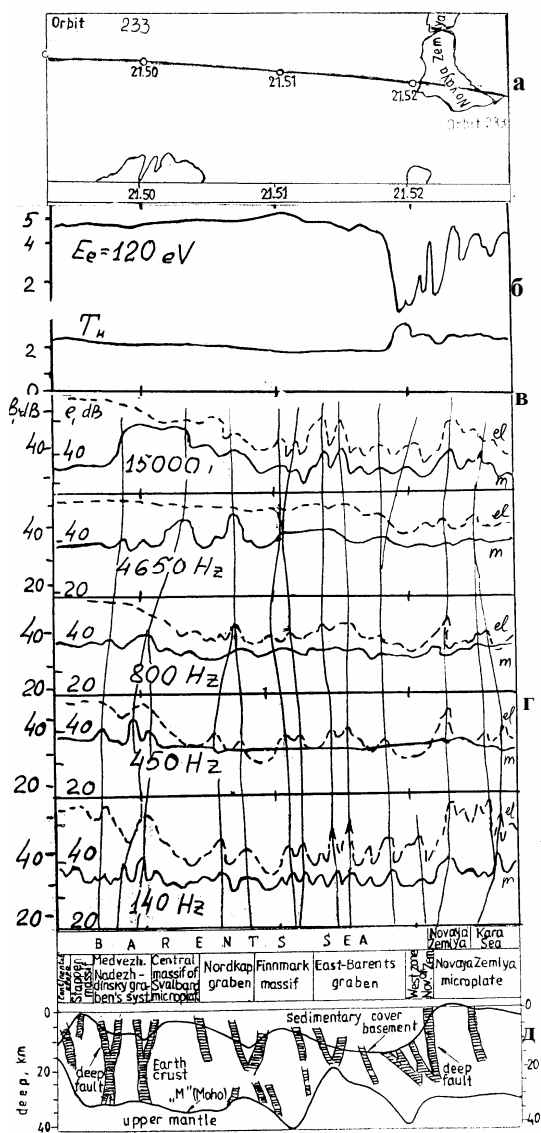


Рис. 1. Вариации интенсивности (магнитной и электрической компонент) поля низкочастотных излучений, плотности потока мягких электронов и температуры окружающей спутник плазмы, зарегистрированные 15 марта 1979 г. на борту спутника «Интеркосмос 19» вдоль проекции орбиты 233 при пролете спутника над контрастными формами рельефа твердой Земли. а – часть проекции орбиты спутника над акваторией Баренцева и Карского морей; б – плотность потока мягких (высыпающихся) электронов с энергией $E_e = 120 \text{ эВ}$; в – температура плазмы (T_n) окружающей спутник; г – фрагменты записей интенсивности магнитной (m) и электрической (el) компонент поля в децибеллах по отношению к уровню собственных шумов: 10^{-5} мВм/Гц – для магнитной составляющей и 10^{-8} мВм/Гц – для электрической. В левой части рисунка указаны частоты настройки каналов. Полоса пропускания каналов составляла 1/8 от центральной частоты канала; д – тектонический разрез земной коры вдоль проекции орбиты ИСЗ на поверхность Земли.

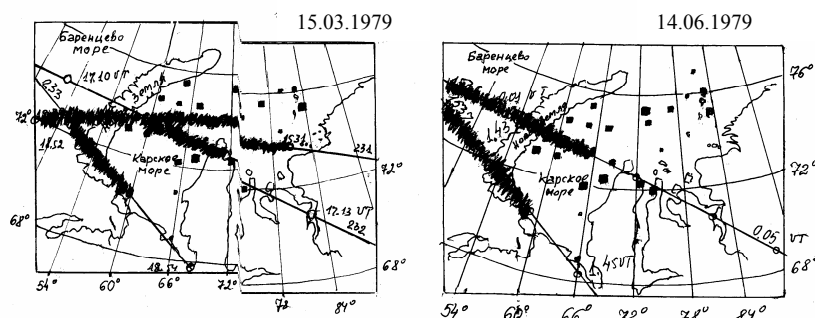


Рис. 2. Проекция орбит спутника «Интеркосмос 19» на поверхность Земли в Баренцево-Карском регионе. Карандашом заштрихованы части проекций орбит, где наблюдались одновременные флуктуации интенсивности шумовых излучений и потоков высыпающихся электронов с энергией $E_e=120$ эВ

В настоящей работе мы покажем, что существует еще одна причина для появления аномалий на высотах спутников. На рисунок с информацией о содержании цезия-137 в поверхностном слое донных отложений Карского моря [4, 5], мы нанесли проекции орбит 231-233 спутника «Интеркосмос 19» (см. рис. 2). Части проекций заштрихованы там, где регистрировались одновременно флуктуации интенсивности низкочастотных излучений, потоков мягких высыпающихся электронов и температуры окружающей спутник плазмы. На рис. 2а приведена информация за 15 марта 1979 г. ($E_e=120$ эВ), на рис. 2б – за 14 июня 1979 г. ($E_e=50$ эВ). Отметим, что содержание ^{137}Cs в поверхностном слое донных отложений открытой части Карского моря изменяется [4] в диапазоне от значений уровня минимальной детектируемой величины до 31,5 Бк/кг сухого веса, в то же время в Баренцевом море до 8,8 Бк/кг. Авторы [4] связывают повышение концентраций радиоактивных элементов с техногенным загрязнением района, которое обусловлено последствиями испытаний ядерного оружия и выносом радионуклидов из Европы и Северной Америки атлантическими течениями. Видно, что аномалии зарегистрированные на борту спутника достаточно четко локализованы в зоне повышенной активности.

Нами просмотрено большое количество сеансов спутниковой информации над выделенным регионом. Обнаружено, что зоны наблюдения одновременных мелкомасштабных колебаний интенсивности низкочастотных излучений, плотности потока низкоэнергичных частиц (электронов) и температуры плазмы действительно совпадают с зонами техногенных загрязнений.

Учитывая, что сейсмичность, с которой часто связывают повышенные содержания радона в приземных эманациях, в данном районе весьма слаба, наблюдаемое здесь сочетание ионосферных эффектов, таким образом, может отражать наличие радиоактивного загрязнения в приземном слое атмосферы, водном и придонном слоях. Это открывает определенные перспективы в применении материалов спутниковых измерений ионосферных электромагнитных эффектов и результатов их интерпретации не только для изучения активных глубинных структур литосферы, но и для контроля (мониторинга) радиоактивного загрязнения среды.

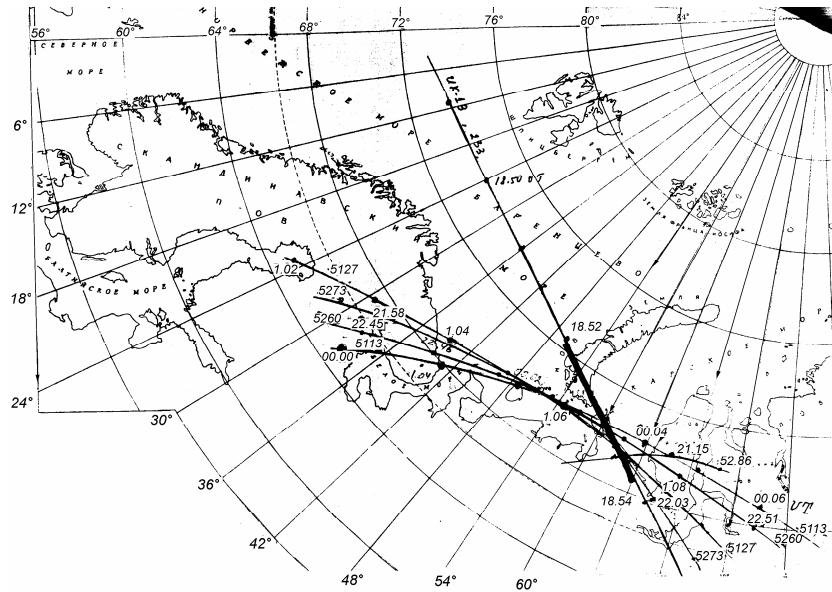


Рис. 3. Проекция орбит двух спутников: Интеркосмос 19 и ISS-b в марте 1979г. Заштрихована часть орбиты 233 спутника Интеркосмос 19, где отмечены одновременные флуктуации интенсивности низкочастотных шумов и потоков низкоэнергичных электронов

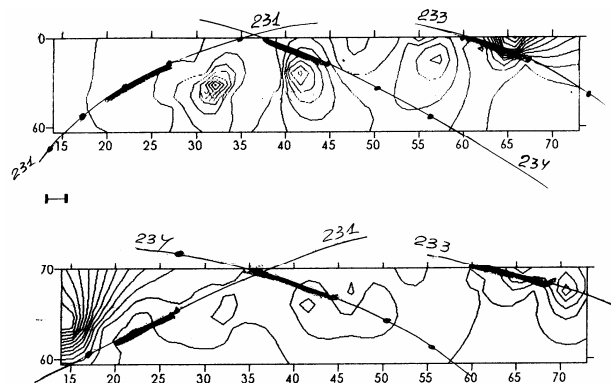


Рис. 4. Пространственное распределение интенсивности ионов гелия и водорода, полученное по данным японского спутника ISS-b

На рис. 3 показаны проекции орбиты 233 спутника «Интеркосмос 19» и проекции орбит японского спутника ISS-b (высота~1070 км), [6]. Часть проекции орбиты 233 зачернена. В это время на борту спутника «Интеркосмос 19» зарегистрированы одновременные флуктуации интенсивности низкочастотных излучений и потоков высypающих электронов с энергией $E_e=120$ эВ. Мы рассматриваем здесь информацию двух спутников в районе Южно-Баренцевой впадины и южной части Новой Земли.

На рис. 4 показано распределение ионов водорода и гелия в области географических широт $60^\circ-70^\circ$ и долгот $15^\circ-75^\circ$, полученное по результатам измерений на спутнике ISS-b над этим же регионом, и также схематично нанесены части проекции орбит 231, 233 и 234 спутника «Интеркосмос 19». Части орбит зачернены, где мы наблюдали одновременные флуктуации интенсивности шумов и частиц. Как видно из этого рисунка область наблюдения флуктуаций совпала с областью наблюдения интенсивных потоков ионов водорода и гелия. Мы предполагаем, что полученные результаты могут быть связаны с двумя главными причинами – активным развитием трещин растяжения над глубинными разломами в земной коре и наличием радиоактивного загрязнения в водном слое и донных осадках вдоль западной периферии Новой Земли, а также вдоль западной и южной окраин Южно-Баренцевской впадины.

Выводы

Анализируя спутниковую информацию над различными тектоническими структурами, отличающимися физическими характеристиками и активностью, над разломами Южно-Баренцевской впадины было обнаружено появление одновременных аномальных всплесков интенсивности низкочастотных (0.1-20 кГц) шумовых излучений и потоков низкоэнергичных электронов (50-120 эВ) на высоте спутника «Интеркосмос-19» ~ 970 км.

В результате сопоставления данных разных спутников и комплексного анализа нами получено следующее:

1. Над зонами глубинных разломов литосферы зарегистрированы устойчивые всплески интенсивности низкочастотных излучений в полосе частот 0.1-20 кГц диапазон волновой аппаратуры на борту ИСЗ. Всплески излучения носят электро-магнитный характер, зарегистрированы и магнитная и электрическая составляющие поля низкочастотных излучений. Коэффициент корреляции превышал 0,63.

2. Над Баренцево-Карской подвижной континентальной платформой наблюдались одновременно вариации интенсивности низкочастотных излучений и увеличение температуры на 20-25% плазмы на высоте спутника (~650 км) и всплески потоков низкоэнергичных электронов ($E_e=120$ эВ). Более того, область наблюдения одновременных флуктуаций интенсивности низкочастотных излучений и потоков низкоэнергичных электронов совпала с областью наблюдения интенсивных потоков ионов водорода и гелия по данным японского спутника ISS-b.

3. Зоны наблюдения одновременных мелкомасштабных колебаний интенсивности низкочастотных излучений, плотности потока низкоэнергичных частиц (электронов) и температуры плазмы совпадают с зонами техногенных загрязнений.

4. Полученная картина наблюдений является устойчивой. Через три месяца после описываемых наблюдений (событий) на 1537 витке (14.06.1979 г.) спут-

Секция 5. Физические методы мониторинга природных сред 161

ник «Интеркосмос 19» пролетал над теми же самыми разломами (проекция орбит 233 и 1537 очень близки). Результаты были получены аналогичные, что послужило основанием для вывода об устойчивости наблюдаемых явлений в пространстве.

Устойчивая корреляция между распределением зон активных разломов в литосфере и вариаций интенсивности низкочастотных излучений в измеряемом диапазоне 0.1-20 кГц предполагает возможность интерпретировать некоторые хорошо выраженные максимумы интенсивности излучений как признаки разломов в земной коре при отсутствии прямых тектонических данных и таким образом предсказывать активные тектонические формы. Однако, наличие в регионе радиоактивных загрязнений не исключает возможности их участия в генерации аномалий. Спутниковые измерения по сравнению с (известными) наземными измерениями позволяют существенно расширить географию контролируемых областей и выявлять зоны радиоактивных загрязнений.

Литература

1. Ларкина В.И., Наливайко А.В., Гершензон Н.И. и др. Наблюдения на спутнике «Интеркосмос 19» ОНЧ излучений связанных с сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэронавигация. 1983. Т. 23, № 6. С. 842-846
2. Мигулин В.В., Ларкина В.И., Сергеева Н.Г., Сенин Б.В. Отражение региональных структур литосферы в спутниковых наблюдениях электромагнитных излучений // Доклады Академии наук. 1997. Том 357, №2. С. 252-254.
3. Ларкина В.И., Мигулин В.В., Сергеева Н.Г., Сенин Б.В. Электромагнитное излучение над глубинными разломами литосферы по измерениям на спутнике // Доклады Академии наук. 1998. Том 360, №6. С. 814-818.
4. Матишов Г., Матишов Д., Щипа Е., Риссанен К. Радионуклиды в экосистеме региона Баренцева и Карского морей. Апатиты, КНЦ РАН, 1994, 237 стр.
5. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Намятов А.А. Искусственные радионуклиды в донных отложениях Карского моря. В кн.: Биология и океанография Карского и Баренцева морей (по трассе Севморпути). Апатиты, КНЦ РАН, 1998, стр. 422 – 430.
6. Summary Plots of Ionospheric Parameters obtained from Ionosphere Sounding Satellite – b. Vol. 3 // Issued in August 1983 by Radio Research Laboratories Ministry of Post and Telecommunications. Japan. 286 p.

МОНИТОРИНГ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ В ГАММА-ДИАПАЗОНЕ

С.И.Свертилов¹, М.И.Кудрявцев², В.В.Богомолов¹, Ю.И.Денисов¹,
О.В.Морозов¹, В.М.Панков²

¹НИИЯФ им. Д.В.Скобелева МГУ

²Институт космических исследований РАН

В НИИЯФ МГУ совместно с ИКИ РАН разработан широкоапертурный гамма-телескоп «Гаммаскоп» [1], предназначенный для фундаментальных астрофизических наблюдений всего неба (All Sky Monitor, [2]) на космических

аппаратах в жестком диапазоне электромагнитного спектра. При ориентации прибора в направлении на Землю он может использоваться для проведения мониторинговых наблюдений и картографирования в гамма-диапазоне как верхней атмосферы Земли (в случае его установки на орбитальном космическом аппарате), так и поверхности Земли (в случае размещения прибора на летательном аппарате, например, вертолете). Благодаря широкому полю зрения, возможности построения изображений в жестком излучении и спектрометрическим характеристикам прибор обеспечивает мониторинг дистанционный контроль радиационной обстановки, определение изотопного состава и распределения концентрации радиоактивных элементов в верхней атмосфере или на поверхности Земли в зависимости от условий его размещения.

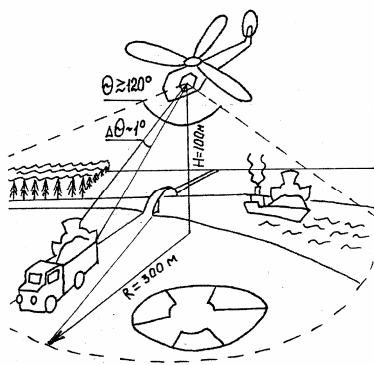


Рис. 1. Условия размещения и возможности прибора «Гаммаскоп»

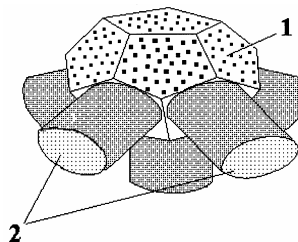


Рис. 2. Общий вид гамма-телескопа «Гаммаскоп»;
1 - элементы кодирующей маски;
2 - модули ПЧД

В ходе мониторинговых наблюдений в гамма-диапазоне атмосферы Земли из космоса могут быть получены данные об изотопном составе верхней атмосферы. В случае крупномасштабных техногенных катастроф (типа аварии на Чернобыльской АЭС) или разрушения космических аппаратов с ядерной силовой установкой может быть получена информация о динамике радиационного загрязнения верхней атмосферы и осуществлена локализации областей, загрязненных радионуклидами [3]. Контроль радиационной обстановки в космосе особенно актуален в связи с широким распространением бортовых вычислительных средств, элементы которых обладают, как правило, высокой радиационной чувствительностью.

