

## ОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

Петрусевич Ю.М., Берловская Е.Е., Тульский С.В.

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

Жизнь современного человека невозможно представить без многочисленных бытовых приборов, производящих или использующих электромагнитное излучение (микроволновые печи, телевизоры, телефоны, компьютеры, другие электроприборы). И даже электропроводка в стенах домов и внешние линии электропередач вносят свой вклад в **электромагнитное загрязнение** жилого пространства. *Масштабы данного электромагнитного загрязнения среды обитания человека стали столь существенны, что Всемирная организация здравоохранения включила эту проблему в число наиболее актуальных.*

Импульсно-модулированные и статические поля, создаваемые бытовой техникой и электропроводкой внутри помещений, изменяют электрические и магнитные поля в среде обитания человека, оказывая тем самым существенное влияние на его здоровье, и даже способствуя изменению гормонального статуса организма, росту уровня хромосомных aberrаций, изменениям в репродуктивной системе. Исследования показали, что продолжительное **влияние электромагнитного излучения**, даже относительно слабого уровня, может вызывать болезни Паркинсона и Альцгеймера, раковые заболевания, в частности, доказано наличие прямой связи воздействия электромагнитных волн от линий электропередач с заболеванием лейкемией. Особенно опасны воздействия полей на детей..

Основным документом, определяющим параметры воздействия электромагнитных излучений (ЭМИ), являются "Санитарные правила и нормы ..." (СанПиН 2.2.42.1.8.055-96). Согласно ним, для населения допустимые уровни воздействия определяются по интенсивности ЭМИ. При этом, предельно допустимые уровни интенсивности ЭМИ и допустимое время воздействия определяются по электрической и магнитной составляющей, плотности потока энергии.

Исследования биологического действия ЭМИ, выполненные в СССР в 60-70х годах, ориентировались в основном на действие электрической составляющей, поскольку экспериментальным путем значимого биологического действия магнитной составляющей при типичных уровнях в то время обнаружено не было. В 70-х годах были введены достаточно жесткие нормативы по электрическому полю промышленной частоты, которые и по настоящее время остаются одними из самых жестких в мире. Они изложены в Санитарных нормах и правилах «Защита населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты» №2971-84. В соответствии с данными нормами проектируются и строятся все объекты электро-снабжения.

Таблица 1. Предельно допустимые уровни ЭМИ РЧ и СВЧ в зависимости от продолжительности воздействия .

Продолжительность воздействия Т, ч	ЕПДУ, В/м	МПДУ, А/м	ППЭПДУ, Вт/м <sup>2</sup>			
				30-50 МГц	300 МГц -	
0,03-3 МГц	3-30 МГц	30-300 МГц	0,03-3 МГц	30-50 МГц	300 МГц -	
8,0 и более	50	30	10	5,0	0,30	0,25
7,5	52	31	10	5,0	0,31	0,27
7,0	53	32	11	5,3	0,32	0,29
6,5	55	33	11	5,5	0,33	0,31
6,0	58	34	12	5,8	0,34	0,33
5,5	60	36	12	6,0	0,36	0,36
5,0	63	37	13	6,3	0,38	0,40
4,5	67	39	13	6,7	0,40	0,44
4,0	71	42	14	7,1	0,42	0,50
3,5	76	45	15	7,6	0,45	0,57
3,0	82	48	16	8,2	0,49	0,67
2,5	89	52	18	8,9	0,54	0,70
2,0	100	59	20	10,0	0,60	1,00
1,5	115	68	23	11,5	0,69	1,33
1,0	141	84	28	14,2	0,85	2,00
0,5	200	118	40	20,0	1,20	4,00
0,25	283	168	57	28,3	1,70	8,00
0,20	-	-	-	-	-	10,00
0,125	400	236	80	40,0	2,40	-
0,08 и менее	500	296	80	50,0	3,00	-

В сборнике №14 [1] по физическим проблемам экологии мы приводили график поглощения электромагнитных волн в воде в диапазоне от 0.1 до 10000 МГц. Из этого графика следовало, что поглощение электрической составляющей ЭМИ, приводящее к нагреванию тканей человека на два порядка больше на границах указанного диапазона по сравнению с областью 100 МГц, где работают передатчики УКВ и телевизионного вещания. Поэтому наиболее опасны излучения от длинноволновых, средневолновых и радиолокационных станций, а также от ретрансляторов сотовой системы мобильных телефонов.

К сожалению, предельно допустимая величина магнитного поля для населения в России не нормируется, несмотря на то, что во всем мире сейчас магнитное поле признается наиболее опасным для здоровья человека. Причина - отсутствие соответствующих исследований и разработки норм. Как результат, большая часть линий электропередач строилась без учета этой опасности.

На основании массовых эпидемиологических обследований населения, проживающего в условиях облучения магнитными полями линий электропередач, как безопасный уровень для условий продолжительного облучения, не приводящий к онкологическим заболеваниям, независимо друг от друга шведскими и американскими специалистами рекомендована величина плотности потока магнитной индукции 0,2 - 0,3 мкТл. При этом считается, что развитие заболеваний - прежде всего лейкемии - очень вероятно при продолжительном облучении человека полями более высоких уровней.

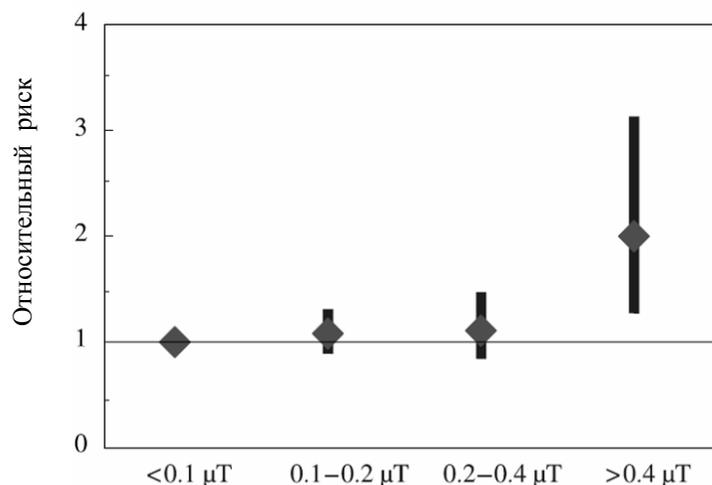


Рис. 1. Относительный риск возникновения детской лейкемии при продолжительном воздействии магнитных полей. *Ahlbom et al. (2000)*.

Наибольшую опасность для организма представляет длительное (по несколько часов в день) облучение в течение более года, особенно в ночные часы, когда в шишковидной железе головного мозга вырабатывается гормон мелатонин. Так, его недостаточное количество в организме провоцирует образование у

женщин рака груди. На сегодняшний день имеется ряд научных работ, которые весьма убедительно доказывают, что **влияние электромагнитного поля** промышленной частоты с уровнем 0,3-0,4 мкТл сильно угнетает выработку этого гормона. Исследования *Michael J Crumpton (2005)* объясняют вредное действие слабых магнитных полей наличием эффекта резкого роста числа свободных радикалов при определенных значениях поля. Данные исследования подтверждают канцерогенный характер действия слабых магнитных полей.

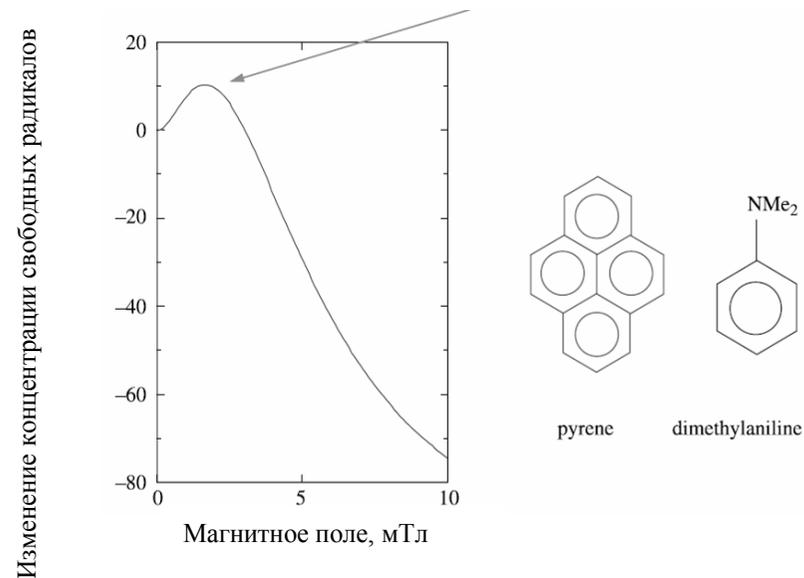


Рис.2. Эффект роста концентрации свободных радикалов в зоне действия слабых магнитных полей, *Michael J Crumpton, Are low-frequency EMFs a health hazard, (2005)*

Значительный вклад в электромагнитное загрязнение среды обитания людей вносят сотовые устройства связи [1]. Имеются также данные зарубежных исследователей по отрицательному воздействию облучения от устройств мобильной связи на здоровье человека. Такие исследования проводились в Швеции, Германии, Франции и др. странах [2].

Электромагнитные излучения необязательно оказывают только негативное воздействие на человека. Принцип действия многих медицинских приборов основан на положительном воздействии электромагнитных полей в специально подобранном режиме. При этом основной эффект положительного действия электромагнитных полей связан с эффектом гипертермии, т.е. с тепловым нагреванием ткани. Значительно сложнее объяснить положительное действие магнитных полей в области нескольких сотен гаусс, как переменных, так и постоянных, используемых в клиниках для ускорения сращения костей и хрящевой ткани при их травматическом повреждении.

В заключение можно дать следующие практические рекомендации для уменьшения вредного влияния электромагнитного излучения на человека.

1. Следует находиться вдали от силовых полей, создаваемых как бытовыми приборами (стиральная машина, СВЧ печь, электроплиты и др.), питающий ток в которых превышает величину в несколько ампер, так и электропроводкой. При этом сравнительно безопасным расстоянием можно считать расстояние не менее 3-х метров.
2. Безопасным расстоянием от телевизора считается расстояние не менее трех метров. Поскольку экраны телевизоров, в т.ч. и плазменные панели, излучают интенсивные электромагнитные поля.
3. При пользовании мобильными телефонами следует помнить, что вредное воздействие на организм человека зависит от времени их работы в непосредственной близости от головного мозга человека. Поэтому следует использовать гарнитуру, прилагаемую к телефону, или дистанционные устройства.
4. Следует избегать длительного пребывания вблизи высоковольтных линий электропередач, а также электрических подстанций.

#### Литература

1. Тульский С.В., Петрусевич Ю.М., Петрова Г.П., Бойко А.В. Электромагнитное излучение при работе мобильных телефонов и опасность его для здоровья. Сб. Физические проблемы экологии (Экологическая физика). №14. МГУ. 2007. С.378.
2. <http://www.multimania.com/corrupth/10-24.htm>

#### ИЗМЕНЕНИЕ ВОДНЫХ ПОТОКОВ ЛЕСОТАЕЖНОЙ ЗОНЫ В РАЙОНЕ ИСТОКА ВОЛГИ В РЕЗУЛЬТАТЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Тищенко А.П.\*, Пирогов\*\* Ю.А., Тищенко\*\* Д.А.