В случае размещения широкоапертурного гамма-телескопа на вертолете (см. рис. 1) обеспечивается возможность оперативно и дистанционным образом проводить радиационное обследование объектов, недоступных другим методам, получать изображения исследуемых объектов или участков местности в гамма-лучах. При технологических авариях, сопровождающихся выбросами радиоактивных веществ, загрязнение поверхности Земли происходит, как правило, не-

Секция 5. Физические методы мониторинга природных сред 163

равномерно. Так, известно, что при авариях подобных катастрофе на Чернобыльской АЭС, взрыве в Челябинской области, в атмосферу было выброшено более 10^6 Кюри, общая площадь загрязнения составила $\sim 10^5$ км², при этом загрязненность отдельных районов достигала $>10^3$ Кюри/ км². Для локализации загрязненных областей в подобных зонах экологических катастроф требуются измерения распределений активности с высоким пространственным разрешением на больших территориях. При ориентации широкоапертурного гамма-телескопа непосредственно в область загрязнения, он может быть использован для получения карты загрязненных участков поверхности Земли даже в случае малой активности. Минимальные физико-технические характеристики прибора, позволяющие решать широкий класс задач, следующие: диапазон энергий детектируемых фотонов 0.05-10 МэВ поле зрения $\sim 2\pi$ ср, эффективная площадь ~ 1000 см², угловое разрешение $\leq 3^\circ$, энергетическое разрешение $\Delta E/E \sim 10\%$ для линии ¹³⁷Cs 0.661 МэВ, масса ~ 130 кг, габариты $\sim 0.7 \times 0.7 \times 0.7$ м³.

В основе конструкции широкоапертурного гамма-телескопа «Гаммаскоп» лежит известная идея сочетания кодирующей маски и позиционно-чувствительного детектора (ПЧД). Такая комбинация достаточно широко применяется как в астрофизических, так и в прикладных исследованиях для получения изображений в жестком (рентгеновском и гамма) излучении [4]. Однако основная особенность прибора «Гаммаскоп», благодаря которой обеспечивается возможность получения изображений наряду с широкой апертурой прибора, заключается в использовании кодирующей маски, конфигурация которой максимально приближена к сферической. В частности, она может быть выполнена в виде сборки из отдельных идентичных элементов в форме правильных пятиугольников, которые крепятся на специальной конструкции типа додекаэдра. При этом для максимальной компактности ПЧД прибора также должен быть изготовлен из отдельных идентичных модулей (блоков), которые должны размещаться напротив соответствующих элементов маски. Таким образом, аппарат «Гаммаскоп» представляет собой сборку из 6 блоков ПЧД и 6 элементов кодирующей маски, которые должны быть установлены на соответствующих плоскостях специальной фермы, имеющей форму додекаэдра (см. Рис. 2). Аппаратура также должна включать процессорный блок с системой визуализации информации.

В блоках ПЧД используются сцинтилляционные позиционно-чувствительного «фосфич»-детекторы, состоящие из набора относительного большого количества (~ 100) кристаллов NaI(Tl) (пикселей) малого размера ($\sim \varnothing 2.0 \times 3.0$ см³), используемых в качестве основных регистрирующих элементов, а также из расположенного под ними сцинтилляционного кристалла CsI(Tl). При этом оба сцинтиллятора просматриваются одними и теми же фотоумножителями. Кристалл CsI играет роль активной защиты от фонового гамма-излучения, а также может использоваться в качестве световодной системы, обеспечивающий перераспределение света от детектирующих кристаллов NaI на фотоумножители (см. Рис. 3). Благодаря эффекту полного внутреннего отражения (в случае, если между кристаллами NaI(Tl) и CsI(Tl) не обеспечен оптический контакт) свет от отдельного «сработавшего» пикселя распространяется в кристалле CsI(Tl) в пределах конуса, ширина которого определяется углом пол-

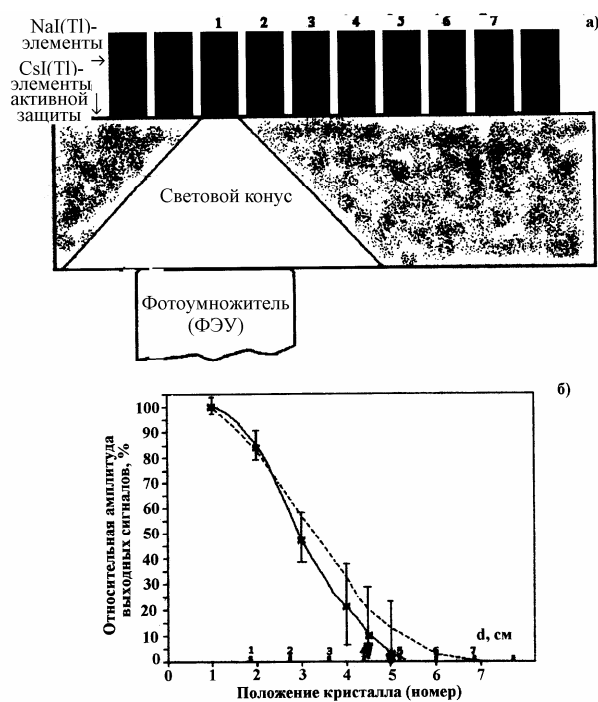


Рис. 3. Эскиз конструкции модуля ПЧД (а) и зависимости амплитуды выходного сигнала от положения кристалла (б)

ного внутреннего отражения в кристалле CsI(Tl). Таким образом, обеспечивается неравномерная засветка входных окон фотоумножителей, что дает возможность, используя относительно небольшое количество ФЭУ, идентифицировать «сработавший» кристалл NaI(Tl) при достаточно простой кодировке амплитуд выходных сигналов фотоумножителей.

Конструкция модуля ПЧД должна обеспечивать достаточно жесткое крепление всех элементов модуля, включая пиксели (кристаллы NaI(Tl)), активную защиту и фотоумножители в одном корпусе, который следует изготавливать из достаточно легких и прочных материалов (типа дюраль). В этом же корпусе должны быть установлены необходимые элементы электроники, включая высоковольтные блоки питания ФЭУ, предусилители выходных сигналов ФЭУ, элементы схем, обеспечивающих разделение выходных сигналов ФЭУ по форме импульсов и кодировку пикселей, а также элементы внутренней памяти и сопроцессор. Конструкция должна также обеспечить надежную светоизоляцию детектирующих элементов, защиты и фотоумножителей.

Зависимости, характеризующие ослабление выходного сигнала ФЭУ при смещении относительно его входного окна «засвечивающего» кристалла NaI(Tl) по поверхности кристалла CsI(Tl), даны на рис. 3(б). Прерывистая линия – результат расчета, сплошная линия – аппроксимация измененных значений. Верхняя шкала оси абсцисс характеризует смещение относительно центра ФЭУ, нижняя шкала оси абсцисс – позицию (см. (а)) кристалла NaI(Tl), в которой проводилось измерение амплитуд выходных сигналов.

В ходе работ по созданию прибора на сегодняшний день решены две группы задач, связанных с определением специфических свойств полусферической ко-дирующей маски и разработкой оптимальной конструкции модуля ПЧД.

Поскольку маска является пассивным элементом телескопа, ее физические свойства определяют главным образом эффективность поглощения падающего гамма-излучения. В плане построения изображений основными являются ее «математические» свойства. Поэтому для определения оптимальной конфигурации и основных характеристик полусферической маски использовался метод компьютерного моделирования. В результате были разработаны программы, позволяющие восстанавливать изображение в гамма-лучах, фиксируемое в поле зрения прибора, по выходным показаниям позиционно-разрешающих элементов детектора.

В ходе компьютерного моделирования процессов построения изображений в гамма-телескопе был осуществлен выбор оптимального, в плане условий и задач эксперимента, узора кодирующей маски, для которого методом численного моделирования получены изображения нескольких источников и фона для разных типов конфигурации гамма-телескопа. Пример восстановленного изображения точечного источника в поле зрения прибора, а также оптимальная конфигурация узора кодирующей маски приведены на рис. 4.

Были проанализированы вероятные фоновые условия, с учетом которых оптимизированы параметры фосвича ПЧД, в том числе определены оптимальные толщины детектирующих элементов и защиты. Были рассчитаны основные физические характеристики детекторного узла модуля ПЧД прибора. В частности, были рассчитаны энергетические зависимости эффективности регистрации гамма-квантов в основном детекторе (кристаллы NaI(Tl)) и активной защите (CsI(Tl)) при различных условиях отбора «полезных» гамма-квантов. Было по-

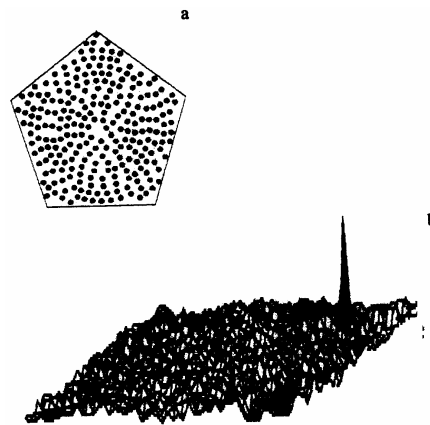


Рис. 4. Конфигурация узора пятиугольного элемента кодирующей маски (а). Восстановленное изображение точечного источника, смещенного на 25° относительно оси прибора (б)

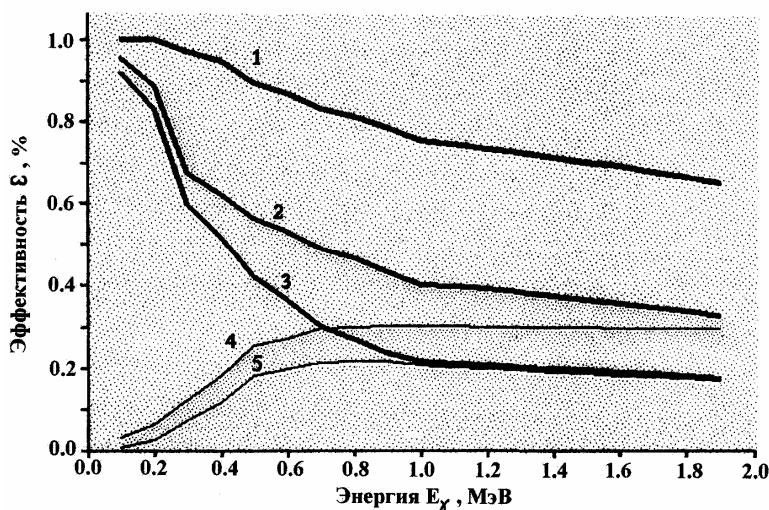


Рис. 5. Энергетические зависимости эффективности регистрации гамма-квантов: 1 – для полного потока, регистрируемого всем детектором (NaI(Tl) + CsI(Tl)); 2 – для гамма-квантов, падающих в пределах поля зрения прибора с исключением только тех событий, для которых энерговыделение в кристалле CsI(Tl) больше чем в кристалле NaI(Tl); 3 – для гамма-квантов, падающих в пределах поля зрения прибора с полным исключением событий в кристалле CsI(Tl); 4 – для гамма-квантов, падающих вне поля зрения прибора с исключением только тех событий, для которых энерговыделение в кристалле CsI(Tl) больше чем в кристалле NaI(Tl); 5 – для гамма-квантов, падающих вне поля зрения прибора с полным исключением событий в кристалле CsI(Tl).

казано, что оптимальная эффективность регистрации гамма-квантов в поле зрения прибора в рабочем диапазоне энергий обеспечивается при условии запрета не всех событий, сопровождающихся энерговыделением в активной защите, а только тех, для которых это энерговыделение меньше, чем в основном детекторе. Соответствующие кривые изображены на Рис. 5. Было также проведено моделирование возможного вклада различных фоновых компонентов в аппаратурный фон модуля ПЧД, даны оценки его возможной величины в различных энергетических диапазонах.

Была разработана конструкция и определены физические характеристики одного модуля ПЧД, при которых обеспечивается сочетание оптимальной геометрии прибора и достаточная гибкость при его окончательном проектировании. С учетом этого был разработан и создан лабораторный образец модуля ПЧД с эффективной площадью $\sim 150 \text{ см}^2$ и с числом разрешаемых элементов ~ 100 . При этом применялись как математические методы с использованием компьютерных расчетов (в частности для оптимизации параметров детектора и защиты, определения некоторых физических характеристик), так и натурное

Секция 5. Физические методы мониторинга природных сред 167

макетирование некоторых узлов и электронных схем. С помощью стандартного лабораторного оборудования проводилось тестирование лабораторного образца модуля ПЧД и измерялись его физические характеристики.

На основе лабораторного макетирования основных узлов модуля ПЧД гамма-телескопа установлена оптимальная конфигурация оптического канала ПЧД. Проведено также лабораторное макетирование системы активной защиты ПЧД гамма-телескопа. Рассмотрена и экспериментально проверена методика разделения по форме световых импульсов в NaI(Tl) и CsI(Tl) при их одновременном просмотре одним ФЭУ. Подтверждена возможность использования такой методики для идентификации фоновых гамма-квантов в системе активной защиты ПЧД гамма-телескопа на основе «фосфича» NaI(Tl) - CsI(Tl) в рабочем диапазоне энергий прибора.

Полученные характеристики лабораторного макета модуля ПЧД, а также рассчитанные параметры кодирующей маски позволили определить физико-технические параметры прибора в целом (см. Таблицу) и сделать оценки его возможностей при использовании для дистанционного мониторинга загрязненных радиацией областей Земли.

Таблица. Основные физико-технические характеристики широкоапертурного гамма-локатора «Гаммаскоп», предназначенного для мониторинговых наблюдений на вертолете.

диапазон энергии регистрируемых гамма-квантов	0.05-10 МэВ
- эффективная площадь	1000 см ²
- энергетическое разрешение для линии 661 кэВ	~10%
- поле зрения	±90°
- угловое разрешение	1°-3°
- масса	~130 кг
- габариты (определяются кодирующей маской):	
длина	~0.7 м
ширина	~0.7 м
высота	~0.7 м
- потребляемая мощность энергопитания	~70 Вт
- информативность	~30 МБт/сут

Можно сделать вывод, что наличие дистанционного гамма-локатора на основе прибора «Гаммаскоп» в комплексе аппаратуры мобильного базирования (на вертолете) позволит, в частности:

1) осуществлять оперативное дистанционное зондирование загрязненных радиоактивными материалами участков поверхности Земли, объектов, а также нижней атмосферы;

2) картографировать в гамма-лучах участки поверхности Земли размером 0.5×0.5 км² (при высоте зависания вертолета 100 м) с чувствительностью, обеспечивающей измерение активности ~10 мкКюри/м² на естественном фоне;

3) определять направление на источник радиоактивности и осуществлять его локацию;

4) определять изотопный состав загрязненных радиацией участков поверхности Земли, объектов, а также нижней атмосферы и изменение во времени концентрации радионуклидов;

Таким образом, в частности, может быть решен ряд задач радиационного контроля, в особенности при проведении дистанционных исследований в труднодоступной местности (тайга, джунгли, болота, горы и т.п.), или дистанционного определения радиационных характеристик грузов на движущихся транспортных средствах (железнодорожные вагоны, автомобили, корабли и т.п.).

Литература

- Kudravytsev M.I., Svertilov S.I., Bogomolov V.V., Bogomolov A.V. // Adv. Space Res. 1998. V.22. P.1057.
- Holt S.S., Priedhorsky W. // Space Sci. Rev. 1987. V.45. P.269.
- Kniffen D., Kurfess S., Schonfelder V. Et al. // "The Gamma Ray Observatory Sci. Plan". Prep. by GRO Sci. Working Team. 1988.
- Cardi E., Stephen S.B., Di Cocco G. et al. // Space Sci. Rev. 1987. V.45. P.349.
-

СЕКЦИЯ 6

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ОЗОНА ДЛЯ УФ/O₃ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Дамбраускас С.Г., Новиков П.С., Рахимов А.Т., Саенко В.Б.

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына*

Введение

Развитие науки и техники сопровождается постоянным поиском новых технологических процессов. Большие потенциальные возможности связаны с использованием коротковолнового УФ-излучения и газа-реагента, в частности, озона [1-4]. Благодаря исследованиям в области физики плазмы и микроэлектроники обнаружены новые свойства озono-кислородных смесей, воздействующих на вещество в комбинации с УФ облучением. В ультрафиолетовом спектре озон имеет широкую интенсивную полосу поглощения в интервале 90 – 300 нм с максимумами вблизи 140 и 255 нм (полоса Хартли). УФ инициирует реакцию разложения озона на атомы и возбужденные молекулы кислорода, вызывая образование радикалов. Можно подобрать такие технологические режимы, при которых время обработки различных веществ может резко сократиться [1,4]. Именно поэтому, ведущие научные и инженерные центры достаточно активно исследуют и разрабатывают различные газоразрядные системы генерации УФ излучения и электросинтеза озона. Примером может служить активная деятельность в этом направлении такой известной электротехнической фирмы, как АВВ [2].

Генерация УФ и электросинтез озона являются достаточно высокоэнергетическими процессами, поэтому в настоящее время УФ/O₃ - технология находит ограниченное применение в микроэлектронике, медицине и экологии. В значительной мере развитие УФ/O₃-технологии зависит от наличия эффективных, надежных и не слишком дорогих источников УФ и озона. В данной работе дается описание импульсно-периодических источников УФ и озона, которые соответствуют этим требованиям и могут найти применение при создании новых фотохимических и фотофизических технологий во многих отраслях науки и техники, в частности, при решении экологических проблем.

1. Плазменные источники УФ

Разработаны газоразрядные источники УФ импульсно-периодического действия, которые являются открытыми и могут работать в окружающей атмосфере воздуха или в рабочей среде фотохимического реактора. Излучающая плазма в виде плотной матрицы или линейки микрошнуров возбуждалась в сильноточных разрядах короткой длительности. На первом этапе разработок и экспериментов по созданию источников УФ с широким полем облучения изучался сильноточный многоззорный скользящий разряд, допускающий плот-

ность расположения искр на поверхности порядка 1 см^{-2} , рис.1-а. Изучалось влияние параметров RCL-контура и длины разрядных промежутков на интенсивность УФ-излучения в заданном спектральном интервале при энерговыделении в отдельную искру $W = 0,01-1 \text{ Дж}$.

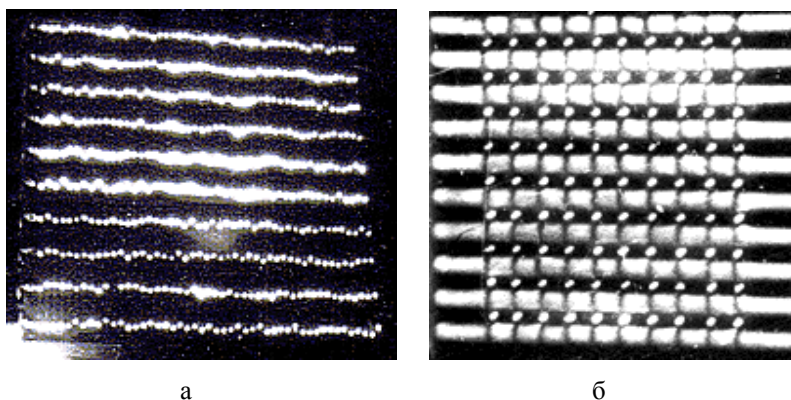


Рис.1. Плазменные источники УФ: а – матрица микрошнуров плазмы на площади 50 x 50 см в схеме со скользящим по поверхности диэлектрика разрядом, б- матрица микрошнуров плазмы на площади 10 x 10 см в схеме с двойным разрядом.

Динамика формирования плазменного шнура в искровом зазоре и его распад могли определяющим образом влиять на спектральные характеристики излучающего разряда, поэтому эти процессы были изучены с помощью теневых и интерференционных методов. Излучаемый объект имел размеры $d \sim 1 \text{ мм}$ и время существования $t \sim 10^{-6}$ сек, поэтому для наблюдения теневых и интерференционных картин использовался лазер на парах меди с длительностью излучения $t \approx 10 \text{ нс}$. Исследования показали, что источник обеспечивал достаточно интенсивную вспышку УФ при апериодической форме разряда с длительностью импульса тока $t \leq 1 \text{ мкс}$ и скорости нарастания тока $dI/dt \geq 10^9 \text{ А/с}$. При рассогласовании RCL-контура и появлении колебаний тока эффективность источника УФ резко ухудшалась. Коротковолновый ультрафиолет отсутствовал в случае, когда длительность разрядного тока превышала 1 мкс, рис.2

Оценки показали, что первоначально плазма внутри канала может быть равновесно нагрета до температуры $T > 2 \text{ эВ}$. В дальнейшем плазма остывала за счет разлета. Характерное время разлета, которое должно соответствовать длительности излучения жесткого УФ, можно определить как $t = r/v = 10^{-6} \text{ с}$, здесь v - скорость звука в нагретом газе, r - радиус шнура. Привлечение такого механизма генерации излучения позволило понять отсутствие УФ в течение второго полупериода колебаний тока излучающего разряда, так как ток протекает по уже расширившемуся каналу и не может сколько-нибудь существенно увеличить температуру плазмы, рис. 2-а. Отсюда следует, что необходимо использовать апериодическую форму разряда с крутым фронтом тока, чтобы обеспечить максимальный энерговыделении за время ее разлета, рис.2-б. Интенсивные вспышки

УФ получены за счет применения коротких разрядных промежутков $d \leq 1$ мм, количество которых определяло общее сопротивление плазмы и было согласовано с волновым сопротивлением низкоиндуктивного RCL-контура. При стремлении к эффективному режиму энерговыклада в излучающую плазму удалось получить аperiodические импульсы тока с амплитудой $I \sim 1$ кА с длительностью фронта тока $t = \sqrt{LC} \leq 100$ нс, которые обеспечили самосжимающийся разряд типа Z-пинча с эффективным нагревом квазиравновесных микрошнуров плазмы с радиусом $r \approx 0,2$ мм в течение $t \approx 200$ нс, рис.3.

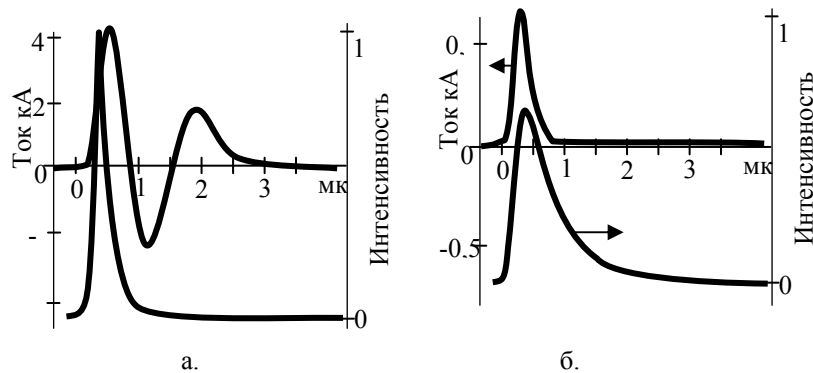


Рис.2. Осциллограммы разрядного тока (верхний луч) и интенсивности УФ (нижний луч, ФЭУ-142, $\Delta\lambda = 112-365$ нм). Развертка – 0,5 мкс/дел. Амплитуда разрядного тока – 4 кА (а) и 0,75 кА (б).



Рис.3. Динамика расширения плазменного микрошнура. Излучающий разряд в воздухе, разрядный промежуток – 0,5 мм, аperiodический импульс тока с амплитудой 750 А имел длительность 400 нс. Экспозиция – 10 нс, интервал между кадрами – 100 нс.

При формировании двойного импульса питания с регулируемой скажностью показано, что при снижении энерговклада в отдельную искру до значения $W \leq 10^{-2}$ Дж возможен режим повторения с частотой до $F = 100$ кГц.

Исследована возможность создания проточного источника УФ с управляемым спектральным составом излучения, что оправдано при работе открытого источника в окружающей атмосфере воздуха или в рабочей среде проточного фотохимического реактора. Разрядный промежуток представлял собой цепочку электродов, встроенных на поверхности керамики. В разрядной области обеспечивался равномерный и устойчивый слой рабочего газа (He, Ar, Xe, Kr) благодаря применению керамической подложки с пористой стенкой, через которую осуществлялась продувка нужного газа при избыточном давлении $P \geq 0,5$ атм. Установлено, что спектр излучения плазмы и электрические пробойные характеристики определялись, в основном, родом вдуваемого газа. Таким образом, подбирая род газа и электрические параметры разрядного контура, можно создать открытый источник плазмы, интенсивно излучающий в заданном участке спектра. Благодаря этому открывается возможность создания коротковолнового источника УФ, излучение которого сконцентрировано в спектральной области, соответствующей окну прозрачности воздуха ($\lambda = 121 \pm 2$ нм). В этой части спектра интенсивно излучают возбужденные атомы и ионы азота, а также линия L_{α} (121,6 нм) водородной плазмы. Исследованы акустические возмущения, вносимые излучающим разрядом в рабочую среду фотохимического реактора. Исследования проведены при работе с линейным источником УФ, имеющим набор искровых промежутков с длиной $d \approx 1$ мм, расположенных с шагом 1 см. В микрошнур плазмы вкладывалась энергия $W = 0,01-0,1$ Дж за время $t \approx 400$ нс. С помощью интерферометра Маха-Цандера получены данные о динамике распространения ударной волны в окружающей среде. В качестве источника света был применен лазер на парах меди с длительностью импульса $t \approx 10$ нс. Амплитуда звуковой волны была незначительной, а время установления оптической однородности было $t \approx 1$ мс при $W = 0,1$ Дж и $t \approx 0,1$ мс при $W = 0,01$ Дж.

В экспериментах со скользящим разрядом при использовании в качестве коммутаторов высоковольтных разрядников или тиратронов типа ТГИ-1000/25 скорость нарастания тока не превышала величины $dI/dt \approx 10^9$ А/с при типичных значениях $U_0 \approx 20$ кВ, $L \approx 10^{-6}$ Гн. В настоящее время разработаны схемы организации излучающего разряда, которые позволили резко снизить паразитную индуктивность: а) за счет применения модифицированной схемы Аркадьева-Маркса [5], б) за счет использования схемы двойного разряда, когда вся матрица разрядных промежутков предварительно ионизируется, рис.1-б[6]. Для питания источника УФ, рис.1-б, необходимы два стандартных блока: выпрямитель с напряжением $U \approx 5$ кВ и током $I \approx 0,1$ А, а также маломощный генератор поджигающих импульсов с напряжением $U = 15 - 20$ кВ.

На рис.4. представлены характерные спектры излучения микрошнуров плазмы при работе источника УФ в атмосфере воздуха и азота.

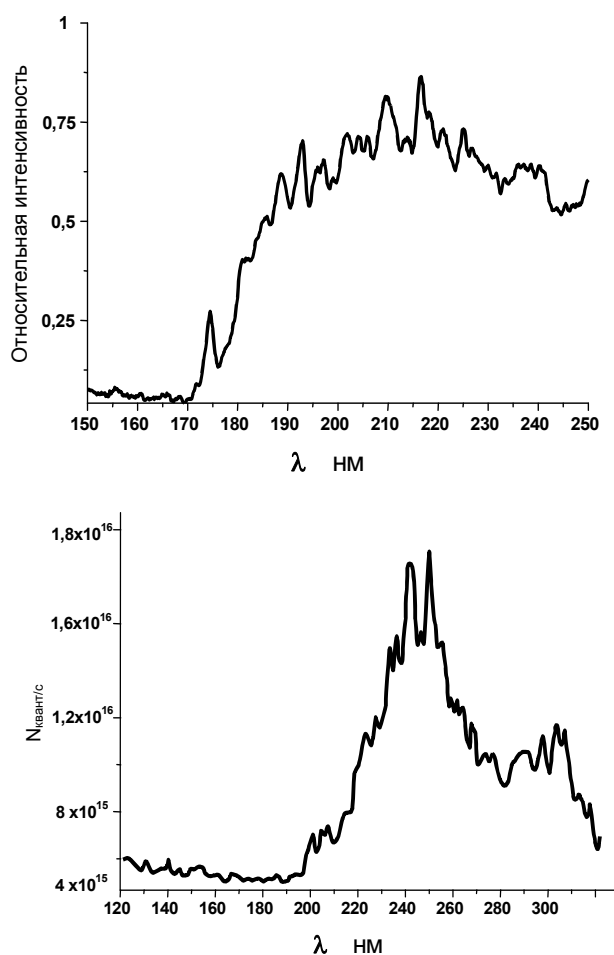


Рис.4. Спектры излучения микрошнуров плазмы при разряде в атмосфере воздуха (а) и азота (б).

2. Источники озона высокой концентрации

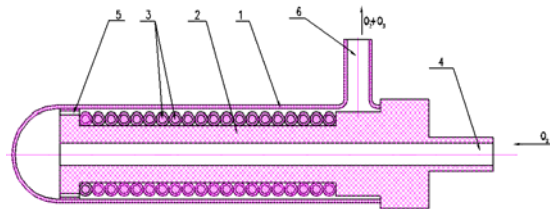
Разработано несколько лабораторных образцов миниозонаторов, как с использованием новых электродных структур барьерного разряда, рис.5, так и на основе секционированного тлеющего разряда, рис.6. В качестве блоков питания использовались импульсно-периодические источники знакопеременного напряжения на основе автомобильной катушки зажигания или на основе телеви-

зионного строчного трансформатора. Формировались высоковольтные импульсы напряжения длительностью порядка 40 мкс, следующие с регулируемой частотой в пределах 0,5 – 10 кГц. Амплитуда напряжения могла регулироваться в пределах 3 – 10 кВ. Миниозонатор на основе секционированного тлеющего разряда мог работать от однополярных импульсов напряжения, которые генерировались электрической схемой на основе автомобильной катушки зажигания, что позволило создать компактный миниозонатор для работы от бортовой сети автомобиля.

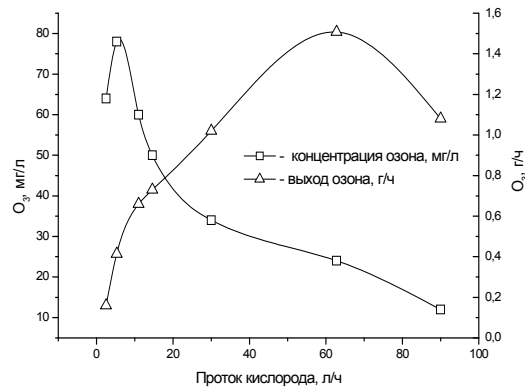
Барьерный разряд. Эффективность электросинтеза озона в барьерном разряде достаточно высока, поэтому не прекращаются усилия по усовершенствованию схем организации барьерного разряда за счет поиска оптимальной структуры электродов, покрытых диэлектриком. Нами предложен оригинальный способ организации барьерного разряда с повышенной плотностью микро-разрядов за счет использования намотки двух изолированных проводников с практически нулевым разрядным промежутком в месте касания, рис.5. Два проводника могут быть намотаны на поверхности любых форм и размеров, что существенно облегчает возможности конструирования и масштабирования озонаторов и источников УФ на основе такого барьерного разряда. Проведены исследования электрических параметров барьерного разряда в ксеноне (генерация УФ) и кислороде (электросинтез озона) атмосферного давления. Площадь электродной структуры, размещенной в газовой камере с объемом 36 см³, составляла 60 см². Электрическая емкость электродной структуры составляла 150 pF. Электродная структура подключалась к источнику знакопеременного напряжения. Исследована энергетическая эффективность источников УФ и озона при изменении напряжения горения разряда в диапазоне 1 - 5 кВ и частоте следования импульсов в диапазоне 50 - 5000 Гц. При электросинтезе озона использовался проток кислорода при объемном расходе в диапазоне 0 - 200 л/час. Концентрация озона регистрировалась по поглощению УФ излучения (254 нм). В процессе экспериментов осциллографировались вольт-кулоновские характеристики разряда и регистрировались фигуры Лиссажу, что позволило определить энергетические характеристики разряда. Эффективность генерации УФ проверялась по яркости высвечивания люминофора "Zinc Silicate:Mn". Зарегистрирована яркость 130 кД/м² при энергетической эффективности 1,5 лм/Вт. Отметим, что оптимизация режимов возбуждения люминофора не проводилась.

При электросинтезе озона при комнатной температуре получена концентрация озона до 80 мг/л, производительность по озону достигла 1,5 г/час, рис.5, энергетическая эффективность электросинтеза озона близка к теоретическому пределу. При охлаждении колбы до 10 °С концентрация озона составила 140 мг/л при продувке порядка 1 л/час. Удельные энергозатраты на синтез озона в миниозонаторе на основе модифицированного барьерного разряда составили 6,5 Вт*час/г.

При использовании инертного газа данную конструкцию можно эффективно использовать в качестве источника ультрафиолетового излучения. Эффективность генерации УФ проверялась при продувке Хе по яркости высвечивания люминофора "Zinc Silicate:Mn". Зарегистрирована яркость 130 кД/м² при энергетической эффективности 1,5 лм/Вт. Отметим, что оптимизация режимов возбуждения люминофора не проводилась.



а



б

Рис. 5. Принципиальная схема миниозонатора на основе модифицированного барьерного разряда (а): 1 – стеклянная колба, 2 – диэлектрический стержень, 3 – проводники, 4 – входной штуцер для продувки кислорода, 5 – отверстия для продувки кислорода, 6 – выходной штуцер. Концентрация озона и производительность озонатора в зависимости от объемного расхода кислорода (б)

Секционированный тлеющий разряд

Электросинтез озона в барьерном разряде сопровождается повышенными тепловыми потерями в приэлектродных областях и диэлектрических покрытиях, поэтому продолжается поиск более совершенных схем организации газового разряда. Нами предложена и исследована схема организации секционированного тлеющего разряда для электросинтеза озона, которая находит применение для возбуждения лазерных сред, рис. 6. Отличие состоит в том, что при электросинтезе озона использован щелевой разрядный промежуток.