*\*Тверской государственный университет*

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

В рамках глобальной проблемы взаимодействия климата и растительности область исследования «леса и воды» – ключевая территория лесной метеорологии, гидрологии и экологии. В настоящее время различные аспекты взаимодействия леса и атмосферы в разных пространственных и временных масштабах являются ключевыми вопросами нескольких больших международных программ: Международная программа Геосфера-Биосфера, (IGBP), международная Гидрологическая Программа (ИНР) и проекты Глобальное Изменение и Земные Экосистемы (GSTE), Глобальной Энергии и Водного Эксперимента Цикла (GEWEX), Арктическое Изучение Атмосферы Экосистем, Эксперимент Балтийского моря (BALTEX). К сожалению, до сих пор многие важные процессы, в особенности процессы, контролируемые водный обмен между лесными экосистемами, реками и атмосферой и изменение функционирования лесных экосистем в связи с изменениями условий влажности недостаточно изучены и описаны. До сих пор не ясно, как вы-

рубка лесов, восстановление лесных массивов, сукцессия и изменения окружающей среды влияют на гидрологический режим различных регионов. Особенно важен вопрос, как учитывать грядущее глобальное потепление при планировании рационального управления лесными хозяйствами на региональном уровне.

Наибольшее проявление глобального потепления наблюдается в высоких широтах и, вероятно, оно окажет более сильное влияние на бореальные леса, чем на леса других широтных зон. Ожидаемое дальнейшее уменьшение осадков может стать причиной увеличения частотности пожаров и нашествий вредителей и средний возраст лесов и запасы углерода в биосфере, вероятно, будут уменьшаться. Наибольшему влиянию климатических изменений может подвергнуться южная граница северной лесной зоны, где бореальные хвойные леса, вероятно, уступят место временным ареалам пионерных видов. Юго-западная граница сообщества бореальных лесов в России пересекает территорию Валдайской Возвышенности. На этой территории есть особо охраняемые природные территории, где флора и фауна содержатся почти в естественных природных условиях. Удаленность от крупных индустриальных центров и городов обуславливает сравнительно низкий уровень прямого загрязнения окружающей среды. Это позволяет пренебречь влиянием антропогенного загрязнения и изучать динамику лесных экосистем только с учетом климатических изменений.

Этими условиями была определена выбранная территория для исследований. Главное внимание было сосредоточено на долгосрочном – прошлом, настоящем и будущем гидрологическом режиме лесных экосистем территории Верхневолжья, на оценке влияния ожидаемых климатических изменений на экосистемы бореальных лесов с использованием различных экспериментальных подходов, на анализе климатических и землепользовательских сценариев, SVAT и гидрологических моделей, совместимых с общей циркуляцией и региональными атмосферными моделями территории Верхневолжья.

Выбранная территория водосбора, около 3412 квадратных километров между 56°20' и 57°20' северной широты и 32°00' и 33°20' восточной долготы в верховьях Волги, впадающей в Каспийское море, расположена в северной части Валдайской Возвышенности. Территория Верхневолжья имеет сравнительно равнинный ландшафт, с множеством мелких рек, ручьев, озер и болот. Исток Волги расположен на высоте 323 м над уровнем моря в северо-западной части выбранного верхневолжского бассейна. Протяженность Волги от истока до Селишской плотины около 112 км представлена цепью озер: Стерж (18 квадратных километров), Вселуг (30 квадратных километров), Пено (17 квадратных километров), Верхнее и Нижнее Волго (61 квадратный километр). Общая площадь этих озер около 126 квадратных километров. Селишская плотина – выход из территории верхневолжского водосбора.

Экспериментальная тестовая площадка для измерения вертикальных энергетических и водных потоков была выбрана и установлена вблизи небольшого города Пено около 2 км к северо-западу от берега озера Волго. Лес на участке – смешанный, состоит, в основном, из осины и норвежской ели, создающих верхний ярус, с примесью березы, в основном молодых видов горного ясеня, ольхи и редких старых сосен. Приземный растительный покров очень богат видами травянистых растений. Лесная почва – коричневая супесчаная (глубиной около 60 см) в сухих частях участка (где грунтовые воды находятся на глубине около 1-1,5 м) и

темно-коричневая глинистая глубиной около 40 см во влажных местах (где вода находится на глубине 0-0,5 м). Глинистый слой в подпочве типичен для почв данной территории.

Полевые измерения на выбранных экспериментальных участках включали:

- Метеорологические измерения воздушных и почвенных температур, влажности воздуха, скорости и направления ветра, чистой радиации, поступающей и отраженной солнечной радиации, количества влажности.
- Измерения лесной транспирации с использованием технологии «течения сока».
- Изучения запаса древесины.

Показатели течения сока постоянно измерялись на 20 пробных деревьях, основных видов как верхнего, так и нижнего яруса за сезоны роста. Течение сока было измерено методом теплового баланса участка ствола (ТБС) на некоторых пробных деревьях и параллельно методом тепловой деформации области (ТДО) на всех пробных деревьях. На каждом пробном дереве использовались два сенсора, установленные на противоположенных концах стебля. Радиальное изображение течения сока было измерено специальными ТДО сенсорами перед установкой стандартных сенсоров для долгосрочных наблюдений и проверены возможные изменения в конце сезона роста, таким образом, модель течения сока могла характеризоваться 24 точками на каждом пробном дереве. Наблюдения начались ранним летом (в позднюю фазу бурного роста листьев широколиственных видов) и велись по октябрь (до листопада).

Параметры запасов древесины (количество деревьев, диаметр основной зоны) для всех деревьев, оцененные в эксперименте использовались для получения высокоточных данных по транспирации от пробных деревьев до всего древостоя. Транспирация для всех классов диаметра деревьев была подсчитана и эти значения были умножены на количество деревьев в классах и суммированы для всей единицы площади насаждений. Дополнительные биометрические измерения были выполнены на корневой системе деревьев, чтобы охарактеризовать межвидовую разницу в их архитектуре и абсорбирующей способности на местности. Корневая система деревьев была исследована методом раскопок. Также измерялись диаметр корневой системы на различных глубинах и корневая структура.

Для анализа долгосрочных климатологических данных на территории истока Волги за прошлый век использовались ежедневные метеорологические данные по температуре и осадкам с метеорологических станций, расположенных вокруг Валдайской Возвышенности. Метеорологическая сеть в этой части России не очень густая. Поэтому при анализе временного ряда были использованы данные со всех метеостанций в радиусе 200 км от территории Верхневолжья. Метеорологическая станция Великие Луки имеет наиболее продолжительные записи метеорологических параметров на этой территории (с 1881) и расположена она недалеко от территории Верхневолжья. Записи метеорологических данных на местных метеостанциях (Осташков, Заповедник, Валдай, Торопец) не превышают 50-летний период. Для проверки долгосрочных трендов использовались также долгосрочные метеорологические данные с более удаленных метеорологических станций (Бологое, Вышний Волочек, Новгород, Тотма, Смоленск).

При анализе временных рядов долгосрочных записей воздушных температур и осадков наибольшее внимание уделялось:

- средним, максимальным и минимальным ежемесячным и ежедневным температурам;
- максимальной амплитуде средних ежедневных температур;
- амплитуде усредненной ежедневной температуры за месяц;
- количеству ежемесячных осадков;
- числу и частоте дней за месяц без осадков и с осадками в определенных количественных интервалах (до 2 мм, до 5 мм, до 10 мм и более).

Взаимодействие системы земляная поверхность-атмосфера описывалось некоторыми модельными подходами различной сложности. Пространственное и временное разнообразие энергетических и водных потоков рассматривались с использованием модели ПРАП-Регио. Гидрологическая модель ВСЕВАГ (Влажность Сток-ЕВАпотранспирация Гидрологические единицы реакции) была использована для предсказания и количественного определения возможных изменений водного режима в региональных и локальных масштабах под воздействием землепользовательских и климатических изменений.

Поскольку вводимая информация ВСЕВАГ требует цифровые карты земной поверхности с высоким разрешением (рельеф, землепользование, растительность, почвы) и субповерхностные характеристики, для гидрологического моделирования Верхневолжского водосбора все необходимые цифровые карты были подготовлены с сеткой разрешения 500x500. 13650 элементов сетки были объединены в 640 единиц гидрологической реакции с общей поверхностью в 23 квадратных километра.

Площадь самой маленькой единицы 0,25 квадратного километра (1 элемент сетки) и самой большой – 89,5 квадратных километров (358 элементов сетки). ВСЕВАГ был проверен и подтвержден 18-летними записями стока измеренными на двух маленьких водосборах (Усадьевский (0,36 квадратного километра) и Таежный (0,45 квадратного километра)) Валдайским Отделением Государственно-Гидрологического Института (ВОГИ) на Валдае. Усадьевский (в основном покрытый травой) и Таежный (в основном покрытый лесами) имеют самые длительные записи стока в пределах территории Валдайской Возвышенности. Они расположены в 50 км от северной границы Верхневолжского водосбора.

Климат территории Верхневолжья – умеренно континентальный с холодными зимами (ежедневные температуры от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $-20^{\circ}\text{C}$ ) и умеренным летом (ежедневные температуры колеблются от  $15^{\circ}\text{C}$  до  $25^{\circ}\text{C}$ ). Среднегодовая температура около  $5,8^{\circ}\text{C}$ . Среднее ежегодное количество осадков – около 620 мм. Снег выпадает с октября по март. Зимние дожди приносят от 10 до 50 мм осадков в месяц, в то время как летние дожди приносят от 50 до 200 мм осадков в месяц. Максимальные дожди наиболее часто выпадают в июне-июле.

Анализ прошлых метеорологических данных (с 1981) с метеорологической станции в Великих Луках, Осташков, Торопец, Заповедник показывают, что среднегодовая температура увеличилась на  $1,2^{\circ}\text{C}$  и среднее количество осадков увеличилось на 140 мм, в то же время за последние 20 лет выявлено не было. Изменения температуры воздуха и осадков были более значительны зимой и весной и очень небольшими летом и осенью. Пространственное распределение температуры и осадков практически равномерно. Тренд частотности дней с проливными

осадками (дней с осадками более 5 мм и более 10 мм) показывает форму, похожую на тренд общих осадков. В то же время, никаких значительных изменений частотности дней с осадками (без осадков) за вышеуказанный период не обнаружено. Подобные результаты для долгосрочного изменения климатических условий также были обнаружены и на других метеорологических станциях, расположенных вокруг территории Валдайской возвышенности (Бологое, Вышний Волочок, Новгород, Валдай). Постепенное увеличение средней температуры воздуха сопровождалось уменьшением ее зимней ежедневной амплитуды. Изменения максимальных температур были в то же время сравнительно малы. По-видимому, повышение температуры воздуха отражает процесс всемирного потепления сопровождаемого интенсификацией деятельности круговорота в Восточной Европе зимой и весной.