Газоразрядная камера миниозонатора представляла собой два плоских электрода с межэлектродным расстоянием $d = 0,8$ мм. Секционированный

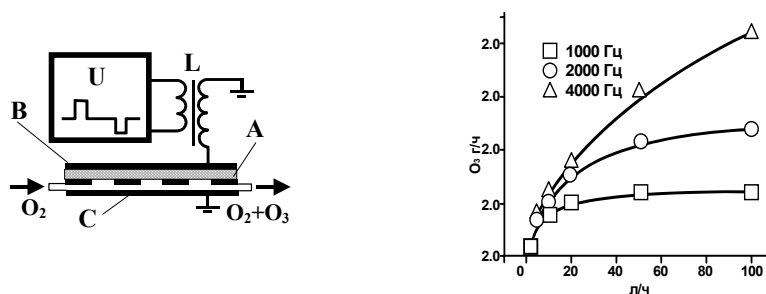


Рис.6. Принципиальная схема миниозонатора на основе секционированного тлеющего разряда: А-матрица из 7x17 точечных электродов диаметром 3 мм на площади 4x10 см, В и С – сплошные электроды (а); производительность озонатора в зависимости от объемного расхода кислорода и частоты следования импульсов питания (б).

тлеющий разряд в потоке кислорода зажигался благодаря применению специальной электродной структуры. На пластине из фольгированного стеклотекстолита толщиной порядка 1 мм, формировались точечные электроды диаметром 2 - 4 мм с плотностью расположения 3 - 10 см⁻² на площади размером 4x10 см. По сути, электродная структура представляла собой секционированный конденсатор; при этом одна из обкладок конденсатора выполнена сплошной (В), а другая - в виде матрицы электродов (А), расположенных на диэлектрической пластине, параллельной электроду С. Матрица А составляла с электродом С щелевой газоразрядный промежуток с зазором не более 1 мм. Сплошная обкладка конденсатора В подключалась к одной из клемм импульсно-периодического источника питания. Параметры диэлектрического слоя между электродами А и В подбирались так, чтобы соответствующая емкость в 10 и более раз превышала величину емкости газоразрядного промежутка. В этом случае, основная доля энерговклада и падения напряжения приходилась на разрядный промежуток. Отметим, что предлагаемая схема позволяла реализовать секционирование разряда при использовании электродов практически любых размеров и форм. В процессе экспериментов по электросинтезу озона исследовались как планарная, так и коаксиальная схемы газоразрядной камеры.

В результате исследований электросинтеза озона, были определены оптимальные параметры лабораторного озонатора, рис.6. Исследования проводились в прямоугольной газоразрядной камере с площадью электродов 4x10 см и зазором 0,8 мм. Электродная структура А содержала 7 x 17 точечных электродов диаметром 3 мм. При напряжении в первичной цепи автомобильного импульсного трансформатора $U_0 = 17$ В, озонатор работал в режиме естественного охлаждения и обеспечивал стабильные параметры по выходу озона при скорости прокачки кислорода не менее 5 л/час. Для этого режима получены следующие данные, характеризующие эффективность работы озонатора:

- Максимальная концентрация озона - 78 мг/л при протоке кислорода 5 л/час.

- Максимальный выход озона - 0,97 г/час при протоке кислорода 60 л/час.

При естественном охлаждении и температуре окружающей среды 20⁰ С озонатор обеспечивал постоянство параметров по генерации озона в течение 10 часов непрерывной работы при прокачке кислорода со скоростью более 5 л/час. В форсированном режиме при U₀ = 19 В параметры по выходу озона возросли, однако для их стабилизации требовалось внешнее охлаждение.

На рис. 6-(б) представлены результаты по выходу озона при использовании источника знакопеременного напряжения на основе телевизионного строчного трансформатора. Характеристики миниозонатора при переходе к данной системе питания оказались несколько выше. Как видно из графика, как концентрацию, так и выход озона можно широко варьировать, как за счет изменения протока кислорода через разрядную ячейку, так и за счет изменения параметров питающего напряжения. Максимальная концентрация достигала 100 мг/л, а максимальный выход озона 2.4 г/ч. При оптимальных условиях удельные энергозатраты на синтез озона в миниозонаторе с секционированными электродами практически соответствовали теоретическому значению и составили 4,5 Вт*час/г.

Работа поддержана РФФИ (грант № 00-15-96554).

Литература

1. Vig J.R., Le Bus J.W. "UV – Ozone Clearning of Surfaces"- IEEE Trans on Parts, Hybrids and Packaging. 1976. Vol.12, № 4, p. 365-370.

2. Элиассон Б., Г. Эсром Г., У. Когельшатц У. "Новые УФ-излучатели для промышленных применений". Обзор АББ, № 3, 1991, стр. 21-28. (Kogelschatz U. et. al. "Dielectric-Barrier Discharges. Principle and Applications". ICPIG XXIII, July 17 – 22, 1997, Toulouse, France).

3. Рахимов А.Т., Саенко В.Б. и др. "Бактерицидные установки для медицины на основе плазменных источников УФ и озона". - Конверсия, 1993, № 6, с.41-44.

4. Рахимов А.Т., Саенко В.Б. и др. "Физико-технические принципы экспресс - водоподготовки с использованием источников озона и ультрафиолета". Второй международный конгресс "Вода: экология и технология" (ЭКВАТЕК - 96), тезисы докладов, Москва, 1996. с.187.

5. Рабик Я. "Экспериментальные методы в фотохимии и фотофизике". Москва "Мир", 1985.

6. Рахимов А.Т., Саенко В.Б. и др. "Газоразрядная лампа" Патент РФ № 21200152, приоритет от 16.12.1996.

СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА
НАСЫЩЕННЫХ ЖИРНЫХ КИСЛОТ

В.С. Горелик¹⁾, К.В. Глаголев²⁾, Г.В. Козлова³⁾, Л.В. Кольцова¹⁾,
А.В. Кравцов²⁾, Ю.П. Куркин³⁾, А.Н. Морозов²⁾, К.В. Показеев³⁾,
П.П. Свербиль¹⁾, А.В. Червяков¹⁾.

¹⁾ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН.

²⁾ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

³⁾ Московский государственный университет прикладной биотехнологии

Исследованы спектры комбинационного рассеяния масляной ($C_4H_8O_2$), валериановой ($C_5H_{10}O_2$), каприловой ($C_8H_{16}O_2$), каприновой ($C_{10}H_{20}O_2$), ундециловой ($C_{11}H_{22}O_2$), тридекановой ($C_{13}H_{26}O_2$), пентадекановой ($C_{15}H_{30}O_2$) и стеариновой ($C_{18}H_{36}O_2$) кислот при возбуждении аргоновым лазером ($\lambda=488,0$ нм). Обнаружено, что частоты продольных акустических колебаний молекул насыщенных жирных кислот уменьшаются с ростом длины молекул. Проведено отнесение линий комбинационного рассеяния для внутримолекулярных колебаний. Исследованы смещения частот внутримолекулярных колебаний в зависимости от числа атомов углерода в молекуле кислоты. Установлено, что частоты веерных колебаний возрастают с увеличением длины углеродной цепочки. Выполненное исследование открывает возможность определения длины цепных молекул жирных кислот на основе данных о частотах колебаний этих молекул, полученных из спектров комбинационного рассеяния. Практическое значение данной работы состоит в разработке нового метода анализа молекулярного состава растительных и животных жиров, содержащих молекулы насыщенных жирных кислот и их производных.

Введение

В состав многих растительных и животных жиров входят насыщенные жирные кислоты /1,2/ состоящие из нецентросимметричных полярных цепных молекул $C_nH_{2n}O_2$. Длина таких молекул определяется числом циклов, состоящих из противоположным образом ориентированных групп CH_2 . Введение полиенов в состав смешанных пленок Лэнгмюра-Блоджетт, образованными жирными кислотами /3/, позволяет ориентировать их друг относительно друга, получая материал с высокими нелинейно-оптическими характеристиками.

Высокая степень организации молекул свойственна водным взвесям жирных кислот. Молекулы жирных кислот обладают пространственно разделенными гидрофильной ($-OH$) и гидрофобной (CH_3-) группами, что позволяет эффективно управлять пространственным расположением этих молекул. Поскольку молекулярный уровень анализа свойств таких материалов предполагает учет особенностей колебаний молекулярных структур, возникает необходимость изучения спектров соответствующих колебаний молекул $C_nH_{2n}O_2$. Инфракрасные спектры и спектры комбинационного рассеяния (КР) дают возможность получить информацию о частотах внутримолекулярных и внешних колебаний молекул. Получение и интерпретация инфракрасных спектров значительно затруднена, поскольку широкая полоса валентных колебаний группы $-OH$ перекрывается полосами валентных колебаний CH_2- и CH_3- групп /4/. Спектры КР жирных кислот типа $CH_3(CH_2)_nCOOH$ изучались в 60-е годы /5/. При этом были получены лишь обзорные спектры и до сих пор отсутствует информация о характере изменения спектров КР в зависимости от длины молекулы жирной кислоты.

В данной работе ставилась задача экспериментально исследовать спектры КР жирных кислот с использованием современных методик лазерной спектроскопии с целью получения детальной информации о параметрах внешних и внутренних колебаний молекул и их зависимости от длины цепной молекулы $C_nH_{2n}O_2$.

Методика эксперимента и описание исследованных образцов.

При получении спектров КР использовалась экспериментальная установка, схема которой приведена ранее в работе /6/. Для возбуждения спектров комбинационного рассеяния использовался аргоновый лазер ($\lambda=488,0$ нм) с мощностью около 100 мВт. Регистрация спектров проводилась на автоматизированном КР-спектрометре, включающем в себя двойной монохроматор ДФС-12, систему счета фотонов, интерфейсный микропроцессорный модуль и персональный компьютер, с помощью которого осуществлялось управление монохроматором, накопление и обработка экспериментальных данных. Спектральная ширина щели монохроматора составляла 2 см^{-1} .

Образцы масляной ($C_4H_8O_2$), валериановой ($C_5H_{10}O_2$) и каприловой ($C_8H_{16}O_2$) кислот представляли собой прозрачные жидкости с желтоватым оттенком. Для получения спектров КР перечисленных образцов была использована схема 90° рассеяния света. Образцы каприновой ($C_{10}H_{20}O_2$), ундециловой ($C_{11}H_{22}O_2$), тридекановой ($C_{13}H_{26}O_2$), пентадекановой ($C_{15}H_{30}O_2$) и стеариновой ($C_{18}H_{36}O_2$) кислот представляли собой бесцветные поликристаллические порошки.

Образцы кислот помещались в специальные кюветы с притертыми вакуумными пробками, имеющими плоское дно. Структура кювет позволяла регистрировать спектры КР при различных геометриях рассеяния. Спектры КР порошков были получены с использованием 180° геометрии рассеяния (схема рассеяния «назад»).

В таблице 1 /7, 8/ приведены данные по физическим свойствам насыщенных жирных кислот типа $CH_3(CH_2)_nCOOH$. В первом столбце приведено число (n) атомов углерода в молекуле, второй и третий столбцы содержат химическую формулу и название кислоты. В четвертом столбце приведены температуры плавления и кипения кислот (в градусах Цельсия). В пятом столбце даны показатели преломления.

Из приведенного списка кислот нами были изучены жирные насыщенные кислоты с $n=4$ ($C_4H_8O_2$), $n=5$ ($C_5H_{10}O_2$), $n=8$ ($C_8H_{16}O_2$), $n=10$ ($C_{10}H_{20}O_2$), $n=11$ ($C_{11}H_{22}O_2$), $n=13$ ($C_{13}H_{26}O_2$), $n=15$ ($C_{15}H_{30}O_2$) и $n=18$ ($C_{18}H_{36}O_2$).

Таблица 1. Физические свойства насыщенных жирных кислот $CH_3(CH_2)_nCOOH$.

	Химическая формула	Название кислоты	Температура ($^\circ\text{C}$)		Показатель преломления
			плавления	кипения	
	CH_3CH_2COOH	пропионовая	-20,8	141,1	1,3874
	$CH_3(CH_2)_2COOH$	масляная	-7,9	163,5	1,3980
	$CH_3(CH_2)_3COOH$	валериановая (пентановая)	-33	186,05	1,4085

	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COOH}$	капроновая (гексановая)	-3,4	205,35	1,4163
	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{COOH}$	энантовая (гептановая)	-10,5	222	1,4216
	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	каприловая (октановая)	16,7	239,3	1,4285
	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	пеларгоновая (нонановая)	12,5	254	1,4343
10	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	каприновая (декановая)	31,6	268	1,4288
11	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_9\text{COOH}$	ундециловая	30	228	-
12	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	лауриновая (додекановая)	44,2	225	1,4191
13	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{COOH}$	тридекановая	51	236	-
14	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	миристиновая (тетрадекановая)	53,9	250,5	1,4268
15	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{13}\text{COOH}$	пентадекановая	54	257	-
16	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	пальмитиновая	63,1	390	1,4355
17	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{COOH}$	маргариновая (гептадекановая)	61,3	363,8	1,4342
18	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	стеариновая	69,6	376,1	1,4299
19	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{17}\text{COOH}$	нонадециловая	66,5	299	-
20	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$	арахиновая	75,3	-	1,4250
22	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$	бегеновая	79,9	-	1,4270
24	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{22}\text{COOH}$	лигноцериновая	84,2	-	1,4287
26	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{24}\text{COOH}$	церотиновая	87,7	-	1,4301
28	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{26}\text{COOH}$	монтановая	90,0	-	1,4313
30	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{28}\text{COOH}$	мелисиновая	93,6	-	1,4323

2. Теоретико-групповая классификация колебательных мод и сведения о частотах внутримолекулярных колебаний полимерных цепей углеводородов

Анализ симметрии полимерных цепей и кристаллов дается в работе Коулмена и Пейнтера /9/. Приведем основные выводы этих работ.

Упорядоченные полимерные цепи можно рассматривать как одномерные кристаллы. Колебательные моды таких систем классифицируют в соответствии с линейной пространственной группой симметрии.

Удобной моделью для теоретико-группового анализа зигзагообразных молекул является молекула полиэтилена $(\text{CH}_2)_n-(\text{CH}_2)_n$ бесконечной длины

($n=\infty$). В примитивной ячейке этой цепной структуры присутствуют две противоположным образом ориентированные группы CH_2 . Фактор-группа пространственной группы симметрии полиэтилена содержит 8 элементов:

E ;
 σ_v'' – зеркальная плоскость, совпадающая с плоскостью цепи (xz);
 σ_h – зеркальная плоскость, проходящая через CH_2 -группу (xy);
 σ_v' – плоскость скольжения вдоль оси z , отражение в плоскости yz ;
 i – центр инверсии в середине С-С-связи;
 C_2 – винтовая ось второго порядка вдоль a ;
 C_2'' – ось вращения второго порядка, проходящая через середину С-С-связи перпендикулярно плоскости xz ;
 C_2' – ось вращения второго порядка в направлении x , пересекающая CH_2 -группу.

Характеры приводимого колебательного представления Γ определяются путем умножения числа u атомов в элементарной ячейке, остающихся на своих местах (с точностью до чистой трансляции) при преобразованиях симметрии, на множитель, вносимый соответствующим атомом:

$$\chi(R) = u(\pm 1 + 2 \cos \phi), \quad (5)$$

где ϕ – соответствующий угол поворота, а плюс и минус соответствуют собственным и несобственным (зеркальным) поворотам.

Таблица 2. Характеры колебательного представления Γ .

Элементы симметрии точечной группы	E	C_2	C_2''	C_2'	i	σ_h	σ_v''	σ_v'
U	6	0	0	2	0	6	2	
$\pm 1 + 2 \cos \phi$	3	-1	-1	-1	-3	1	1	
Характеры представления Γ	18	0	0	-2	0	6	2	

На основании общих методик [9] устанавливается структура приводимого представления Γ , описывающего все типы колебаний молекул

$$\Gamma = 3A_g + 3B_{1g} + 2B_{2g} + B_{3g} + A_u + 2B_{1u} + 3B_{2u} + 3B_{3u}, \quad (6)$$

Для конечной цепной молекулы в колебательном спектре должны проявляться не только оптические моды, соответствующие внутримолекулярным движениям, но также продольные (LAM) и поперечные (TAM) акустические моды.

Молекула жирной кислоты $\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_2$, как и молекула полиэтилена, представляет собой зигзагообразную цепь атомов углерода. С одной стороны углеродная цепочка заканчивается CH_3 -группой, а с другой – группой COOH . К каждому атому внутри углеродной цепочки присоединены два атома водорода, образуя метиленовую CH_2 -группу. Фундаментальные колебания молекулы жирной кислоты можно разделить на колебания метиленовой группы и скелетные колебания углеродной цепочки. Углеродной цепочке соответствуют акустиче-

ское и оптические скелетные колебания. Колебания группы COOH в данной работе детально не исследовались.

Установленные ранее экспериментально и теоретически /9/ значения частот внутримолекулярных колебаний CH₂-групп приведены в таблице 3.

Таблица 3. Экспериментальные и рассчитанные значения частот колебаний CH₂-групп /9/.

Частота, см ⁻¹		Отнесение колебаний
Рассчитанная	Эксперимент.	
141,2	136	либрационное
1137,5	1133	оптическое скелетное
1175,2	1170	маятниковое CH ₂ -групп
1445,0	1442	ножничное CH ₂ -групп
2854,6	2848	симметричное валентное C-H
1065,8	1065	оптическое скелетное
1296,8	1297	крутильно-деформационное CH ₂ -группы
1370,7	1370	веерное CH ₂ -группы
1069,6	1068	оптическое скелетное
1293,4	1295	крутильно-деформационное CH ₂ -групп
1373,2	1370	веерное CH ₂ -групп
101,5	108	либрационное
1137,0	1133	оптическое скелетное
1176,0	1170	маятниковое CH ₂ -группы
1458,3	1442	ножничное CH ₂ -группы
2849,9	2849	симметричное валентное C-H
2888,7	2883	антисимметричное валентное C-H

3. Результаты исследования спектров КР жирных кислот, полученные в данной работе

Обзорные спектры КР жирных кислот, исследованные в данной работе, приведены на рис.1. Из рисунка видно, что спектры КР насыщенных жирных кислот можно условно разделить на три области: низкочастотную, содержащую частоты акустических скелетных (LAM) колебаний; область средних частот, включающую частоты деформационных колебаний CH₃-группы; область высоких частот, в которой проявляются частоты валентных колебаний C-H.

Характеристики спектров КР жирных кислот перечислены в таблицах 4-11. При отнесении частот по типам колебаний в качестве опорных спектров использовались хорошо изученный спектр КР полиэтилена /9/ и спектр КР де-

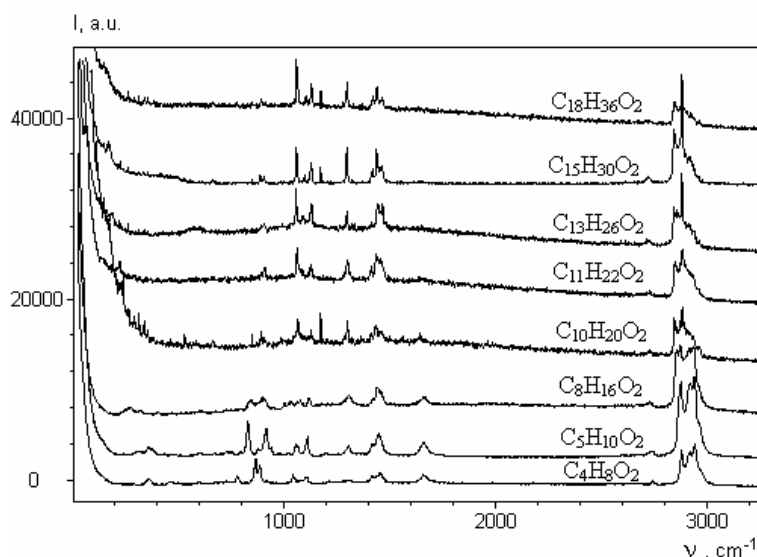


Рис. 1. Общий вид спектров КР соединений $C_nH_{2n}O_2$ при $n = 4, 5, 8, 10, 11, 13, 15, 18$.

кана /6/, поскольку молекула декана содержит цепочку из 10 атомов углерода, также как и молекула каприновой кислоты.

Спектры КР в низкочастотной и высокочастотной областях приведены на рис.2 и 3 соответственно. Продольное акустическое колебание (LAM) было обнаружено: в масляной кислоте – на частоте $359,2\text{ см}^{-1}$, в валериановой кислоте – $361,3\text{ см}^{-1}$, в каприловой кислоте – $266,0\text{ см}^{-1}$, в каприновой кислоте – $262,9\text{ см}^{-1}$, в ундециловой – в области 220 см^{-1} , в тридекановой – в области 180 см^{-1} , в пентадекановой – в области 160 см^{-1} , в стеариновой – в области 140 см^{-1} . Кривые 1-3 соответствуют нормальным углеводородам (гептану, октану и декану) и приведены для сравнения. Из рисунка видно, что частоты акустических колебаний монотонно смещаются в область низких частот с увеличением числа атомов углерода в молекулах жирных кислот, т.е. с увеличением длины цепной молекулы.

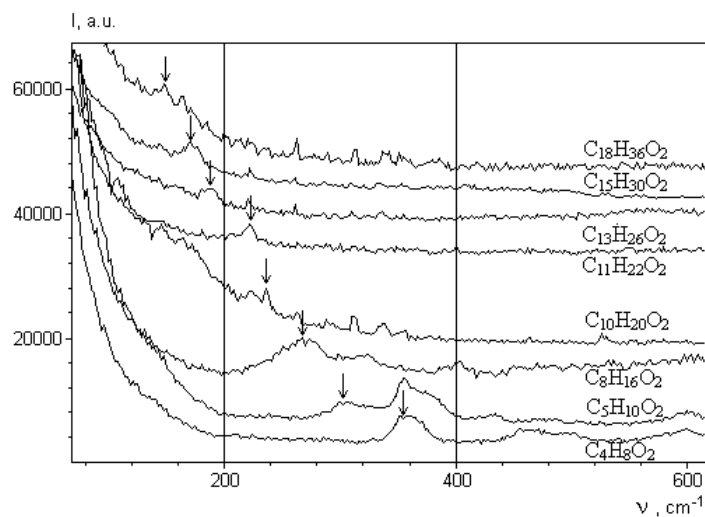


Рис. 2. Низкочастотная область спектров КР соединений $C_nH_{2n}O_2$ при $n = 4, 5, 8, 10, 11, 13, 15, 18$; стрелка указывает положение акустической моды.

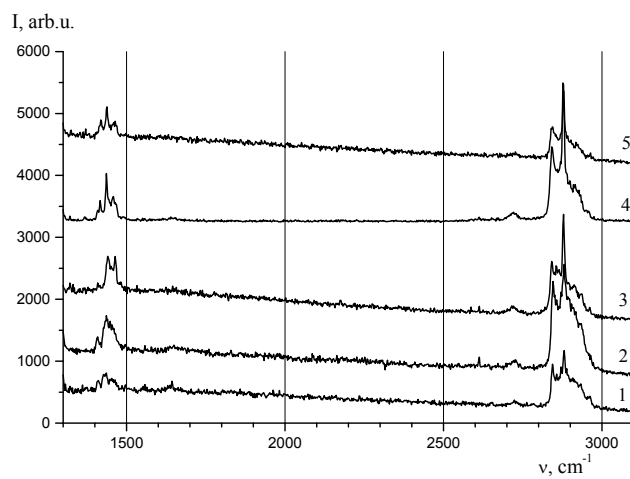


Рис.3. Спектры КР насыщенных жирных кислот в высокочастотной области:
1- $C_{10}H_{20}O_2$, 2- $C_{11}H_{22}O_2$, 3 - $C_{13}H_{26}O_2$, 4 - $C_{15}H_{30}O_2$, 5- $C_{18}H_{36}O_2$.

Спектры КР жирных кислот в области деформационных колебаний приведены на рис. 4-11. В каждом из спектров КР жирных кислот в области $700\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ обнаружена серия линий КР, которые не отнесены ни к одному из типов колебаний, изученных ранее на примере декана. Данная серия полос проявляется в спектрах КР жирных кислот, находящихся в жидком состоянии при комнатной температуре, и становится менее интенсивной с возрастанием длины углеродной цепочки молекулы жирной кислоты.

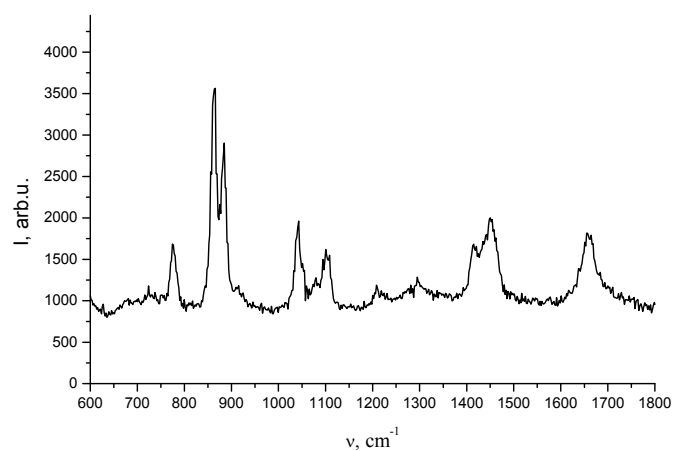


Рис. 4. Спектр КР масляной кислоты $C_4H_8O_2$ в области деформационных колебаний.

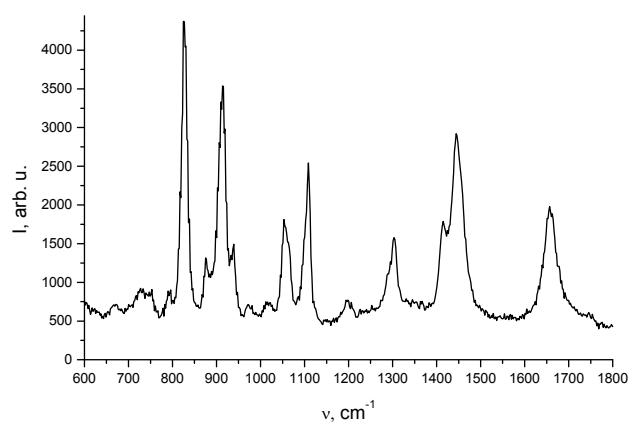


Рис. 5. Спектр КР валериановой кислоты $C_5H_{10}O_2$ в области деформационных колебаний.

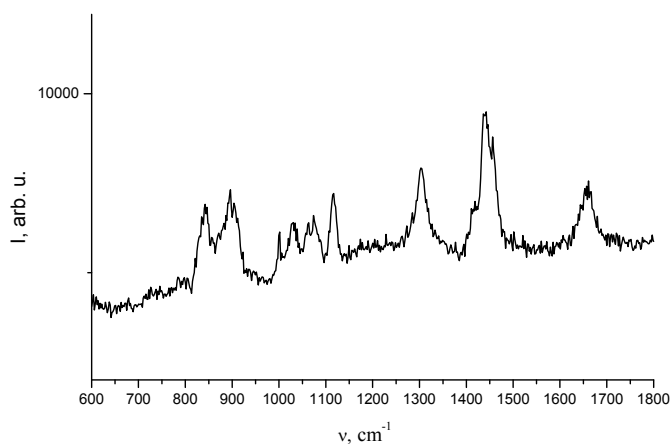


Рис. 6. Спектр КР каприловой кислоты $C_8H_{16}O_2$ в области деформационных колебаний.

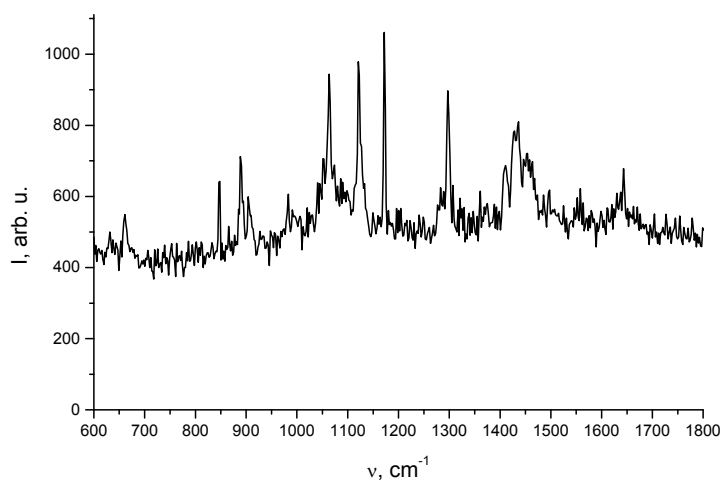


Рис. 7. Спектр КР каприновой кислоты $C_{10}H_{20}O_2$ в области деформационных колебаний.

Оптические скелетные колебания полиэтилена были обнаружены /6/ на частотах 1071,3 и 1127,1 cm^{-1} . При этом разница между частотами скелетных колебаний составила $\Delta\nu=55,8 cm^{-1}$. В спектрах жирных кислот присутствуют пары интенсивных максимумов, частоты которых различаются приблизительно

на $\Delta\nu=50\text{ см}^{-1}$: масляная кислота – 1041,7 и 1102,4 см^{-1} , валериановая кислота – 1061,5 и 1107,2 см^{-1} , каприловая кислота – 1076,7 и 1116,3 см^{-1} , каприновая кислота – 1122,5 и 1172,6 см^{-1} , ундециловая кислота – 1087,3 и 1123,1 см^{-1} , тридекановая кислота – 1055,0 и 1132,1 см^{-1} , пентадекановая кислота – 1060,4 и 1171,3 см^{-1} , стеариновая кислота – 1061,4 и 1172,8 см^{-1} .

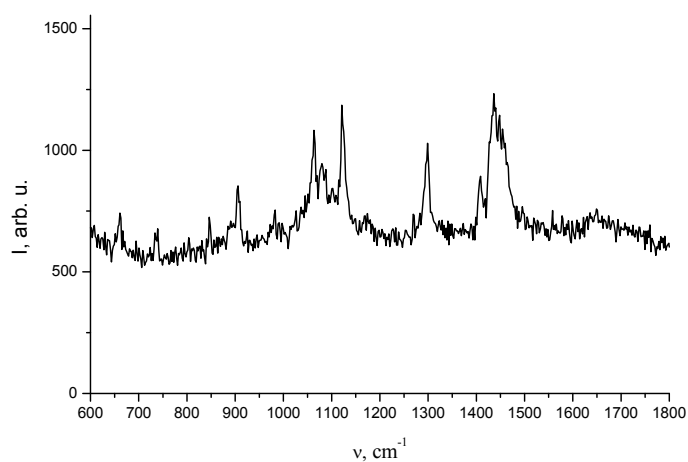


Рис. 8. Спектр КР ундециловой кислоты $\text{C}_{11}\text{H}_{22}\text{O}_2$ в области деформационных колебаний.

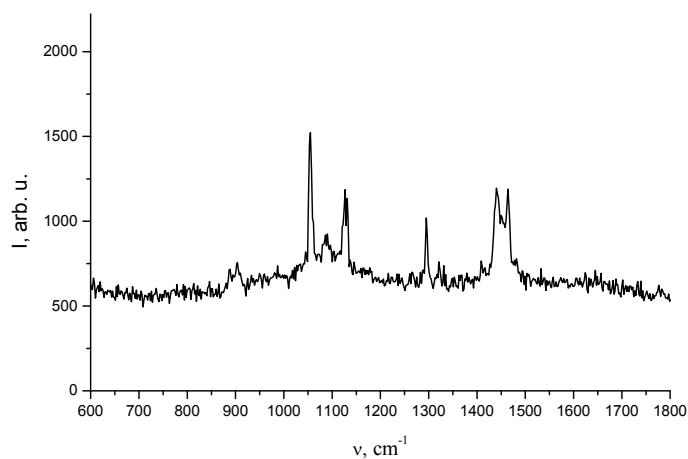


Рис. 9. Спектр КР тридекановой кислоты $\text{C}_{13}\text{H}_{26}\text{O}_2$ в области деформационных колебаний.

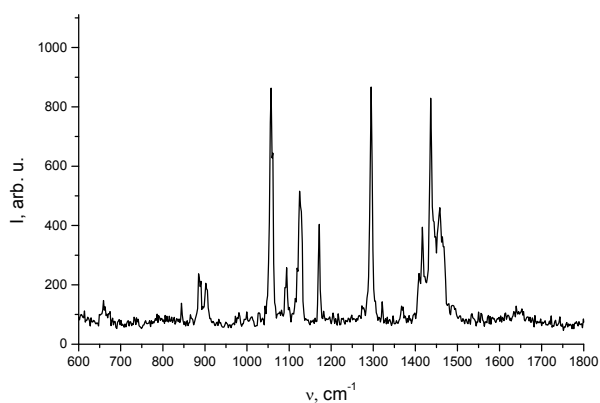


Рис. 10. Спектр КР пентадекановой кислоты $C_{15}H_{30}O_2$ в области деформационных колебаний

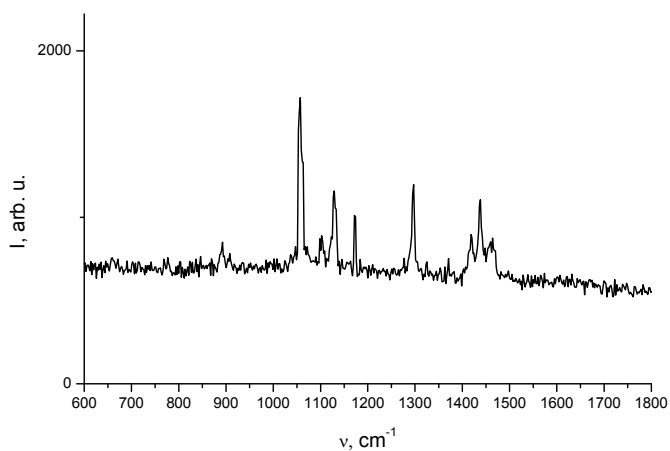


Рис. 11. Спектр КР стеариновой кислоты $C_{18}H_{36}O_2$ в области деформационных колебаний

При этом выделенные максимумы имеют высокую интенсивность и малую полуширину. Можно предположить, что в каждой из пар частот низкая частота относится к скелетному оптическому колебанию симметрии B_g , а высокая – к оптическому колебанию симметрии A_g . Деформационное маятниковое колебание группы CH_2 в нашей работе не было зарегистрировано в спектрах КР. Крутильное деформационное колебание CH_2 - групп обнаружилось в области 1300 cm^{-1} .