Частые циклоны с запада и юго-запада приносят теплые и влажные воздушные массы с Северной Атлантики и Средиземноморья и теплые воздушные массы с Ближнего Востока, которые вызывают интенсивные снегопады и таяние снега зимой.

Изменения картины землепользования в прошлом веке были вызваны, главным образом, антропогенными факторами. Сто лет назад территория истока Волги была сравнительно густо населенным участком со сравнительно интенсивным землепользованием. Лес, главным образом использовался для отопления и строительства домов. Лес в 1850 г. покрывал около 50-55% территории истока Волги. Постепенная миграция сельских жителей в урбанизированные регионы в середине прошлого века привела к медленному восстановлению лесных массивов. Данные таксации лесов показали, что в 1970 году леса восстановили 71% площади территории. Эти вновь залесенные территории были, в основном, представлены смешанными хвойными и широколиственными видами деревьев.

Изменения землепользования и состава лесов за последние 20-30 лет, в основном, вызваны климатическими факторами. Несмотря на несколько летних засух в последнее время, местные лесные пожары и ветровалы, лесопокрытая, территория по полученным недавно данным существенно не изменилась. Хвойные и смешанные хвойно-широколиственные леса покрывают в настоящее время около 72% территории водосбора. С 1970 года площади хвойных лесов (сосна, ель) уменьшились с 8,4 до 7% и площади смешанных лесов увеличились с 52 до 59% общей территории. В настоящее время природные одновидовые хвойные леса можно встретить в Центральном-Лесном Биосферном Заповеднике (еловые леса) и на территориях неподалеку от Верхневолжских озер (еловые и сосновые леса).

График дневного поглощения воды и транспирации отвечает большой продолжительности летних дней на экспериментальном участке, расположенном на переходе между умеренными и бореальными широтами. График поглощения воды индивидуальных экземпляров деревьев отражает различную затененность крон деревьев соседними и различные картины корневого распределения. Высочайшие дневные амплитуды поглощения воды были получены для условий не лимитированного почвенного увлажнения, в то время как низкие амплитуды были типичны для сухих условий. Общая дневная транспирация индивидуальных деревьев четко связана с их размером, представленным диаметром и высотой. Это справедливо как для хвойных, так и для широколиственных видов. Однако транспирация широколиственных видов была немного выше в летние месяцы. Ни какой существенной разницы между транспирацией осины и других лиственных видов в этом отноше-

нии. Хотя небольшое количество экземпляров деревьев менее распространенных видов не позволяет делать уверенных выводов. Однако, более существенная разница выявлена у деревьев с разными размерами крон и разными позициями по отношению к другим видам. Особенно деревья оказавшиеся в местах, где лес открыт ветровалам, испаряют значительно больше, чем деревья такого же размера растущие на участках затененных соседними деревьями.

Сравнения ежедневных и ежечасных показателей транспирации моделировались и измерялись с использованием технологии течения сока на экспериментальном лесном участке и показали удовлетворительную корреляцию моделированных и измеренных потоков. Максимальная разница была обнаружена весной, когда распускались листья на лиственных деревьях, и осенью в период листопада.

Результаты моделирования показали, что уменьшение пространственного разрешения сетки модели от 500x500 м до 10x10 км могут вызвать сложную разницу показателя часовой и дневной эвапотранспирации (до 24%) и небольшую разницу (до 5 %) для показателей дневной и сезонной эвапотранспирации. Знак этих изменений в основном не зависит от атмосферных и почвенных условий и от гетерогенности рельефа и растительных особенностей на территории. Более значительная разница была обнаружена для изменений локальной эвапотранспирации и транспирации для сглаживания неровностей рельефа и особенностей растительного покрова (до 30% для дневной эвапотранспирации). Чувствительность региональной эвапотранспирации к разрешению ячеек сетки постепенно уменьшилась за счет увеличения площади предполагаемого водосбора (субводосбора) и зависит от рельефа (наклона и экспозиции), особенностей землепользования и растительного покрова. Влияние горизонтальных потоков между соседними элементами сетки на локальные и вертикальные атмосферные потоки в основном зависит от местной земной поверхности и местных погодных условий. Смоделированное максимальное влияние горизонтальных водных потоков на вертикальные ежечасные уловимые и латентные тепловые потоки было обнаружено при контрастных погодных условиях и не превысило 20% (в модели использовалось разрешение сетки 500x500 м).

Сравнение смоделированных графиков эвапотранспирации за период для всех прилагаемых наборов метеорологических данных показывает очень хорошее совпадение. Общее ежегодная эвапотранспирация была значительно меньше, чем количество осадков (до 50-60 % общего количества осадков). В то же время предсказанная летняя эвапотранспирация всегда дополнялась наблюдаемыми летними осадками.

Смоделированная ежегодная динамика условий почвенного увлажнения в основном испытывала влияние годового разнообразия осадков. Максимальная почвенная влажность наблюдалась в период таяния весной, и минимальная почвенная влажность наблюдалась во второй половине лета (июль - август). Небольшое количество осадков в период между июлем и октябрём уменьшает поступление почвенной влаги осенью и может привести к недостатку грунтовых вод зимой. Поступление почвенной влаги, которая может одновременно наблюдаться по образованию стока во время оттепелей зимой, не бралось в расчет в предложенных алгоритмах модели.

Ожидаемые будущие климатические изменения могут значительно влиять на гидрометеорологические условия на территории Верхневолжья. Оценка по модели

МОЦ согласно сценарию двукратного увеличения углекислоты выражается в увеличении годовой температуры воздуха на 3°C и увеличению осадков на 11%. Максимальное увеличение осадков может ожидать весной (на 45%). Летом модель предсказывает уменьшение осадков на 14%. Предсказанные изменения среднемесячной температуры воздуха позитивны и равномерны распределены на протяжении года. Предсказанные изменения глобальной солнечной радиации малы. Весной они негативны (около 10% - 20%) и осенью позитивны (около 4% - 8%). Следует ожидать, что вследствие гетерогенности территорий Верхневолжья, пространственное распределение воздушных температур и особенно глобальная радиация и количество осадков могут отличаться от предсказанных средних значений. Такое разнообразие не учитывалось в представленном исследовании.

Имитация модели ожидаемого будущего гидрологического режима показывает, что климатические изменения могут вызвать значительные изменения водного бюджета Верхневолжского региона. Все модельные оценки показывают возможные изменения начала сезона таяния от апреля к марту и конца от мая к апрелю. Более высокие температуры воздуха повлекут уменьшение аккумуляции снежного покрова зимой и уменьшению мощности весеннего половодья и поступление грунтовых вод не смотря на увеличение осадков. Вклад таяния снега в общий годовой сток – 30% - 40%. Более короткий период снежного покрова ведет к значительному изменению радиации и энергетического баланса на границе атмосфера – растительный покров выражается в увеличении показателя эвапотранспирации ранней весной и поздней осенью. Раннее начало вегетационного периода выражается в более интенсивной транспирации весной, которая также с уменьшением осадков и увеличением глобальной радиации может привести к дефициту доступной почвенной влаги летом. Как уже было показано, такие процессы должны быть очень критическими для стабильности елового лесного сообщества.

Увеличение количества осенних осадков после сравнительно сухого лета приводит к быстрому восстановлению условий почвенной влаги при увеличившемся поверхностном стоке, пополнению грунтовых вод и действительной эвапотранспирации (в основном к увеличению испарения перехваченной дождевой воды).

Описанные оценки модели для ожидаемого будущего гидрологического режима были выведены для разных сценариев изменения растительного покрова и землепользования. Это очевидно, что современное потепление климата приведет к постепенному вытеснению хвойных видов лиственными в Верхневолжском регионе и к изменению южной границе бореальных лесных сообществ на севере. Однако такие структурные изменения обычно имеют долгосрочную тенденцию (100 лет), в то время как описанные климатические сценарии можно ожидать уже через 40 – 60 лет. Ожидаемые будущие изменения растительного покрова в Верхневолжском регионе могут быть, в основном, связаны с влиянием климатического и антропогенного факторов. Однако, как уже было сказано, территория Верхневолжья характеризуется очень низким уровнем антропогенного воздействия и загрязнения воздуха. Таким образом, прямое влияние любых антропогенных факторов можно не учитывать. Следовательно, главные факторы, которые нужно учитывать, чтобы описывать возможные будущие изменения землепользования: природное обезлесение, восстановление лесных массивов на старых сельскохозяйственных и селитебных территориях и изменения состава лесных пород в ответ на климатические изменения.

Для описания возможных изменений растительного покрова на этой территории были применены несколько методов. Современный рост деревьев был описан по результатам инвентаризации лесов. Долгосрочные сукцессии разных лесных типов были смоделированы с использованием модели динамики лесов ЛЕСДИНЗ. Эти результаты моделирования были в дальнейшем использованы для выведения возможных долгосрочных сценариев будущих лесных изменений. Что бы описать будущие изменения землепользования при первом предположении использовался метод простой стокации. Он базируется на данных действительного недавнего пространственного распределения разнообразных типов землепользования в пределах верхневолжского водосбора. Метод состоит в поочередном анализе землепользовательской сетки фильтрующей матрицы (например, 5x5 точек сетки), которая последовательно изменяется по всей области сетки. Установленная абсолютная чистота различных типов землепользования в пределах матрицы вырабатывает сценарий для ячеек расположенных в центре матрицы. Выработанный сценарий восстановления лесных массивов предполагающий 13% увеличение общей площади лесов предсказывает легкое увеличение эвапотранспирации (на 3-4%) и уменьшение поверхностного стока (на 2-3%) и пополнение запасов грунтовых вод (на 1-2%). Подобные эффекты могут обеспечиваться изменением состава лесов (увеличением доли широколистных видов и уменьшением доли хвойных деревьев) согласно ожидаемому глобальному потеплению. Результаты моделирования показали, что более высокая транспирационная способность и стойкость широколиственных деревьев к летним засухам могут вызвать увеличение показателей транспирации и эвапотранспирации (несмотря на уменьшение летнего перехвата) и уменьшение пополнения грунтовых вод. Такой эффект может ярко проявляться при сухих погодных условиях. Сценарий обезлесения, предполагающий 5% уменьшение общей площади лесов (примерно 10% уменьшение хвойных и примерно 3% уменьшение смешанных и лиственных лесов) предсказывает небольшое увеличение общего поверхностного стока (1-2%) и уменьшение общей эвапотранспирации (до 2%). Никаких значительных изменений в пополнении запаса грунтовых вод не обнаружено.

### Заключение

Возможные будущие изменения водного бюджета на территории Верхневолжского водосбора были выведены с использованием анализа прошлой и современной динамики атмосферных, водных и лесных условий, различных климатических сценариев и развитых и подтвержденных полевых измерений.

Анализ прошлых климатических условий показал, что за последние 50-60 лет среднегодовая температура увеличилась на 1,2°C, а годовая влажность – на 140 мм. Максимальное увеличение средней годовой температуры (около 3°C) и влажности (около 90 мм) было обнаружено зимой. В то же время летние изменения воздушной температуры и осадков были очень небольшими. Долгосрочные графики годового стока (записанные на Селишской плотине) и осадков (соседних метеорологических станций) показывали сходные графики их внутригодового разнообразия. Однако, несмотря на увеличение осадков, никаких явных тенденций годового стока за последние 20 лет не выявлено. В то же время поверхностный сток зимой за последние 20 лет увеличился примерно на 10 мм, и летний сток уменьшился примерно на 5 мм.

Результаты полевых измерений на выбранном лесном участке около озера Пено показали очень высокую чувствительность энергетических и водных потоков к атмосферным условиям. Транспирация широколиственных деревьев была примерно на 10-20% больше транспирации ели. Максимальная разница была обнаружена в период с очень сухой погодой в июле – августе. Более высокая чувствительность к недостатку почвенной влаги могла быть хорошо объяснена поверхностной корневой системой елей в сравнение с корневой системой лиственных деревьев (например, осины, березы). Дефицит почвенной влаги может повлечь не только более низкие показатели транспирации и ассимиляции ели, но и также уменьшение их закрепляющей способности. Анализ последних аэрофотоизображений показал существование очень сильных ветровалов на лесных территориях недавно покрытых еловыми лесами (особенно в болотистой южной части территории Верхневолжского водосбора). Таким образом, ель на верхневолжской территории оказывается менее стойкой и менее адаптированной к почвенным засухам. Все эти процессы также как и лесные пожары и нашествия вредителей усложняют процедуру предсказания изменений растительности и гидрологического режима на этой территории. В соответствии с определением Холдриджа жизненная зона бореальных лесов заключена в изотермы средне годовых температур между 3°C и 6°C. Анализ современных тенденций температуры воздуха показывает, что средне годовая температура в настоящее время близка к критическому уровню 6°C. Таким образом, можно ожидать будущего увеличения температуры воздуха и уменьшение летних осадков может значительно увеличить риск деградации сообществ хвойных лесов на территории Верхневолжья. Проведенные модельные эксперименты показали, что ожидаемые климатические изменения могут значительно повлиять на водный режим Верхневолжского региона. Поверхностный сток весной может быть выше, чем в наши дни, но летом и ранней осенью сток будет слабо уменьшаться за счет транспирации широколиственных видов деревьев. Уменьшившиеся летние осадки могут повлечь уменьшение поверхностного стока и истощение запасов почвенной влаги. Таким образом, можно ожидать, что уровень воды в Волге и верхневолжских озерах будет ниже нынешнего.

#### Литература

1. Асмус В.В., Григорьева О.И., Тищенко А.П. Субоптимальное решающее правило с динамическим критерием выбора признаков. Исследования Земли из космоса, 1980, №2, с.76-83.
2. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. М.: Наука. 1986.
3. Голубев Г.Н. Геоэкология. - М.: Аспект-пресс, 2006.
4. Космическое земледелие: информационно-математические основы / Под ред. акад. В.А. Садовниченко. - М.: Изд-во МГУ, 1998.
5. Кудинов А.Н., Тищенко А.П., Жилиба А.И. Фазовый портрет динамики подземного стока с Ядра Главного водораздела Русской равнины // «Физические проблемы экологии». - М.: Физич.ф-т МГУ, 1999.
6. Кудинов А.Н., Тищенко А.П., Создание ГИС для геофизического полигона «Главный водораздел Русской равнины»// «Физические проблемы экологии». - М.: Физич.ф-т МГУ, 1997.

7. Пирогов Ю.А., Тищенко А.П., Лебедева Н.Н., Козлова О.В., Козлов Б.В. Выделение границ Ядра Главного водораздела Русской равнины // «Моделирование сложных систем». Вып. 1.- Тверь: Изд-во ТвГУ, 1999.
8. Тищенко А.П. Создание ГИС для геофизического полигона «Главный водораздел Русской равнины» // «Физические проблемы экологии». - М.: Физич.ф-т МГУ, 1997.

### СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

А.А. Потапов

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

Для электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) характерна высокая пространственная неоднородность в условиях селитебных территорий и помещений. Экспериментальные исследования показывают, что в условиях плотной городской застройки перепад напряженности электромагнитного поля составляет порядка 5 – 7 дБ на расстояниях 30–100 м, а в некоторых случаях (переход от освещенного участка к зоне радиотени) до 15 – 25 дБ и более. В масштабах микрорайона (на расстояниях 1 – 2 км) изменение уровня поля может составлять 30 – 40 дБ. Внутри помещений при проникновении электромагнитного излучения сквозь оконные проемы перепады интенсивности радиосигнала в пределах помещения доходит до 15-20 дБ, при этом размер пространственных неоднородностей ЭМП с колебаниями поля менее 5 дБ составляет от 0,8 – 1,5 м до 3 – 5 м [1].

Наиболее распространенными средствами объективного контроля уровней ЭМП РЧ являются специализированные, портативные приборы, характеризующиеся широкой полосой пропускания (от 4 до 40 ГГц и более для частот выше 300 МГц), фиксацией среднеквадратических значений вектора электрического поля (у специализированных антенн – магнитного), близкой к изотропной диаграммой направленности приемной антенны и нижним порогом чувствительности порядка 1/2 от величины ( $\approx 1$  В/м) действующих в РФ санитарных норм на уровне ЭМП РЧ.

Изотропность приема рассматриваемых приборов достигается за счет использования в качестве детекторов трех дипольных антенн, установленных во взаимно ортогональных направлениях, фиксация среднеквадратических значений напряженности электрического поля обеспечивается за счет подключения к антенным элементам диодов с квадратичной вольтамперной характеристикой. К наиболее известным экологическим измерителям ЭМП РЧ можно отнести приборы ПЗ-33, ПЗ-33М и ПЗ-40 отечественного производства и EMR-300, NBM-550, PMM 8053A и TES-92 зарубежного [2].

При использовании такой аппаратуры пользователь получает информацию о суммарной напряженности ЭМП РЧ (в В/м) или плотности потока энергии (в

мкВт/см<sup>2</sup>) в широкой полосе частот (например, 0,3–4 ГГц; 0,3–18,5 ГГц; 0,1–60 ГГц и т.д. в зависимости от марки прибора), т.е. производится экологический мониторинг ЭМП РЧ посредством **частотно-неселективных** измерений. К достоинствам последних можно отнести:

- Возможность интегральной оценки уровня поля в пределах рабочего диапазона частот при отсутствии или существенном недостатке информации о характеристиках (расположении, частоте, модуляции, мощности, диаграмме направленности и т.п.) потенциально-опасных радиотехнических устройств и установок;
- Возможность вывода результатов для частотных диапазонов и непосредственно в единицах измерения, установленных санитарными нормами, что позволяет производить прямое сравнение значений ПДУ и результатов измерений без дополнительных расчетов;

К недостаткам традиционных экологических измерителей ЭМП РЧ следует отнести:

- Высокий нижний порог по напряженности поля (плотности потока энергии) не позволяет получать непрерывные при перемещении антенны пространственной структуры электромагнитных полей и оценивать их реальную интенсивность и изменчивость, т.е. составляет она 0,5 или 0,05 ПДУ;
- Очень широкая полоса пропускания измерительных антенн (особенно для диапазона выше 300 МГц) не позволяет производить идентификацию источника электромагнитного загрязнения (телевещание, сотовая связь, Wi-Fi и т.п.), а также выявлять индивидуальный вклад каждого источника ЭМП РЧ.

Очевидно, что на современном этапе быстрое развитие радиотехнической инфраструктуры обитаемых территорий требует преодоления указанных недостатков в традиционной методологии экологического мониторинга ЭМП РЧ в связи с чем активное развитие получают методы частотно-селективных измерений. Одним из первых шагов на этом пути стало внедрение в практику экологического мониторинга ЭМП РЧ средств **диапазонно-селективного** контроля, например, измерителя EME SPY 121 [3].

По принципам проведения измерений данный прибор в целом аналогичен ранее рассмотренному оборудованию, но в отличие от последнего, наличие в его составе полосовых фильтров позволяет проводить измерения в 12 диапазонах частот характерных для того или иного типа радиосредств (FM, GSM 900 и 1800, DECT, UMTS, Wi-Fi и др.), в том числе раздельно в полосах работы базовых станций сотовой связи (downlink range) и абонентских терминалов (мобильных телефонов) – uplink range, что обеспечивает раздельную оценку облучения человека от внешних источников и его собственных радиосредств, сигнал от которых гораздо сильнее из-за близости к приемной антенне.

Швейцарским [4] и французским [5] исследователям, использовавшим в своих исследованиях прибор EME SPY 121 в качестве носимого персонального датчика-регистратора уровней ЭМП РЧ в ходе рутинной жизнедеятельности добровольцев из местного населения (от 166 в первом и до 377 человек во втором случае соответственно), удалось провести достаточно объективную оценку спектральной структуры фоновое электромагнитного загрязнения.

По данным [4] в среднем по всем экспериментальным данным основной вклад в облучение человека вносили (в % от средней суммарной плотности потока энергии):

сотовая связь downlink – 32 %, сотовая связь uplink – 29,1 %, бытовые/офисные телефоны стандарта DECT – 22,7 %, остальные источники – 16,1 %. Аналогичные величины по материалам французских специалистов [5] составили: сотовая связь downlink – 23 %, сотовая связь uplink – 19 %, бытовые/офисные телефоны стандарта DECT – 16 %, остальные источники – 42 %.

Как следует из представленных данных, ведущую роль в облучении человека играют ЭМП РЧ систем сотовой связи (в первую очередь стандарта GSM). Но если вклад в общую электромагнитную нагрузку мобильных устройств, в конечном итоге, зависит от самого человека (времени разговора, модели телефона и т.д.), то уровни излучения стационарных базовых станций подлежат существенно более строгому анализу и контролю на селитебных территориях, в жилищах, детских, медицинских и образовательных учреждениях. Именно применительно к этим задачам диапазонно-селективный подход обнаруживает ряд ограничений: 1) при компактном расположении нескольких базовых станций одного частотного диапазона, но принадлежащих разным операторам связи невозможно определить чье оборудование вносит больший вклад в структуру загрязнения; 2) несмотря на достаточно низкий нижний порог чувствительности у EME SPY 121 (0,05 В/м) на протяжении значительной части времени (до 53 % в [5]) уровень внешнего ЭМП РЧ был ниже его, что привело исследователей к необходимости статистическим образом определять вклад неотдетектированных значений в средние величины, опираясь на параметры распределения зафиксированных величин.