Таблица 4. Характеристики спектра КР масляной кислоты $C_4H_8O_2$.

Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}	Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}
359,2	669	22,4	1211,4	190	21,4
464,4	274	24,6	1296,9	274	89
495,5	140	18,8	1415,7	541	21,5
598,4	193	31,5	1450,5	1018	34,8
724,0	157	3,6	1659,7	845	41,8
776,4	752	15,5	2741,9	337	11,5
862,7	2658	11,8	2877,1	3361	13,3
883,7	1735	12,0	2912,8	2856	34,6
1041,7	995	16,1	2940,3	3498	23,7
1078,2	231	19,6	2970,6	949	29,7
1102,4	682	17,9			

В работе/6/ было обнаружено, что частота веерного колебания группы CH_2 в спектрах нормальных углеводородов возрастает с увеличением длины углеродной цепочки. Веерное колебание группы CH_2 в спектрах КР имеет малую интенсивность и в спектрах КР углеводородов проявляется /6, 9/ в области 1370 см^{-1} . В данной области зарегистрированы максимумы в спектрах КР тридекановой ($C_{13}H_{26}O_2$) кислоты на частоте $1331,0\text{ см}^{-1}$ и пентадекановой ($C_{15}H_{30}O_2$) кислоты на частоте $1367,8\text{ см}^{-1}$. Указанные максимумы интерпретированы как веерные колебания.

Таблица 5. Характеристики спектров КР валериановой кислоты $C_5H_{10}O_2$.

Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}	Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}
304,7	317	23,3	972,3	257	24,1
361,3	826	41,8	1019,1	307	37,2
432,8	172	18,2	1061,5	1084	21,7
601,6	255	42,3	1107,2	1947	13,6
668,6	186	27,6	1201,6	234	25,2
730,5	357	40,9	1298,3	901	33,0
751,6	198	10,3	1413,7	854	16,4
764,3	96	7,1	1447,3	2373	31,2
790,8	262	10,1	1659,2	1471	35,0
827,3	4044	13,5	2734,5	504	30,7
876,9	576	9,2	2871,8	7124	22,8
912,6	3021	20,0	2914,3	6950	38,4
938,9	647	7,0	2939,8	5838	19,1
			2964,6	1767	26,5

Деформационное ножничное колебание CH_2 -групп представлено широкой полосой, имеющей один или несколько максимумов в зависимости от четности или нечетности числа атомов углерода в углеродной цепочке. Данное колебание зарегистрировано в спектрах КР жирных кислот на следующих частотах: масляная кислота – 1415,7 и 1450,5 cm^{-1} , валериановая кислота – 1413,7 и 1447,3 cm^{-1} , каприловая кислота – 1414,7, 1439,7 и 1457,1 cm^{-1} , каприновая кислота – 1409,8, 1432,0 и 1456,1 cm^{-1} , ундециловая кислота – 1407,7, 1435,1 и 1454,8 cm^{-1} . В спектре КР тридекановой кислоты ножничное колебание проявилось в виде широкой полосы с максимумом на частоте 1440,8 cm^{-1} . В спектрах КР пентадекановой и стеариновой кислот наблюдается серия максимумов в области ножничных колебаний. Наиболее интенсивное колебание из этой серии зарегистрировано на частотах: 1436,7 cm^{-1} для пентадекановой кислоты и 1437,7 cm^{-1} для стеариновой кислоты.

На рис. 12-17 представлены спектры КР жирных кислот в области валентных колебаний группы CH_2 .

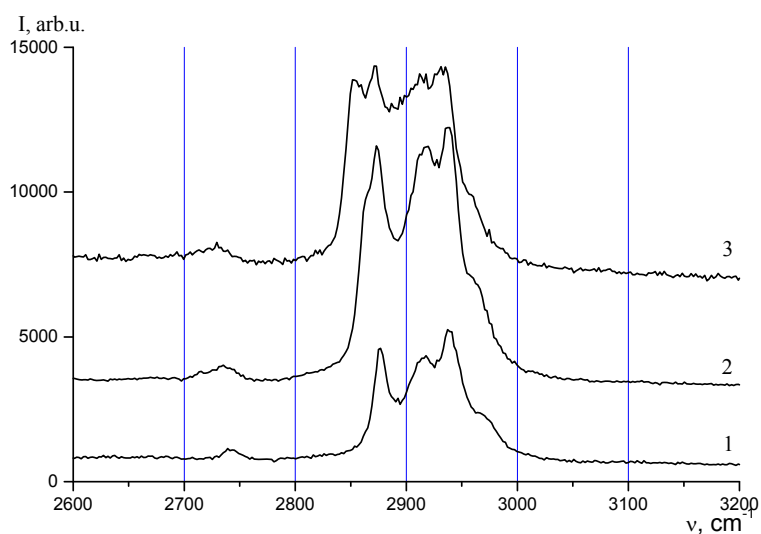
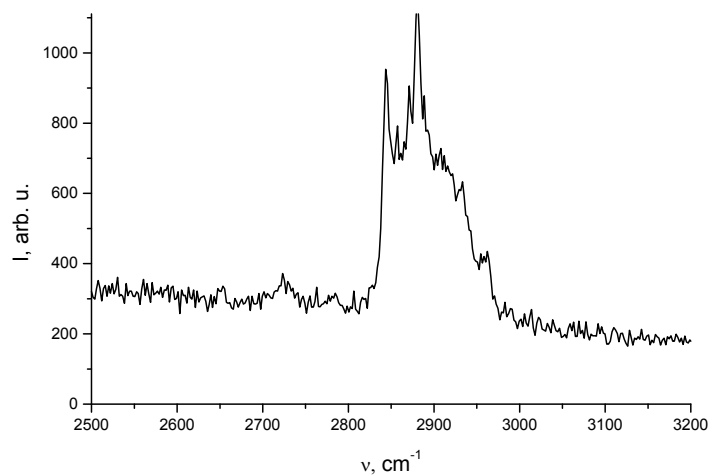
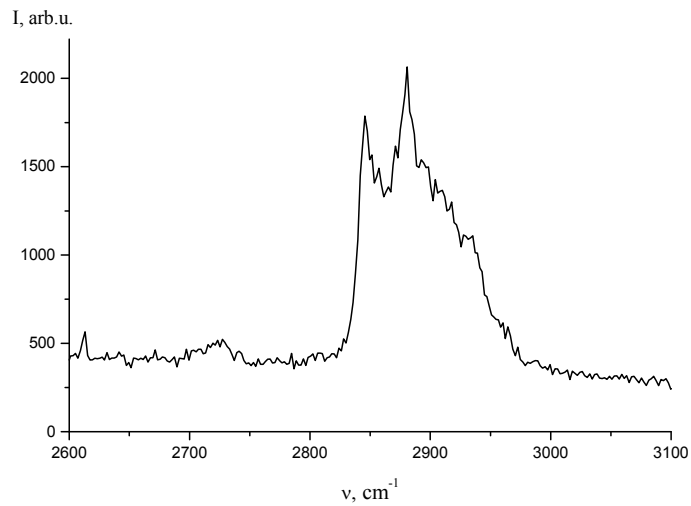


Рис. 12. Спектр КР масляной кислоты $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$ (кривая 1), валериановой кислоты $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$ (кривая 2) и каприловой кислоты $\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_2$ (кривая 3) в области валентных колебаний.

Рис. 13. Спектр КР каприновой кислоты $C_{10}H_{20}O_2$ в области валентных колебаний.Рис. 14. Спектр КР ундециловой кислоты $C_{11}H_{22}O_2$ в области валентных колебаний.

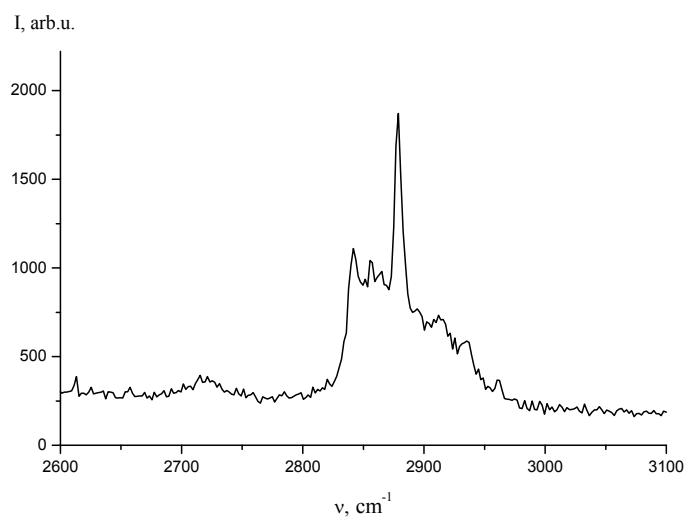


Рис. 15. Спектр КР тридекановой кислоты $C_{13}H_{26}O_2$ в области валентных колебаний.

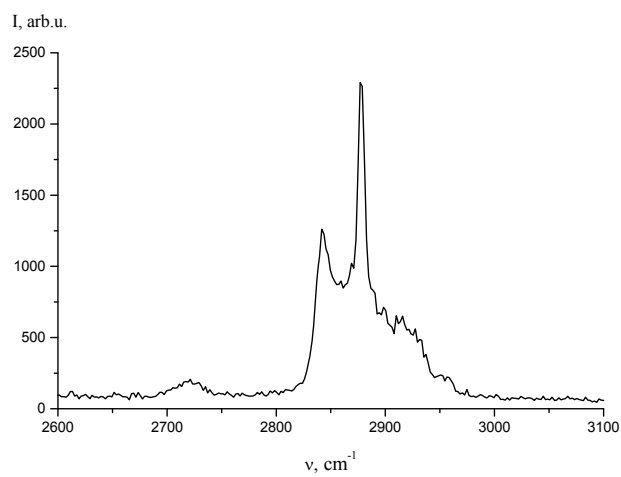
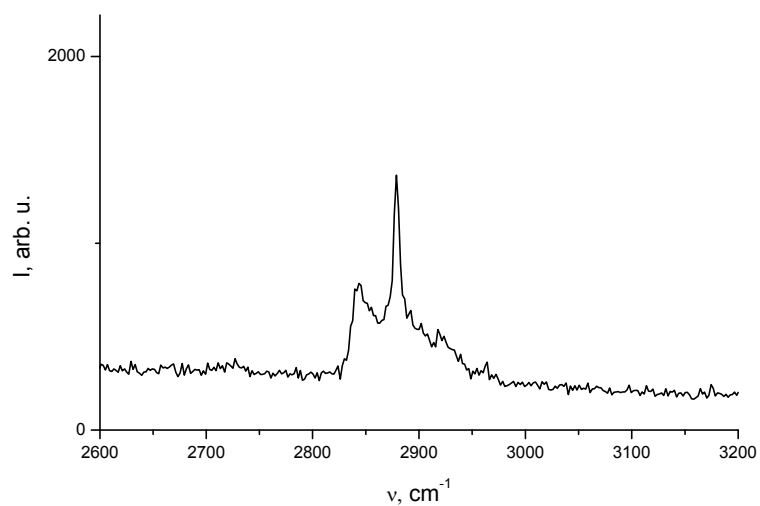


Рис. 16. Спектр КР пентадекановой кислоты $C_{15}H_{30}O_2$ в области валентных колебаний.

Рис. 17. Спектр КР стеариновой кислоты $C_{18}H_{36}O_2$ в области валентных колебаний.Таблица 6. Характеристики спектров КР каприловой кислоты $C_8H_{16}O_2$.

Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I , отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}	Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I , отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}
266,0	877	56,2	1414,7	353	9,7
321,2	318	35,2	1439,7	1800	17,8
401,7	235	10,5	1457,1	1065	17,5
841,9	1021	27,9	1658,1	839	37,5
896,3	1216	41,7	2727,7	480	28,7
1000,6	611	4,1	2852,2	4443	13,3
1029,6	665	23,3	2870,4	4540	26,4
1061,1	413	11,3	2909,5	5944	59,7
1076,7	560	16,4	2935,3	3784	21,3
1116,3	997	13,4	2962,5	691	22,3
1304,0	1109	27,4			

Таблица 7. Характеристики спектров КР каприновой кислоты $C_{10}H_{22}O_2$.

Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}	Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}
163,8	170	4,8	1063,7	378	7,0
172,6	240	4,3	1122,5	406	7,6
235,4	11709	0,3	1172,6	868	1,8
255,9	224	3,3	1297,6	381	5,7
262,9	324	5,7	1409,8	142	5,2
290,8	171	1,9	1432,0	244	13,8
311,9	439	5,6	1456,1	147	21,9
337,0	328	8,6	1643,2	129	4,2
354,6	155	5,9	2652,9	40	3,6
463,3	124	3,1	2724,4	61	15,4
526,0	189	1,7	2844,0	550	8,1
529,7	142	2,6	2857,7	366	2,9
631,8	64	9,8	2870,6	289	6,5
661,6	123	9,1	2880,4	632	8,2
847,3	818	1,1	2890,2	222	14
889,8	274	7,5	2910,5	410	45,9
904,6	134	2,2	2935,0	169	17,4
982,4	103	1,7			

Таблица 8. Характеристики спектров КР ундециловой кислоты $C_{11}H_{22}O_2$.

Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}	Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}
50,7	189	0,4	1082,2	226	34,7
65,4	327	7,3	1087,3	261	1,3
336,7	335	9,3	1123,1	454	12,2
352,7	355	4,9	1297,8	345	10,7
660,5	148	9,5	1407,7	187	5,1
738,9	141	2,9	1435,1	427	18,2
846,4	88	2,3	1454,8	324	30,7
890,5	71	9,5	2612,1	104	7,7
905,8	235	6,7	2723,4	95	17
981,8	157	2,4	2847,4	1134	13,6
105,1	91	3,9	2878,5	1309	32,8
1063,2	271	6,2	2907,8	604	34,3
1079,3	188	11,4	2933,9	488	35,3

Таблица 9. Характеристики спектров КР тридекановой кислоты $C_{13}H_{26}O_2$.

Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}	Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}
187	224	15,2	1452,2	230	14,8
261,1	448	0,2	1464,5	449	7,6
579,7	114	95,6	1482,2	86	6,4
888,2	118	4,4	2586,8	84	2,0
903,2	136	8,8	2612,6	142	1,6
1055,0	858	6,3	2718,5	100	25,5
1089,1	149	23,3	2841,7	646	9,3
1125,9	411	8,5	2858,1	613	21,3
1132,1	1740	0,7	2878,8	1307	8,3
1295,6	395	4,5	2907,5	442	43,6
1321,9	134	3,0	2935,5	188	12,0
1331,0	123	1,3	2961,4	144	2,0
1440,8	477	11,8			

Таблица 10. Характеристики спектров КР пентадекановой кислоты $C_{15}H_{30}O_2$.

Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}	Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}
172,0	340	15,9	1408,1	119	4,1
260,3	463	0,7	1416,4	261	6,0
660,2	58	10,3	1436,7	652	7,3
844,8	86	1,9	1456,4	334	18,9
887,3	161	7,1	1467,6	113	5,0
903,0	130	7,3	1643,5	35	34,0
1060,4	2094	1,2	2612,1	48	4,7
1093,6	163	5,4	2719,8	105	21,5
1125,9	472	8,2	2846,3	1055	19,7
1171,3	375	3,6	2877,4	1863	11,3
1294,8	800	5,8	2912,2	516	47
1321,8	457	0,5	2957,2	115	1,4
1367,8	43	4,6			

Валентные колебания в спектрах КР регистрируются в виде широкой полосы, имеющей несколько максимумов (рис. 12-17). Спектры КР жидких кислот ($C_4H_8O_2$, $C_5H_{10}O_2$, $C_8H_{16}O_2$) имеют сглаженную форму (рис. 12). Спектры

КР кислот $C_{10}H_{20}O_2$, $C_{11}H_{22}O_2$, температура плавления которых на несколько градусов выше комнатной, представлены серией максимумов, незначительно отличающихся по интенсивности (рис. 13, 14). Спектры КР поликристаллических образцов ($C_{13}H_{26}O_2$, $C_{15}H_{30}O_2$, $C_{18}H_{36}O_2$) представлены узкими интенсивными линиями (рис. 15-17).

Таблица 11. Характеристики спектров КР стеариновой кислоты $C_{18}H_{36}O_2$.

Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}	Частота, ν , cm^{-1}	Интенсивность, I, отн. ед.	Ширина, δ , cm^{-1}
154,0	322	50,9	1418,7	221	9,3
261,8	875	0,8	1437,7	434	7,7
888,9	100	11,9	1460,9	211	18,7
1061,4	737	5,6	2724,5	45	19,3
1102,2	165	8,8	2846,6	444	19,4
1129,1	483	8,2	2878,8	878	8,4
1172,8	2753	0,7	2904,3	255	61,8
1296,1	562	6,1	2963,4	85	2,0

В спектрах КР жирных кислот обнаружен ряд дополнительных максимумов (см. рис. 2) в области 2700 см^{-1} , появление которых можно объяснить как следствие резонанса Ферми.

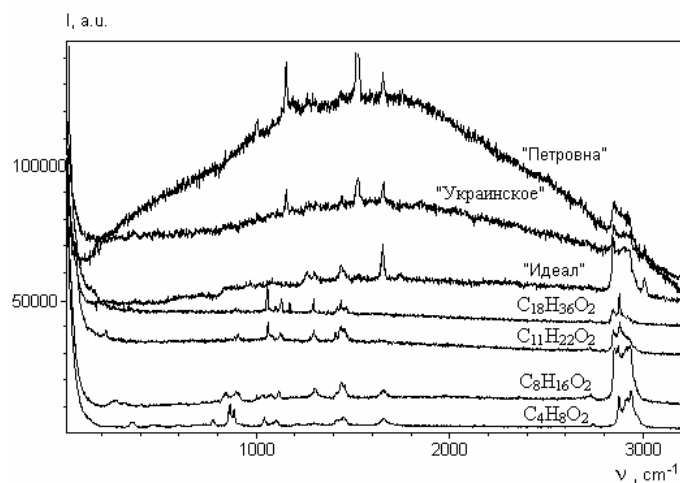


Рис. 18. Общий вид спектров КР соединений $C_nH_{2n}O_2$ ($n = 4, 8, 11, 18$) и подсолнечных масел ("Идеал", "Петровна", "Рыночное").

На рис. 18 приводятся обзорные спектры подсолнечного масла различных марок (“Идеал” – Аргентина, “Петровна” – Россия, “Украинское”) и для сравнения несколько спектров насыщенных жирных кислот. Масло “Украинское” получено путем отжима из зерен подсолнуха, без промышленной обработки. Масла “Идеал” и “Петровна” прошли промышленную обработку. Хорошо видно, что спектры КР обсуждаемых масел существенно отличаются друг от друга и от соответствующих спектров насыщенных жирных кислот. Количество и интенсивность линий у масла “Идеал” заметно меньше, чем у остальных масел. Из сравнения спектров КР масел и насыщенных жирных кислот можно сделать предположение, что наблюдаемые наиболее интенсивные линии в спектрах КР масел соответствуют скелетным колебаниям углеродных цепей. Воздействие тепловой или какой-либо другой промышленной обработки масел приводит к нарушениям их молекулярной структуры.

5. Обсуждение результатов эксперимента

В результате проведенных исследований измерены частоты продольных акустических колебаний (LAM) молекул насыщенных жирных кислот $C_nH_{2n}O_2$ различной длины. Установлено, что частоты LAM монотонно уменьшаются с ростом числа n . Соответствующая зависимость носит нелинейный характер. Сравнительные характеристики спектров КР различных жирных кислот приведены в таблицах 12 и 13. Из этих таблиц видно, что частоты внутримолекулярных колебаний также зависят от длины молекулы, т.е. от числа n атомов углерода в молекуле $C_nH_{2n}O_2$, но эта зависимость менее выразительна, чем для акустических мод.

В спектрах КР поликристаллических кислот интенсивность максимума валентного симметричного колебания в области 2840 см^{-1} слабо зависит от числа атомов углерода в молекулярной цепочке (см. рис. 13-17). В то же время

Таблица 12. Сравнительные характеристики спектров КР жирных кислот, находящихся в жидком состоянии при комнатной температуре (цифры соответствуют частотам в см^{-1}).

Тип колебания	$C_4H_8O_2$	$C_5H_{10}O_2$	$C_8H_{16}O_2$
LAM-мода	359,2	304,7	266,0
Оптическое скелетное V_{1g}	862,7	827,3	1000,6
	883,7	912,6	1029,6
	1041,7	1019,1	1061,1
	1078,2	1061,5	1076,7
Оптическое скелетное A_g	1102,4	1107,2	1116,3
	1211,4	1201,6	
Крутильное	1296,9	1298,3	1304,0
Деформационное ножничное	1415,7	1413,7	1414,7
	1450,5	1447,3	1439,7
			1457,1
	2741,9	2734,5	2727,7
Валентное симметричное	2877,1	2871,8	2852,2
			2870,4
Валентное асимметричное	2912,8	2914,3	2909,5
	2940,3	2939,8	2935,3
	2970,6	2964,6	2962,5

относительная интенсивность максимума в области частот 2870 см^{-1} по сравнению с максимумом 2840 см^{-1} возрастает почти в два раза при переходе от молекулы $\text{C}_{11}\text{H}_{22}\text{O}_2$ к $\text{C}_{13}\text{H}_{26}\text{O}_2$ (см. рис. 14 и 15).

Обнаружено также изменение параметров линий КР в области асимметричных валентных колебаний ($2900\text{-}2970 \text{ см}^{-1}$) в поликристаллических жирных кислотах с изменением длины молекулы (см. рис. 12-16).

Таблица 13. Сравнительные характеристики спектров КР жирных кислот, находящихся в твердом состоянии при комнатной температуре (цифры соответствуют частотам в см^{-1}).

Тип колебания	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$	$\text{C}_{11}\text{H}_{22}\text{O}_2$	$\text{C}_{13}\text{H}_{26}\text{O}_2$	$\text{C}_{15}\text{H}_{30}\text{O}_2$	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$
ЛАМ-мода	235,4		187,0	172,0	154,0
Оптическое скелетное B_g	1063,7	1051,1 1063,2 1079,3 1082,2 1087,3	1055,0	1060,4	1061,4
Оптическое скелетное A_g		1123,1	1132,1	1125,9	1129,1
Деформационное маятниковое	1172,6			1171,1	1172,8
Крутильное	1297,6	1297,8	1295,6	1294,8	1296,1
Веерное			1321,9 1331,0	1321,8 1367,8	
Деформационное ножничное	1409,8 1432,0 1456,1	1407,7 1435,1 1454,8	1440,8 1452,2 1464,5 1482,2	1408,1 1416,4 1436,7 1456,4 1467,6	1418,7 1437,7 1460,9
	2724,4	2612,1 2723,4	2586,8 2612,6 2718,5	2612,1 2719,8	2724,5
Валентное симметричное	2844,0 2857,7 2870,6 2880,4 2890,2	2847,4	2841,7 2858,1	2846,3	2846,6
Валентное асимметричное	2910,5 2935,0	2907,8 2933,9	2907,5 2935,5 2961,4	2912,2	2904,3 2963,4

Заключение

В данной работе исследованы колебательные спектры насыщенных жирных кислот: масляной ($C_4H_8O_2$), валериановой ($C_5H_{10}O_2$), каприловой ($C_8H_{16}O_2$), каприновой ($C_{10}H_{20}O_2$), ундециловой ($C_{11}H_{22}O_2$), тридекановой ($C_{13}H_{26}O_2$), пентадекановой ($C_{15}H_{30}O_2$) и стеариновой ($C_{18}H_{36}O_2$) методом лазерной спектроскопии комбинационного рассеяния.

Установлено, что частоты продольных акустических колебаний (LAM) монотонно уменьшаются с ростом длины углеродной цепочки. Такие колебания можно рассматривать как аналог мягкой моды, частота которой устремляется к нулю при приближении к температуре структурного фазового перехода в кристалле. В данном случае «размягчение» кристаллической решетки осуществляется в результате перехода от цепочки конечных размеров к линейной молекуле $C_nH_{2n}O_2$ с бесконечным числом звеньев. Аналогичные свойства должны проявляться для поперечных акустических мод (ТАМ) и либрационной моды (LM). Размягчение моды ТАМ приводит к зигзагообразной форме молекулы, а размягчение моды LM - к винтовой (хиральной) структуре, характерной, в частности, для фторорганических соединений типа C_nF_{2n+2} .

В данной работе определены частоты колебаний молекул насыщенных жирных кислот, относящихся к деформационным, маятниковым, крутильным, веерным и ножничным движениям CH_2 -групп, а также частоты валентных C-H колебаний. Установлено, что эти частоты зависят от длины соответствующих молекулярных цепочек: с увеличением числа n атомов углерода в молекулярной цепочке частоты деформационных, маятниковых, крутильных и ножничных колебаний уменьшаются, а веерных колебаний - увеличиваются.

Обнаруженный эффект сдвига частот внешних и внутренних колебаний цепной молекулы можно объяснить на основе динамики колебаний одномерных двухатомных и многоатомных цепочек. Ранее такого рода эффект наблюдался в спектрах КР насыщенных углеводородов C_nH_{2n+2} /6,10/, а также для фторуглеродных цепных молекул C_nF_{2n+2} и $C_nF_{2n+1}Br$ /11/. Теория /9,11/ этого эффекта, объясняющая зависимость частот как акустических, так и оптических мод от длины цепной молекулы, основана на учете граничных условий для цепных молекул конечной длины.

Выполненное исследование позволяет сделать вывод о том, что частоты акустических и оптических колебаний цепных молекул жирных кислот зависят от числа n атомов углерода в молекуле $C_nH_{2n}O_2$. Такой результат может быть использован для определения длины цепной молекулы жирной кислоты на основе данных о частотах колебаний по соответствующим спектрам КР.

Разработанная методика открывает возможность для проведения анализа молекулярного состава растительных и животных жиров, содержащих молекулы насыщенных жирных кислот различной длины.

Список литературы

1. Jean-Marie Lehn. Supramolecular Chemistry. Concepts and Perspectives. – Weinheim; New York; Basel; Cambridge; Tokyo: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1995.
2. D.F. Eaton, A.G. Anderson, W. Tam, W. Mahler and Y. Wang. Molecular Crystals and Liquid Crystals. 211, 125, 1992.
3. J.-M. Lehn. Structure and Bonding. 16, 1, 1973.

4. D.W. Brown, A.J. Floyd and M. Sainsbury. Organic Spectroscopy. Chichester. 1988.
5. Rudolf Zbinden. Infrared spectroscopy of high polymers. Academic Press. New York and London. 1964.
6. V. Gorelik, A. Chervyakov, L. Koltsova and S. Veryaskin. J. Russian Laser Research. 21, N 4, p.78, 2000.
7. В. А. Рабинович, З.Я. Хавин. Краткий химический справочник. – Ленинград, Химия. 1977.
8. Справочник химика. Т. 2. Москва, ГХИ. 1963.
9. P.C. Painter, M.M. Coleman, J.L. Koenig. The Theory of Vibrational Spectroscopy and its Application to Polymeric Materials. A Wiley-Interscience Publication. John Wiley and Sons. New York. 1982.
10. S.I. Mizushima, T. Shimanouchi. J. Am. Chem. Soc. 71, 1320, 1949.
11. Л.П. Авакянц, В.С. Горелик, Л.И. Злобина, А.В. Червяков, О.Н. Шартс. Известия РАН, серия физическая. 64, 1191, 2000.

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ НА СЛУЖБЕ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ТРАНСПОРТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

Никитенко В.А., Кокин С.М., Мухин С.В., Стоюхин С.Г., Пыканов И.В.,
Елисеева Е.Г.

*103055 Москва, ул. Образцова, 15, МИИТ, кафедра "Физика-2"
E-mail: solowjow@online.ru*

Взаимная связь транспорта и окружающей среды требует анализа влияния разнообразных воздействий (электромагнитного, радиационного, химического и иного происхождения) на неорганические материалы и биосферу. Для проведения такого анализа используются различные методики; одни из наиболее перспективных - люминесцентные.

Люминесцентный анализ широко применяется в технике, например, при выявлении раковин, микротрещин в различных объектах (прежде всего - ферромагнитных и крупногабаритных, то есть там, где не удаётся использовать методы магнито-порошковой и ультразвуковой дефектоскопии). Для этих целей объект исследования обрабатывается раствором люминофора, который заполняет микротрещины, после чего деталь освещают ультрафиолетовым излучением. Микродефекты заявляют о себе люминесценцией заполнившего их раствора в видимом диапазоне спектра. Для повышения яркости и контрастности изображения данная методика используется и в люминесцентной микроскопии: добавки, которые светятся под действием ультрафиолета, вводятся в образцы биологических тканей, культур бактерий и т.д. Кроме того, изучение спектров люминесценции само по себе способно дать ценную информацию о структуре микрообъектов, например, - кристаллов, применяемых для целей опто- и микроэлектроники. Так, с её помощью удаётся идентифицировать точечные дефекты в монокристаллах, обнаруживать сложные ассоциаты дефектов и др. [1].

Люминесценция пищевых продуктов (мясных, молочных, растительных) позволяет оперативно оценивать их качество, изменение характеристик этих продуктов при транспортировке. Для этих целей наиболее перспективным представляется спектральный люминесцентный анализ, который основан на собственной люминесценции ряда компонент пищевых продуктов: ароматических аминокислот, витаминов, полиненасыщенных жирных кислот и т.п. [2]. Этот же метод можно использовать и при экологическом мониторинге местности, причём исследуемыми образцами могут служить не только продукты растительного происхождения. Так, например, давно замечено, что чем чище вода, тем слабее она люминесцирует в ультрафиолетовых лучах. Загрязняющей воду примесью, проявляющейся в люминесценции, могут служить гуминовые соединения, органические вещества животного происхождения, остатки бытовых и промышленных стоков, нефтепродукты.

Большое значение для целей экологической экспертизы могут иметь и разнообразные методики, связанные с изучением термовысвечивания образцов (в качестве примера можно привести рентгенолюминесцентное датирование [3]).

В настоящей работе рассмотрена апробированная система люминесцентного анализа органических и неорганических материалов, в основе которой лежит использование оригинального спектрально-вычислительного комплекса, электронного растрового микроскопа и установки для исследования электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Комплексная обработка результатов экспериментов позволяет получать уникальные результаты, перспективные с точки зрения возможности их использования для экологической экспертизы [1,2,4,5].

Базовый спектральный комплекс, используемый для проведения большинства исследований - термовысвечивания (ТВ), регистрации спектров фотолюминесценции (ФЛ), спектров возбуждения излучения (СВИ), и фототока (СВТ), а также спектров отражения (СО), был собран на основе двух монохроматоров МДР-3, рис. 1а,б. Для возбуждения ФЛ образцов в вакуумном криостате в интервале температур от 77 К до 400 К используются линии излучения ртутных ламп ДРТ-220, ДРШ-1000, выделенные входным монохроматором (для изучения СВИ, СВТ и СО в этих целях применяется галогенная лампа накаливания типа КГМ-24-150 или ксеноновая лампа ДКШС-1000 с соответствующим расположением в схеме), а также - излучение импульсного лазера ЛГИ-21, длина волны 337 нм. Излучение образца фокусируется на входную щель выходного монохроматора, после которого располагается фотоприёмник: фотоэлектронный умножитель ФЭУ-100 (спектральный диапазон регистрируемого излучения 300 ÷ 850 нм) или ФЭУ-28 (400 ÷ 1000 нм). Для регистрации инфракрасного излучения применяется фотосопротивление на основе PbS (спектральный диапазон 700 ÷ 3000 нм). Электрический сигнал с приёмника излучения подаётся либо на электрометрический усилитель ЭРУ-24, а затем - на самописец, либо - на персональный компьютер, который не только может через плату сопряжения управлять работой монохроматоров, но и вводит корректирующие поправки (например, учитывать аппаратную функцию комплекса) в получаемые результаты.

Данная установка (с учётом постоянного обновления элементной базы) успешно функционирует уже в течение двадцати лет; она позволила получить уникальные результаты в области спектроскопии экситонов и точечных дефектов в кристаллах [1,4], а также разработать методику люминесцентной оценки

качества пищевых продуктов и разнообразных образцов растительного и животного происхождения [2].

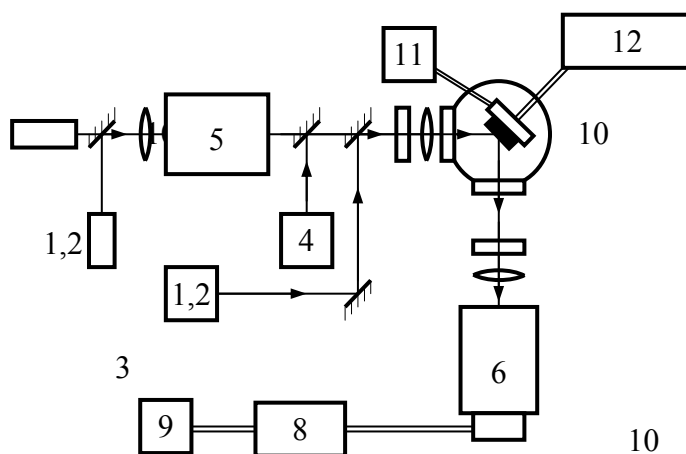


Рис 1.а Блок-схема базовой установки для исследования спектральных характеристик 1,2 - лампа КГМ-24-150 или ДКСШ-1000; 3 - лампа ДРТ-220; 4 - лазер ЛГИ-21; 5 - входной монохроматор; 6 - выходной монохроматор; 7 - фотоэлектронный умножитель; 8 - электронно-регулирующее устройство ЭРУ-24 (усилитель сигнала, получаемого с фотоэлектронного умножителя); 9 - регистратор (самописец КСП-4); 10 - съемные зеркала; 11 - стабилизатор температуры; 12 - термопара криостата.