Ликвидация указанных ограничений возможна посредством перехода от диапазонно-селективных к частотно-селективным измерениям уровней ЭМП РЧ с использованием современных радиотехнических средств измерения в задачах экологического мониторинга. Этот класс технических средств имеет нижний порог чувствительности порядка десятков микровольт на метр и менее и в режиме измерения напряжений сигнала обеспечивает корректную фиксацию среднеквадратических значений. Но одновременно с ликвидацией ограничений по чувствительности и частотной селективности возникает проблема адекватной методологии проведения измерений, учитывающей специфику частотного плана территории, используемых стандартов связи и требования действующих санитарных норм.

При проведении частотно-селективных измерений в распоряжении исследователя находятся три группы технических средств: 1) анализатор спектра; 2) приемная, часто калиброванная, антенна(ы); 3) вспомогательное оборудование (фидеры, ЭВМ и т.п.). Ключевым фактором проведения корректных измерений является методология использования анализаторов спектра, позволяющая осуществлять корректную оценку суммарного уровня поля (или амплитуды радиосигнала) в ключевых диапазонах частот, определяемая следующими параметрами [6]: частотными границами полосы обзора ( $f_{start}$  и  $f_{stop}$ ) анализатора спектра; полосой разрешения по частоте (Resolution Bandwidth – RBW); числом точек перестройки по частоте (N), детектором (Detector) значений спектра; типом фильтра полосы разрешения (Filter Type), режимом фиксации значений спектра (Trace Mode) и количеством/временем прохода по диапазону (Sweep Count/ Sweep Time).

По данным литературных источников в настоящее время еще не сформировалось общепринятое представление об адекватной экологическим требованиям методологии измерений [7]. Например, в [8] авторами указывается, что в этом вопросе важным является правильный выбор детектора (предлагается среднеквадратиче-

ский – RMS детектор), длительность Sweep Time > 0,1 секунды и использование канального фильтра (Channel Filter) полосы разрешения (особенно, для широкополосных сигналов (UMTS, Wi-Fi)). По абсолютной величине RBW предлагается устанавливать равным 5 МГц для широкополосных сигналов [7] и 100–200 кГц для узкополосных и шумоподобных сигналов [8].

В качестве режима фиксации значений спектра предлагается Max Hold [9] (максимальные значения) для т.н. метода сканирования (Sweeping Method) при котором измерительная антенна перемещается по искомому помещению для оценки максимума поля (в целом по помещению или в его отдельных частях), однако для нестационарных сигналов он признается дающим завышенные оценки [8].

В [9] указывается, что настройки спектроанализатора должны соответствовать типу (стандарту) измеряемого радиосигнала; при проведении измерений авторы использовали RBW = 100 кГц для диапазонов с известными источниками загрязнения (GSM и др.) и 1 МГц для диапазонов частот с априори неизвестными источниками сигналов.

Для длительных (12 дней), автоматизированных измерений сигнала от базовой станции стандарта GSM 900 по данным [10] использовалась RBW 100 кГц и режим Max Hold в течение 20 проходов (sweeps) по диапазону после чего результаты записывались в память ЭВМ.

Наиболее подробно методология частотно-селективных измерений получила развитие в новом европейском стандарте EN 50492:2008 [11], посвященном in-situ измерениям ЭМП РЧ от различных источников, включая базовые станции сотовой связи и беспроводной передачи данных. В качестве одного из вариантов проведения измерений стандарт предусматривает ранее упомянутый метод сканирования для которого предлагаются следующие параметры: RMS детектор, режим Max Hold и скорость сканирования не менее 10 проходов в секунду; также отмечается что метод эффективен только для относительно узких диапазонов частот.

При измерениях в вещательных диапазонах стандартом рекомендуется использование RMS детектора (для аналогового ТВ вещания пикового), а RBW в зависимости от типа сервиса в том числе: 100 кГц (DECT), 150 кГц (FM), 300 кГц (аналоговое ТВ, GSM), 7,61 и 7,66 МГц (DVB-T). Для получения значения интегральной мощности ( $P$ , мВт) по широкому диапазону частот, в том числе с сигналами неизвестных типов предлагается (1) [11]:

$$P = \alpha \cdot \frac{f_{\text{stop}} - f_{\text{start}}}{N - 1} \cdot \frac{1}{\text{RBW}} \sum p_i \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий характеристики фильтра полосы разрешения;  $p_i$  – значение мощности на  $i$ -ой частоте зафиксированного спектра; остальные обозначения приведены в тексте ранее. При этом в качестве фильтра полосы разрешения рекомендуется использовать фильтр с резкими границами (sharp RBW filter).

Для оценки интегральной напряженности поля ( $E_{\text{full}}$ , В/м) в пределах полосы частот GSM сигнала для которого характерно изменение интенсивности в зависимости от количества абонентов, использующих свои средства связи, предлагается следующие соотношение (2):

$$E_{\text{full}} = \sqrt{n} E_{\text{BCCN}}, \quad (2)$$

где  $n$  – число максимально возможное число задействованных несущих (данной

базовой станции);  $E_{\text{BCCN}}$  – напряженность электрического поля вещательного контрольного канала базовой станции сотовой связи (Broadcast control Channel), В/м. Аналогичный подход предложен и для сетей UMTS.

Обобщая представленную в литературных источниках информацию можно сделать вывод, что в большинстве случаев предлагаемые методологические подходы не учитывают специфику представления данных о спектре в спектроанализаторе, так как т.н. детектор определяет лишь способ отображения спектра на экране, кроме того в имеющихся источниках не рассматривается вопрос об алгоритме оптимального выбора числа точек перестройки частоты и ширины RBW в общем случае. Также важным критерием реализуемости на практике опубликованных методов измерений является априорная и подробная информация об экологических значимых радиотехнических объектах, функционирующих в районе работ – знание частот BCCN каналов, количество и распределение несущих частот по операторам и т.д., которая на практике часто бывает недоступна исследователям.

В связи с этим была разработана методология широкополосных измерений ЭМП РЧ для использования в экологическом мониторинге ЭМП РЧ в широкой полосе частот (до 100–200 МГц и более) и обеспечивающая идентификацию источников загрязнения и сопоставление уровней загрязнения в различных частотных диапазонах [2]. Характерным отличием предлагаемой методологии является ее применимость для участков спектра с неизвестным (или частично известным) составом радиосигналов и нерегулярным характером распределения несущих по диапазону.

При разработке методологии было принято, что основной задачей экологически ориентированных радиотехнических измерений является оценка суммарной величины поля в искомом диапазоне частот без пропусков и перехлеста элементарных измерений внутри него. Для этого участок спектра разбивается на ряд узких полос. Радиосигналы в каждой из них рассматриваются как сигналы от отдельных источников ЭМП, амплитуды которых при последующей обработке спектра суммируются в соответствии с требованиями санитарных норм [12]. Это предопределяет следующие базовые принципы использования анализаторов спектра в задачах экологического мониторинга:

1. В ходе измерений должен быть проанализирован весь исследуемый частотный диапазон. Это достигается за счет установки соответствующих границ ( $f_{\text{start}}$  и  $f_{\text{stop}}$ ) и полосы обзора анализатора спектра (Frequency Span – FS)
2. Полоса разрешения по частоте (Resolution Bandwidth – RBW) должна быть установлена равной  $\text{RBW} = \text{FS}/(N-1)$ , где  $N$  – число точек перестройки в диапазоне частот FS (Sweep Points, обыкновенно в меню SWEEP). Детектор (Detector) должен быть настроен на фиксацию максимальных пиковых значений (Detector Max Peak). Видеофильтр (VBW) целесообразно перевести в режим автоматического выбора полосы (Video BW Auto).
3. В качестве фильтра полосы разрешения (Filter Type, обыкновенно в меню BW) должен быть установлен канальный (с близкой к прямоугольной АЧХ) фильтр (Channel Filter)
4. Режим фиксации значений спектра (Trace Mode) должен быть настроен на фиксацию максимальных значений (Max Hold). Продолжительность измерения определяется произведением количества проходов по диапазону (Sweep Count) на длительность единичного прохода (Sweep Time) и должна обеспе-

чивать стабилизацию индицируемых на экране значений. По окончании измерения полученные результаты (спектры) должны быть в текстовом виде записаны в память прибора для дальнейшей обработки на ЭВМ.

В современных анализаторах спектра при экспорте данных измерений в текстовой файл спектр в пределах FS представляется набором точек перестройки количеством  $N$ . Для анализаторов компании Rohde&Schwarz  $N$  может изменяться от 101 до 8001 и более точек в зависимости от модели, что позволяет пользователю в широких пределах изменять RBW и, как следствие, чувствительность анализатора. Очевидно, при уменьшении RBW будет увеличиваться время прохода по диапазону. Если отношение  $FS/RBW > N$ , то  $RBW \cdot N < FS$ , т.е. не весь диапазон будет покрыт отрезками шириной RBW и часть информации о спектре в текстовом файле будет отсутствовать, что не подходит для оценки интегральной мощности в диапазоне. При  $FS/RBW < N$  в соседних точках перестройки частоты полосы фильтра разрешения будут перекрываться, что также приведет к некорректному определению интегральной мощности в диапазоне (или его поддиапазонах).

Таким образом, для однозначного определения уровня радиосигнала в каждой конкретной спектральной полосе без влияния соседних полос является измерение с  $RBW = FS/(N-1)$  с использованием прямоугольных окон фильтрации, которые, в отличие от обычно применяемых Гауссовых фильтров, не пересекаются и стыкуются без промежутков в частотной области.

Установка детектора (Detector) сказывается только на отображении сигнала на экране прибора и является специфичной для приборов с жидкокристаллическими дисплеями, которые в отличие от аналоговых, имеют ограниченное разрешение отображения. Если отношение  $FS/RBW$  превышает число пикселей на экране, то на каждую точку (пиксель) приходится несколько измерений. То, как эти измерения будут обрабатываться для отображения на экране (отображение максимально, минимального, среднего и др. значений) устанавливается типом детектора точки спектра (Detector) [6]. В рамках предлагаемого подхода по однозначному определению уровня радиосигнала одной записи в текстовом файле (при экспорте спектра) соответствует строго одно измерение в полосе шириной RBW, т.е. сохраненный результат измерений по сути становится независимым от настройки детектора (см. (1) где сокращаются два множителя в правой части).

При практической реализации рассматриваемых принципов надо учитывать, что анализаторы спектра предоставляют пользователю возможность использования только фиксированных значений RBW. Поэтому, перед проведением измерений необходимо оценить величину  $FS/(N-1)$  для искомого диапазона и выбрать ближайшее к ней с большей стороны значение из доступных RBW (в противном случае будет невозможно охватить весь диапазон).

Режим фиксации значений спектра Max Hold позволяет проводить оценку наиболее важных с экологической точки зрения величин – максимальных уровней сигнала за период измерения. Установка количества сканирований спектра (Sweep Count) дает возможность задания периода измерения. Для остановки измерения строго после заданного числа проходов, его запуск нужно осуществлять в режиме одного цикла сканирований (Single Sweep для приборов Rohde & Schwarz). Таким образом обеспечивается фиксация общего времени измерения и визуальный контроль его хода. Для нестационарных и импульсных сигналов (например, со скачкообразной перестройкой частоты – Bluetooth) режим Max Hold будет давать заве-

домо завышенные результаты, поэтому в этом и аналогичных случаях рекомендуется использование режима усреднения спектра (Average), время усреднения мощности сигнала установлено гигиеническими нормативами равным 6 минутам [13]. В случае если скорость единичного прохода по спектру больше характерного времени изменения спектра сигнала, наряду с усреднением можно увеличить RBW и уменьшить  $N$ , что уменьшит время единичного сканирования.

После сохранения результатов сканирования участка спектра пользователю становится доступным текстовый ASCII файл, в котором вместе с поясняющей информацией (дата, RBW и т.д.) содержится  $N$  пар значений  $F_i$  и  $V_i$  – частота и зарегистрированный уровень сигнала на этой частоте в полосе RBW соответственно.

На основании этих данных возможен расчет суммарного уровня радиосигнала по диапазону для конкретной используемой антенны. При известной зависимости коэффициента усиления антенны от частоты и введении соответствующей поправки к измерениям в различных частотных диапазонах появляется возможность расчета относительного суммарного уровня (3) радиосигнала ( $V_R$ , В/м) и/или суммарной мощности радиосигнала (4) в искомым диапазоне (диапазонах) ( $P_R$ , Вт) и проведение их сравнительного анализа.

$$V_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n V_i^2} \quad (3)$$

$$P_R = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (4)$$

где  $V_i$  – зарегистрированный уровень сигнала в  $i$ -ой полосе в линейной мере, В;  $P_i$  – мощность радиосигнала в  $i$ -ой полосе в линейной мере, Вт. В случае наличия калиброванной антенны (для которой известен коэффициент преобразования поля в напряжение (Antenna Factor) возможен переход от зарегистрированных уровней радиосигнала в отдельных полосах к напряженности переменного электрического поля и/или плотности потока энергии ЭМП РЧ. Экспериментальная апробация предлагаемого подхода к широкополосным измерениям показала [2]:

1. Предлагаемая методология широкополосных измерений является инвариантной относительно настроек отображения спектра на экране спектроанализатора (детектора), включает в себя процедуры сохранения и постобработки данных измерений;
2. Обеспечивает возможность оценки и документирования интегральных уровней ЭМП РЧ в конкретных спектральных полосах шириной до 100–200 МГц и более, в том числе, для нужд правовой оценки экологической обстановки, без априорной информации о характере заполнения спектра, распределении несущих, частотах ВССН каналов т.п.
3. Позволяет идентифицировать основные источники загрязнения посредством частотной декомпозиции электромагнитного поля (GSM 900, GSM 1800, FM/TV вещание, Wi-Fi и т.д.);
4. Обеспечивает сопоставление уровней загрязнения в различных пространственных точках и частотных диапазонах.

Эффективное решение всех этих задач является ключевым условием, необходимым для реализации мер по обеспечению электромагнитной безопасности и оптимизации экологической обстановки.

## Литература

1. Сухоруков А.П., Бабушкин А.К., Дудов Р.А., Захаров П.Н., Козарь А.В., Королев А.Ф., Потапов А.А., Пухов Е.А., Турчанинов А.В. Распространение радиоволн в обитаемых средах: физические, информационные и экологические аспекты // Радиотехника. – 2009. – № 5. – С. 40 – 49.
2. Потапов А.А., Захаров П.Н. Методология широкополосных измерений в экологическом мониторинге электромагнитных излучений радиочастотного диапазона // Научные технологии. – 2009. – № 8. – С. 59 – 67.
3. EME Spy 121. Data sheet. Satimo, 2008. – 12 p. URL: [http://www.satimo.fr/eng/plugins/p2005\\_download\\_manager/getfile.php?categoryid=170&p2005\\_sectionid=19&p2005\\_fileid=33&p2005\\_versionid=91](http://www.satimo.fr/eng/plugins/p2005_download_manager/getfile.php?categoryid=170&p2005_sectionid=19&p2005_fileid=33&p2005_versionid=91) (дата обращения: 07.10.2009).
4. P. Frei et al. Temporal and spatial variability of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields // Environmental Research. – 2009. – № 6. – P. 779–785.
5. Viel J.-F. et al. Radiofrequency exposure in the French general population: Band, time, location and activity variability // Environment International. – 2009. – № 8. – P. 1150–1154.
6. Раушер К, Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа: Пер. с англ. С.М. Смольского / Под редакцией Ю.А. Гребенко – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 224 с.
7. Neubauer G., Haider H., Lamedschwandner K., Riederer M., Coray R. Measurement methods and legal requirements for exposure assessment next to GSM base stations. Seibersdorf: Austrian Research Centers GmbH. URL: <http://www.seibersdorf-rf.com/docs/pubdl/27F1.pdf> (дата обращения: 07.10.2009).
8. Neubauer G., Lamedschwandner K., S. Cecil, Schmid G. Exposure Assessment Methods for Emerging New Technologies. Seibersdorf: Austrian Research Centers GmbH. URL: <http://ursi-test.intec.ugent.be/files/URSIGA08/papers/KAЕp7.pdf> (дата обращения: 07.10.2009).
9. Haider H., Neubauer G., Kollar M. EMF measurement tasks and frequency selective evaluation methods for RF-communication facilities. Seibersdorf: Austrian Research Centers GmbH. URL: [http://www.seibersdorf-rf.com/docs/pubdl/EMF\\_Measurement\\_Tasks.pdf](http://www.seibersdorf-rf.com/docs/pubdl/EMF_Measurement_Tasks.pdf) (дата обращения: 07.10.2009).
10. Haider H., Überbacher R. Field Nose, a Frequency Selective and Isotropic System for Long-Term EMF Measurements and Monitoring. Seibersdorf: Austrian Research Centers GmbH. URL: [http://www.seibersdorf-rf.com/docs/pubdl/Field\\_Nose\\_for\\_Long-Term\\_EMF\\_Measurements.pdf](http://www.seibersdorf-rf.com/docs/pubdl/Field_Nose_for_Long-Term_EMF_Measurements.pdf) (дата обращения: 07.10.2009).
11. EN 50492:2008. Basic standard for the in-situ measurement of electromagnetic field strength related to human exposure in the vicinity of base stations. Brussels: CENELEC, 2008 – 60 p.
12. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. – 22 с.
13. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz) // Health Physics. – 1998. – № 74(4). – P. 494 – 522. URL: <http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf> (дата обращения 07.10.2009).

## ПОВЕДЕНИЕ АНСАМБЛЕЙ РАЗНОИМЕННЫХ ВИХРЕЙ

Похил А.Э.\*, Марголин А.Д.\*\*

\*Гидрометцентр России, г. Москва.

\*\* Институт химической физики РАН, г. Москва.

Наблюдения показывают, что практически одинаковые совокупности атмосферных вихрей и течений над одной и той же территорией Земли могут иметь различную динамику, т.е. развиваться по различным сценариям. Взаимодействие вихрей между собой и с другими барическими образованиями, могут привести их к мандрирующим движениям различных пространственных и временных масштабов. Иногда траектории вихрей принимают форму петель /6,8,13/. Существуют ситуации, при которых практически равновероятно развитие противоположных процессов. Одной из частных, но важных задач этой проблемы является прогнозирование перемещения нескольких одновременных тропических циклонов (ТЦ), развивающихся на ограниченной акватории. Особенно актуальна эта задача для Тихого и Атлантического океанов /5,8,11/, где довольно часто наблюдаются группы ТЦ. Поведение таких "групп" до сих пор является трудно предсказуемым, поскольку отдельные вихри в этой системе часто описывают сложные ("аномальные") траектории /10,12/. Изучение возможных вариантов развития неустойчивых состояний является практической задачей для прогнозов.

Традиционным направлением исследования подобных вопросов является изучение эволюции системы, состоящей из нескольких вихрей. Важнейшие закономерности взаимодействия вихрей дает рассмотрение точечных вихрей /1,2/. Однако, реальные атмосферные вихри - это распределенные вихри.

Рассмотрение поведения вихрей конечного размера и их ансамблей, в которых расстояние между отдельными вихрями сравнимо с их размерами, дает информацию об их расталкивании, сближении, дроблении, изменении размеров и формы, об особых случаях резкого изменения их поведения при слабом изменении характеристик, либо соотношения характеристик вихрей. В частности, в работах /3,6-10,13/ проведены исследования на численной модели / 4 / поведения двух либо трех взаимодействующих вихрей.

Рассматривался профиль тангенциальной компоненты скорости ветра в вихре, описываемый уравнением вида:

$$V(r) = V(r/R) \exp[1/b \times (1 - (r/R)^b)] \quad (1)$$

Распределение завихренности при этом выглядит соответственно, таким образом:

$$\xi(r) = 2V/R \times [1 - 0,5 (r/R)^b] \exp [1/b \times (1 - (r/R)^b)] \quad (2)$$

где  $r$  - расстояние от центра вихря;

$V$  - максимум тангенциальной составляющей скорости ветра;

$R$  - расстояние от центра вихря, на котором достигается  $V$ ;

$b$  - показатель, определяющий изменение тангенциальной составляющей скорости ветра вдоль радиуса. В настоящей работе принято  $b=2.0$ .

Значения всех этих параметров изменяются в ходе интегрирования.

Эксперименты, проведенные в названных работах, показали, что:

I. При взаимодействии двух одинаковых вихрей

- 1) отмечаются два вида взаимодействия: притяжение и расталкивание;
- 2) существует критическое соотношение  $d/R$ , при котором вид взаимодействия меняется на противоположный;
- 3) начиная с определенного момента, сближение вихрей в процессе их взаимодействия происходит не монотонно, а в колебательном режиме; при этом период колебаний зависит от  $V$ , а амплитуда - от  $R$ ;
- 4) обнаружен эффект, противоположный эффекту Фудзивары [5], а именно – расталкивание одноименных вихрей при антициклоническом относительном вращении.
- 5) в процессе взаимодействия вокруг пары вихрей и внутри обобщенной системы могут образовываться вторичные вихри с положительной или отрицательной завихренностью, усиливающие или гасящие друг друга;

#### II. При взаимодействии различных по характеристикам вихрей:

- 1) один из вихрей может частично или полностью захватить соседний вихрь;
- 2) критическое соотношение, ответственное за вид взаимодействия (притяжение - расталкивание), становится не таким определенным, как в случае с одинаковыми вихрями, и "расплывается" в целую область значений. В работе [10] проведены эксперименты, давшие возможность при хорошем разрешении увидеть поведение центров двух первоначально заданных вихрей внутри обобщенной системы, образованной при значительном сближении вихрей в процессе взаимодействия. Задача взаимодействия двух вихрей на двумерной численной модели и условия их объединения в зависимости от соотношения ряда параметров позже рассматривались также и в [14].

Надо отметить, что подобную информацию нельзя почерпнуть из теории точечных вихрей.