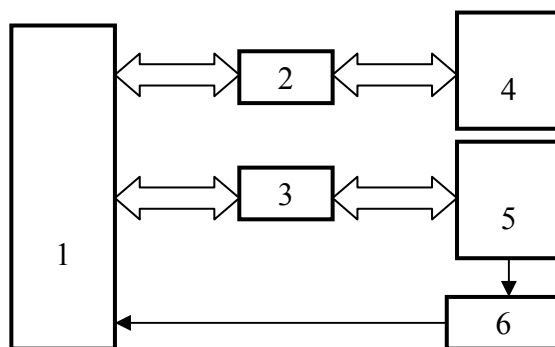


Рис. 1.б Блок-схема спектрального комплекса на базе IBM-совместимого компьютера 1 - Персональный компьютер; 2,3 - платы сопряжения; 4 - входной монохроматор; 5 - выходной монохроматор; 6 - фотоэлектронный умножитель.

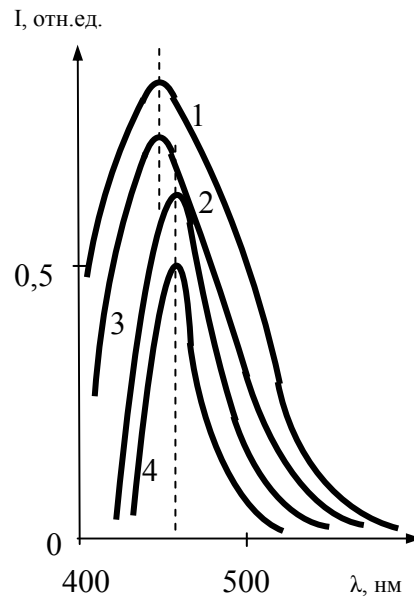


Рис. 2. Спектры люминесценции зерна пшеницы, пораженного фузариозом: 1 - розовое зерно (77 К); 2 - бесцветное зерно (77 К); 3 - розовое зерно (300 К); 4 - бесцветное зерно (300 К)

Основными люминесцирующими компонентами, определение спектрально-люминесцентных характеристик которых позволяет проводить оценку качества зерновых, молочных и мясных продуктов при их переработке, хранении и транспортировке (например, при перевозках по железной дороге), являются некоторые биологически активные вещества, которые образуются при окислении и деградации полиненасыщенных жирных кислот, токоферолов и β -каротина. В растительном сырье помимо β -каротина для люминесцентного анализа важную роль играют хлорофилл и флавоноиды [2]. Изменения их свойств в образцах растительности вдоль транспортных магистралей являются своего рода "лакмусовой бумажкой", позволяющей судить о степени загрязнения окружающей среды.

В качестве примера применения люминесцентного анализа для определения качества продукта растительного происхождения на рис. 2 приведены спектры люминесценции зёрен пшеницы: здорового и пораженного фузариозом [2]. Из рисунка следует, что яркость люминесценции пораженного зерна выше, чем здорового: по интенсивности свечения можно делать выводы о степени поражения зерна болезнью.

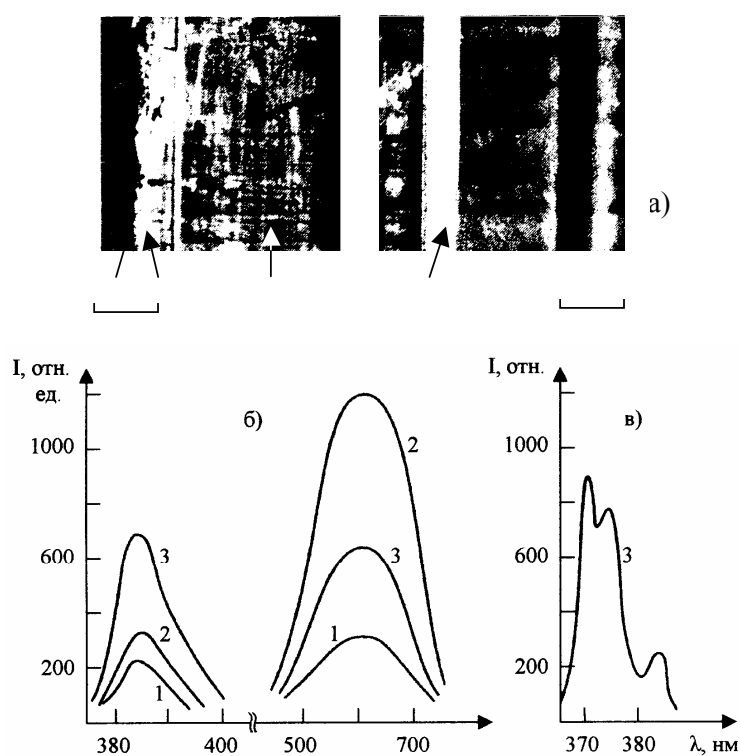


Рис.3 Микрофотографии в свете катодолуминесценции (а) и спектры катодолуминесценции (энергия электронов 25 кэВ) при 300 К (б) и 100 К (в) монокристалла ZnO, имплантированного ионами кислорода (110 МэВ ; $1,3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) с последующим отжигом на воздухе при 1070 К. Номера кривых на графиках соответствуют номерам тех точек на микрофотографиях, с которых эти спектры снимались.

Для проведения точечного спектрального анализа люминесценции мы используем растровый электронный микроскоп JSM-2 [5]. Электронно-микроскопические исследования проводятся в режиме катодолуминесценции и регистрации тока отражённых электронов. В результате модификации сотрудниками института кристаллографии РАН промышленной японской установки удаётся регистрировать спектры катодолуминесценции с микроучастков кристаллов размерами от $100 \times 100 \text{ мкм}^2$ до $0,1 \times 0,1 \text{ мкм}^2$ в диапазоне длин волн $300 \div 800 \text{ нм}$ и в интервале температур $100 \div 300 \text{ К}$. Один из полученных оригинальных результатов (см. также [5]) показан на рис. 3.

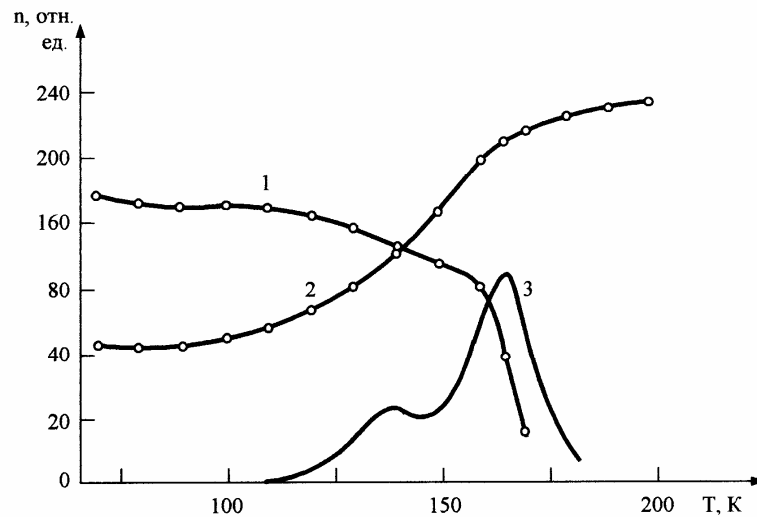


Рис. 4. Зависимость концентрации n парамагнитных центров при 70 К в монокристалле ZnO:Fe,Li от температуры отжига T и кривая термовысвечивания:

1 - парамагнитные литиевые центры $\text{Li}_{\text{Zn}}^+ - \text{O}^-$; 2 - парамагнитные состояния $\text{Fe}_{\text{Zn}}^{3+}$.

3 - кривая термовысвечивания на длине волны 720 нм.

Длина волны предварительного светового возбуждения 380 нм

Как известно, термовысвечивание освобождает энергию, запасённую в веществе; как показали наши исследования [4], уникальные данные могут быть получены при совместном применении методик термовысвечивания и ЭПР - рис. 4. В ходе подобных экспериментов можно выявлять информацию не только о запасённой образцом светосумме, о параметрах соответствующих ловушек, но и сделать важные выводы о характере электронно-дырочных процессов, протекающих в образце.

Для ряда применений при анализе свойств исследуемых образцов бывают полезны электролюминесцентные устройства, в которых свечение неорганического люминофора возбуждается переменным напряжением. Так, например, нами показано [6], что различные модификации подобных устройств могут использоваться для выявления неоднородностей в диэлектрических и полупроводящих пластинах, для измерения скоростей проникновения жидкостей в пористые и слоистые материалы, ткани и т.д. Длинномерные (в десятки метров) гибкие электролюминесцентные ленты различных цветов свечения с автономными источниками питания - хороший материал для создания систем аварийного освещения, трассировки безопасных путей эвакуации персонала в условиях пониженной освещённости и организации предупреждения о возникновении экологически опасных ситуаций.

Важным аспектом проблемы снижения негативного влияния транспорта на окружающую среду является экологическое воспитание будущих специалистов - студентов транспортных вузов. Данным вопросам уделяется особое внимание в курсах общей физики и концепций современного естествознания; часть из них рассмотрена нами в учебном пособии [7].

Нам представляется, что заинтересованные лица должны иметь представление о возможностях люминесцентного анализа, в частности, - для проведения оперативной экологической экспертизы, мониторинга местности вблизи реальных центров загрязнения окружающей среды, одним из которых являются железные дороги. При сравнении достоинств различных методик, решающих эту же задачу, необходимо помнить о том, что люминесцентный анализ обладает таким преимуществом, как оперативность, и то, что для его проведения достаточно весьма малого количества исследуемого вещества.

Работа выполнена при частичной поддержке фонда НИОКР МПС РФ и при большом участии д.т.н. Е.И.Тимошкина.

Список литературы

1. Кузьмина И.П., Никитенко В.А. Окись цинка. Получение и оптические свойства. - М.: Наука, 1984. - 166 с.
 2. Красников В.В., Тимошкин Е.И., Титкова А.В. Спектральный люминесцентный анализ пищевых продуктов. - М.: Агропромиздат, 1987. - 288 с.
 3. Ваганов А.П. Физики дописывают историю. - Л.: ЛГУ, 1984. - 214 с.
 4. Никитенко В.А. Люминесценция и ЭПР оксида цинка // Журнал прикладной спектроскопии. - 1992. - Т. 57, № 5-6. - С. 367 - 385.
 5. Никитенко В.А., Мухин С.В., Кузьмина И.П., Галстян В.Г. Высокоэнергетическая имплантация кислорода в монокристаллы ZnO, легированные литием // Неорганические материалы. - 1994. - Т.30, № 8. - С. 1043 - 1045.
 6. А.с. 1543331 СССР, МКИ4 G 01 N 27/22. Устройство для исследования электрических неоднородностей высокоомных образцов / И.К.Верещагин, И.Турек, С.М.Кокин, И.Баяк; МИИТ (СССР). - N 427096/27-25; Заявл. 13.04.87.- Открытия. Изобрет. - 1990. - № 6.
 7. Никитенко В.А., Прунцев А.П. Концепции современного естествознания. - М.: Алвиан, 1997. - 134 с.
-

СОДЕРЖАНИЕ

Введение. ТРЕТЬЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ (ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА)».....	3
РЕШЕНИЕ ТРЕТЬЕЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ (ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА)».....	6
ФИЗИКА И ЭКОЛОГИЯ.....	8
<i>Трухин В.И., Пирогов Ю.А., Показеев К. В.</i>	

СЕКЦИЯ 1

**ЭКОЛОГИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И АТМОСФЕРЫ**

МОНИТОРИНГ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ В МАКСИМУМЕ 23-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ	12
<i>Иванова Т.А., Павлов Н.Н., Рейзман С.Я., Рубинштейн И.А., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В., Тельцов М.В., Балашов С.В., Иванов В.В., Максимов И.А., Хартов В.В., Зубарев А.И.</i>	
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ.....	20
<i>Гецелев И.В., Красоткин С.А., Охлопков В.П., Чучков Е.А.</i>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНЫХ И ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ОЗОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ.....	26
<i>Криволицкий А.А., Куминов А.А., Вьюшкова Т.Ю., Базилевская Г.А., Переяслова Н.К., Назарова М.Н.</i>	
СЕЗОННО-СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ИНФРАЗВУКОВЫХ ШУМОВ В АТМОСФЕРЕ	33
<i>Соловьев А.В., Тельпуховский Е.Д.</i>	

СЕКЦИЯ 2

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ ГИДРОСФЕРЫ

- ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ РАЗНОМАСШТАБНОГО
КРУГОВОРОТА ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ЭКОСИСТЕМЕ
СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА.....43
Ершова М.Г., Заславская М.Б., Эдельштейн К.К.
- ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ
АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОД ЧЁРНОГО МОРЯ.....50
Иванов В.А., Кузнецов А.С., Сабинин К.Д.
- МОДИФИЦИРОВАННАЯ ТЕХНИКА МАКСИМАЛЬНОЙ КРОСС-
КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ПОЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ СКОРОСТИ В ОКЕАНЕ57
Завьялов П.О., Григорьева Ю.В., Жмур В.В.
- ЭКСПРЕСС-МОНИТОРИНГ МОРСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ
СТРУКТУР В ЦЕЛЯХ ПРОГНОЗА МИГРАЦИЙ
МОРСКОЙ БИОТЫ.....66
Васильев А.С.
- ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА, СОСТОЯНИЯ ВОДОЕМОВ
И ВОДОСБОРОВ75
Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Сало Ю.А.

СЕКЦИЯ 3

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ

- РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ЮЖНОМ УРАЛЕ
ПО ГЕОТЕРМИЧЕСКИМ ДАННЫМ.....89
Голованова И.В., Селезнева Г.В.
- КВАНТОВАННЫЕ ГИСТОГРАММЫ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ
ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ97
Нигматуллин Р.Р.
-

СЕКЦИЯ 4

БИОФИЗИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

- ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА МИТОЗ У СОСНЫ
ОБЫКНОВЕННОЙ (PINUS SYLVESTRIS L.).....106
Буторина А.К., Миронов А.Н., Панкратьева Е. А., Левин М.Н.
- ПОВЫШЕНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ГЕНОМА ПОТОМСТВА
САМЦОВ МЫШЕЙ, ПОДВЕРГНУТЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ
НИЗКОИНТЕНСИВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ¹³⁷CS.....112
Безлепкин В.Г., Васильева Г.В., Ломаева М.Г., Сирота Н.П., Газиев А.И.
- О ЗАВИСИМОСТИ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ В НОВОСИБИРСКЕ ОТ
БЫТОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ120
Гвоздарев А.Ю., Дмитриев А.Н.
- ЭКОЛОГИЯ: ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ОКРУЖЕНИЕ И МОЗГ127
Чиженкова Р.А.

СЕКЦИЯ 5

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ СРЕД

- РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРНЫХ
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ И ГРАДИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МОРСКОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ПО ЕЁ ТЕПЛОВОМУ РАДИОИЗЛУЧЕНИЮ133
Бубукин И.Т., Станкевич К.С., Иванов В.П.
- КОМПАКТНЫЙ ЛИДАР ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ВОДОЕМОВ, ПОЧВЫ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ....140
Бункин А.Ф., Першин С.М.
- РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА
НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛНАХ147
Кропоткина Е.П., Пирогов Ю.А., Розанов С.Б., Соломонов С.В.
- ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ
В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ155
Ларкина В.И., Ружин Ю.Я., Сергеева Н.Г., Сенин Б.В.
-

МОНИТОРИНГ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ В ГАММА-ДИАПАЗОНЕ	161
<i>Свертилов С.И., Кудрявцев М.И., Богомолов В.В., Денисов Ю.И, Морозов О.В., Панков В.М.</i>	

СЕКЦИЯ 6

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ОЗОНА ДЛЯ УФ/О ₃ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ	169
<i>Дамбраускас С.Г., Новиков П.С., Рахимов А.Т., Саенко В.Б.</i>	
СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА НАСЫЩЕННЫХ ЖИРНЫХ КИСЛОТ	178
<i>Горелик В.С., Глаголев К.В., Козлова Г.В., Кольцова Л.В., Кравцов А.В., Куркин Ю.П., Морозов А.Н., Показеев К.В., Свербиль П.П., Червяков А.В.</i>	
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ НА СЛУЖБЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ТРАНСПОРТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ.....	200
<i>Никитенко В.А., Кокин С.М., Мухин С.В., Стоюхин С.Г., Пыканов И.В., Елисеева Е.Г.</i>	

Научное издание

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ
(ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА)
№ 6

Сборник трудов под редакцией
В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева

ЛР № 021293 от 18.06.98
Подписано в печать 10.09.2001.
Объем 13,25 п.л. Тираж 100 экз.

Физический факультет МГУ
119899, Москва, Воробьевы горы, МГУ им. М.В. Ломоносова