В данной работе на численной модели / 4 / исследуется эволюция системы четырех или шести вихрей с одинаковым полем скорости, но различным направлением вращения (разноименные). Вихри расположены в вершинах многоугольников так, что ближайшими соседями являются вихри разных знаков. При этом суммарный момент количества движения вихрей равен нулю

/ 2 /. Вихри во всех численных экспериментах посажены в центре расчетного поля и в течение времени расчета не достигают границ поля.

Рассматривается взаимодействие распределенных вихрей в идеальной жидкости. Отметим, что взаимодействие вихрей в идеальной жидкости ( $Re = \infty$ ) почти не отличается от их взаимодействия в вязкой жидкости при  $Re > 100$ , где число Рейнольдса рассчитывается по максимальному значению скорости  $V$  и расстоянию от центра вихря до радиуса  $R$ , на котором она достигается.

Рассмотрим некоторые варианты взаимодействия разноименных вихрей.

#### Динамика 4-х взаимодействующих вихрей, расположенных в вершинах квадрата.

При условии (в остальных углах располагались антициклоны - АЦ) и при начальном относительном расстоянии между центрами соседних вихрей  $d/R > 6$  (начальное расстояние между центрами соседних Ц и АЦ) вихри не взаимодействуют друг с другом. В данном случае в течение численного эксперимента ( безразмерное время эксперимента  $T=17$ ;  $T=t(V/2\pi R)$ ,  $t$  – время) вихри остаются на своих местах и не трансформируются. Однако, надо заметить, что даже при значительно удаленных вихрях, взаимодействие может начаться через определенное время / 7

/ . Дело в том, что в тылу вихря организуются области завихренности (облако малых вихрей) того же и противоположного знаков. На рис.1 представлена эволюция полей завихренности.

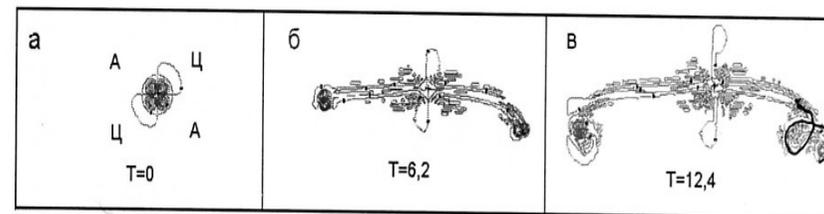


Рис.1

В поле завихренности видны «следы» за взаимодействующими вихрями – это и есть вновь образовавшиеся малые вихри. (На всех представленных рисунках буквой Ц обозначены вихри, имеющие циклоническое вращение, буквой А – антициклоническое.).

В процессе эволюции малые вторичные вихри развиваясь, могут достигнуть соседнего вихря, расположенного достаточно далеко, и начинают взаимодействовать с ним. Пример такого взаимодействия можно видеть на рис. 2. Этот процесс и определяет взаимодействие достаточно далеко удаленных вихрей.

Другой причиной взаимодействия удаленных вихрей может быть неустойчивость круглого спада скорости при  $r > R$  и постепенное «расплывание» периферийной его части.

При меньших первоначальных расстояниях ( $d/R \sim 5.9-3.0$ ) группа из 4-х вихрей распадается на две пары, движущиеся в противоположных направлениях (рис.1а, б, в). При этом вихри в образованных парах в начальный момент притягиваются и сближаются на 10-15% в зависимости от первоначального расстояния между ними, затем наблюдается слабое колебание центров вихрей относительно друг друга (сближение – удаление) и далее практически параллельное движение. С определенного момента направление движения изменяется (рис.1б,в). В тылу пар образуется облако малых вихрей. Порождение облака малых вихрей при взаимодействии «исходных» вихрей характерно именно для распределенных вихрей.

При еще меньших первоначальных расстояниях между исходными вихрями ( $d/R \sim 2,9-1$ ) вихри в парах вначале несколько расталкиваются, затем сближаются, как и в предыдущем случае, и далее наблюдается их параллельное смещение со слабыми колебаниями. Рисунок не приведен из-за недостатка места.

В численных экспериментах при  $d/R < 3.33$  траектория пары поворачивает в сторону одного из вихрей, подобно тому, как можно видеть на рис. 1.

Поворот траектории вызывается тем, что к моменту начала поворота вихри имеют несколько различные параметры и форму. Вихрь, в сторону которого совершался поворот, оставался круглым, в то время как второй как бы охватывал его, становясь чечевицеобразным (рис.1б). Возникающее различие (изменение формы) взаимодействующих вихрей может происходить из-за несимметричного порождения первоначальными вихрями потока малых вихрей [7,9], а также из-за неабсолютной симметрии начальных условий. Когда центры пары вихрей в процессе

эволюции сближаются, кривизна траекторий увеличивается, и траектории этой пары описывают спираль (рис.1в). Поскольку скорость смещения центра каждого вихря определяется полем скоростей соседнего вихря, то  $L$  (радиус кривизны спирали) пропорционален расстоянию  $d$  между центрами вихрей.

При произвольной зависимости скорости в вихре  $V(r)$ , очевидно, что

$L_1/d = V_1(d)/(V_1(d) - V_2(d))$  - для одного вихря и  $L_2/d = V_2(d)/(V_1(d) - V_2(d))$  - для другого вихря, где  $L_1$  и  $L_2$  - радиусы кривизны спиралей, описываемых первым и вторым вихрями,  $V_1$  и  $V_2$  - скорости ветра в 1-ом и 2-ом вихрях, соответственно.

При условии, что первоначально центры вихрей расположены на относительном расстоянии  $d/R < 1$ , т.е. на расстоянии меньше радиуса максимальных ветров, график суммарных скоростей имеет два горба. Организуется, так называемый, «двухголовый вихрь», центр масс которого прецессирует, и наблюдаемая траектория описывает окружности (рисунок не приведен из-за недостатка места). Двухголовые вихри наблюдаются в природе и получены на численной модели /9/, траектории их обычно зигзагообразны или имеют петли.

Изменить скорость и направление перемещения взаимодействующих вихрей можно, изменив их характеристики, либо расстояние между ними. Например, при изменении исходного расстояния между центрами разноименных вихрей  $d/R$  от 6 до 2 скорость смещения пары увеличивается; при еще большем сближении вихрей до  $d/R < 1.0$  скорости смещения вихрей уменьшаются, что естественно, т.к. скорость движения вихря определяется полем скорости соседнего вихря, а оно описывается уравнением (1).

Изменить направление перемещения взаимодействующих вихрей также можно изменением исходных положений вихрей (циклон-антициклон) на противоположные. При этом получим траектории центров вихрей, повернутые на 90 град относительно рисунка 1: верхняя пара будет перемещаться вверх, нижняя - вниз. При исходном относительном расстоянии  $d/R$  равном или меньшем величине 2.2, получим практически прямолинейное движение пар в противоположных друг другу направлениях. Задавая большую исходную скорость ветра  $V$ , ускоряем расхождение пар.

**Динамика четырех взаимодействующих вихрей, расположенных в вершинах ромба.** В этих экспериментах расположение и расстояния между парами вихрей существенно отличаются от их расположения в предыдущей серии, соответственно, и поведение их также значительно изменяется.

Введем дополнительные обозначения:

$d/R_{ц}$  - первоначальное относительное расстояние между двумя (Ц-Ц) центральными вихрями;  $d/R_{п}$  - первоначальное относительное расстояние между двумя (А-А) периферийными вихрями - антициклонами;  $d/R_{цп} = 1/2 d/R_{п}$  - первоначальное относительное расстояние между центром системы и периферийным антициклоном (А).

Проведено две серии численных экспериментов, в которых циклонические вихри (на рис. Ц) располагались в центре системы друг над другом, антициклонические (на рис. -А) - на периферии системы на одной «широте» (рис. 2а). В предыдущих работах /6, 9,10/ найдено критическое соотношение  $d/R=2.7$ , при котором меняется тип взаимодействия вихрей с обозначенными характеристиками. При  $d/R < 2.7$  вихри сближаются, вращаясь циклонически, относительно друг друга; при

$d/R > 2.7$  имеет место расхождение; при еще большем расстоянии - наблюдается расхождение вихрей при антициклоническом относительном вращении.

В первой серии экспериментов центральные вихри (циклоны) располагались на расстоянии  $d/R_{ц}=2.2$ , при котором (если бы они были без «соседей») выполнялось условие их сближения и схлопывания. Во второй серии ( $d/R_{ц} = 2.8$ ) для центральных вихрей выполнялось бы условие расталкивания /10/. В представленных в этой статье экспериментах относительные исходные расстояния между периферийными вихрями  $d/R_{п}$  менялись от 19.5 до 8.6, между центром системы и периферийными вихрями  $d/R_{цп}$  от 9.7 до 4.3, соответственно. При изменении первоначального относительного расстояния между вихрями в различных экспериментах наблюдались различные типы взаимодействия.

Рассмотрим результаты первой серии ( $d/R_{ц}=2.2$ ). На рис. 2 представлена эволюция поля завихренности 4-х взаимодействующих вихрей при  $d/R_{цп} = 6.8$ .

Через определенное расчетное время центральные циклонические вихри схлопывались и организовывался большой объединенный вихрь (рис.2а,б,в). Вокруг него образовывались вторичные вихри противоположного знака. Видно, что в процессе эксперимента система вихрей, состоящая из пары центральных взаимодействующих вихрей и вновь образовавшихся малых вихрей, захватывает все большее пространство, и в определенный момент периферийные части этой системы достигают правого и левого антициклонических вихрей, расположенных на больших расстояниях от центральных. Процесс растягивания некоторых областей вновь образовавшихся вихрей (рис.2г), отрывания и накручивания периферийными вихрями части приблизившихся к ним вновь образованных вихрей хорошо прослеживается на рис. 2г, д, е. Этот процесс и определяет спиралеобразные траектории центров периферийных вихрей (рис.2ж).

Рассмотрим далее поведение ансамбля из 4-х вихрей при первоначальном относительном расстоянии между центром системы и периферийными вихрями (А)  $d/R_{п}=6.0$ . Расстояние между центральными вихрями (Ц-Ц) остается  $d/R_{ц}=2.2$ . Траектории всех вихрей представлены на рис.3а. (Стрелками показано направление перемещения центров вихрей). До определенного момента периферийные вихри находятся в неустойчивом состоянии, совершая колебательные движения вокруг начального положения, и их центры описывают небольшие петли до момента, пока центральные вихри схлопываются и образуют большой объединенный вихрь. (Надо отметить, что эти колебания и петли при приближении центров вихрей на расстояние  $d/R_{ц} < 1$  впервые получены и объяснены в работе /6/). В этот момент центральный объединенный вихрь двухголовый, и поэтому его положение неустойчиво: он колеблется вокруг своего центра масс. Затем влияние центрального большого вихря начинает сказываться на периферийных вихрях: наблюдается циклоническое вращение периферийных антициклонов вокруг объединенного центрального вихря (рис.3а).

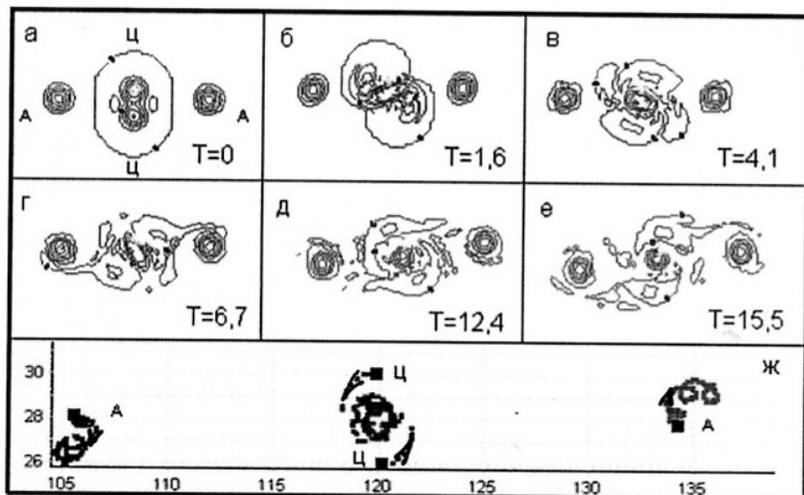


Рис.2.

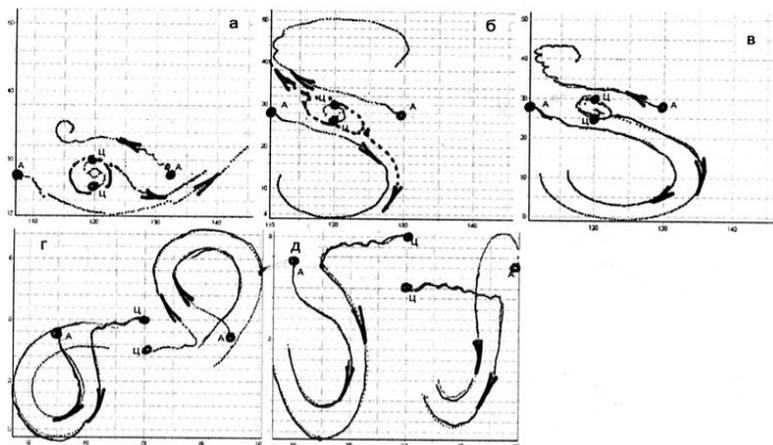


Рис.3

Далее объединенный центральный вихрь (центр которого прецессирует), при слабом отклонении от центрального положения, может «непредсказуемо» (этот процесс вероятностный) переместиться в сторону любого из периферийных вихрей, подошедшего достаточно близко для «сильного» взаимодействия. Затем траектории периферийного вихря (того, который «выбран» центральным для плотного взаимодействия) и объединенного вихря становятся практически параллельными, поскольку они теперь плывут в общем потоке, созданном ими совместно, с удво-

енной скоростью. В описанном случае правый антициклонический вихрь оказался «по воле случая» несколько дальше от центрального, чем левый, он продолжает некоторое время циклоническое движение вокруг центрального вихря. Затем, по мере того как правый антициклон (А) и пара параллельных вихрей, расходятся достаточно далеко, антициклон теряет связь с системой пары вихрей, перестает чувствовать ее влияние, и начинает перемещаться независимо. Его траектория начинает описывать скручивающуюся антициклоническую спираль (рис.3а).

В следующем эксперименте (рис.3б) исходные периферийные вихри располагались ближе к центру ( $d/R_{цп}=4.3$ ). Расстояние между центральными вихрями остается  $d/R_{ц}=2.2$ . В этом случае наблюдается неустойчивость в поведении центральных вихрей: вначале они организуют объединенный эллиптический циклонический вихрь, затем, растянувшись под влиянием периферийных, этот вихрь снова делится на два. Далее два вихря, образовавшиеся из эллиптического вихря, организуют пары с периферийными и движутся по траекториям, представленным пунктиром на рис. 3б.

Рассмотрим результаты второй серии экспериментов ( $d/R_{ц}=2.8$ ).

При исходных расстояниях между периферийными вихрями и центром системы  $d/R_{цп}=4.4$  (рис.3в.), практически как в предыдущем эксперименте, центральные вихри объединяются. В этом сказывается влияние периферийных вихрей. При этом объединенный вихрь, за счет колебаний его центра при объединении, оказывается в определенный момент на некоторое, очень малое, расстояние ближе к левому - «западному» вихрю. Это и предопределяет его дальнейшее поведение: он организует пару с «западным» периферийным вихрем и движется по эллиптической антициклонической траектории вниз, параллельно западному (рис.3в). «Восточный» вихрь, оставшись один, описывает в колебательном режиме пилевидную антициклоническую траекторию вверх (рис.3в) так, как это происходило в эксперименте, представленном на рис.3а.

Т.о. показано, что неустойчивость в поведении группы вихрей (прецессирующие колебания вихрей при их взаимодействии) при незначительном изменении расстояния между вихрями, может разрешиться существенно отличными вариантами поведения.

Удаляя в начале эксперимента (рис.3г) периферийные вихри от центральных на расстояние  $d/R_{цп}=6.0$  ( $d/R_{ц}=2.8$ ), получаем, расхождение\* центральных вихрей до расстояния, на котором они начинают взаимодействовать с периферийными (до этого момента периферийные вихри остаются неподвижными). Затем, каждый из центральных вихрей и ближайший к нему периферийный, попарно описывают почти правильные окружности (рис.3г), находясь на неизменном расстоянии друг от друга. В образовавшихся парах циклон вращается вокруг антициклона, как это имеет место в природе.

При большем увеличении исходного расстояния между центральными и периферийными вихрями ( $d/R_{цп}=9.7$ ) (рис.3д), расталкивание центральных вихрей происходит подобно тому, как это происходило в предыдущем эксперименте, однако траектории имеют некоторую южную составляющую (с определенного момента наблюдается антициклоническое вращение центральных вихрей относительно друг друга). В этом эксперименте вид траекторий пары правых вихрей существенно отличается от предыдущих. В образовавшейся левой паре циклон (Ц) вращается вокруг антициклона (А). В правой паре некоторое время наблюдается

вращение А вокруг Ц, и с определенного момента наблюдается обратное вращение – Ц вокруг А при общем антициклоническом вращении пары. Итак, очень слабое изменение одной из характеристик системы приводит к существенно отличающемуся поведению составляющих ее элементов.

\* Причины и примеры расхождения вихрей представлены в работе /6/.

**Динамика ансамблей из шести взаимодействующих вихрей, расположенных в вершинах шестиугольника.** Группа вихрей, как и в предыдущих экспериментах, состоит из одинаковых по характеристикам вихрей, из которых соседние отличаются направлением вращения.

Такая группа вихрей (при  $d/R = 3,35$  между соседними разноименными вихрями) в процессе интегрирования распадается на три пары (рис.4), расходящиеся от центра системы в идеальном случае под углом 120 град друг к другу.

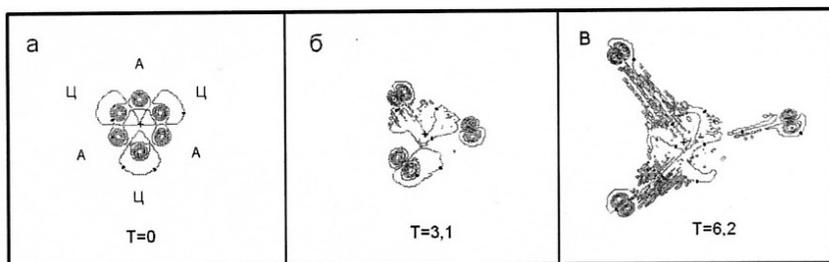


Рис.4.

Вначале вихри в каждой паре несколько сближаются (влияние поля скоростей вихрей, соседних с парой), затем некоторое время следуют практически параллельно друг другу, далее могут сближаться и образовать спираль подобно тому, как было описано выше (рис.1). Угол 120 град между траекториями пар не всегда соблюдается из-за неполной симметрии первоначального положения центров вихрей. В следующем эксперименте (рис. 5) центры вихрей (Ц и А) правой пары в начале эксперимента были посажены немного ближе между собой, чем остальные. В этом случае эта пара быстро удаляется направо (рис. 5а-д). (Другой вариант, дающий тот же результат, пара вихрей удалена от других вихрей и, таким образом, ослаблено влияние соседних вихрей). Удаление пары вызвано тем, что вектор суммарной скорости ведущего потока, созданного вихрями, направлен направо. Скорость перемещения пары сильно зависит от расстояния между центрами вихрей в паре. При сближении вихрей взаимное влияние их полей существенно увеличивается. Траектории вихрей для этого случая представлены на рис.5е.

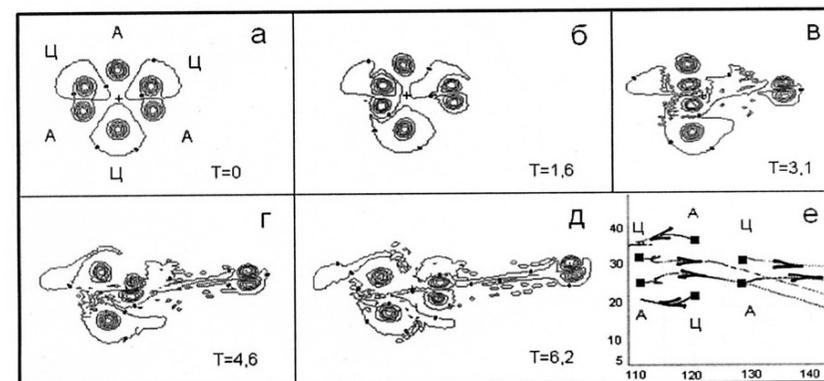


Рис.5.

Оставшаяся четверка вихрей, перемещается следующим образом. Вихри левой пары, совершив петли и несколько сблившись, направляются вслед за правой парой с большой скоростью, зависящей от расстояния между ними. Их скорость несколько меньше скорости правой пары, т.к. расстояние между ними несколько больше, поэтому они не догоняют правую пару. Верхний и нижний вихри (антициклон и циклон) вращаются вокруг левой пары, как бы охватывая ее и сближаясь между собой. Далее они перемещаются в противоположную сторону (налево), т.к. их суммарный ведущий поток направлен влево. (рис.5е).

#### Заключение

На основании проведенных исследований на численной модели и аналитических расчетов получены следующие результаты:

1. Рассчитаны эволюции ансамблей нескольких вихрей конечного размера с одинаковым полем скорости, но различным направлением вращения, в которых расстояние между отдельными вихрями сравнимо с их размерами.
2. Расчеты дали информацию об их расталкивании, сближении, дроблении, изменении размеров и формы, об особых случаях резкого изменения их поведения.
3. Получено, что эволюция группы из нескольких вихрей с разным вращением может происходить по разным сценариям при слабом изменении параметров системы.
4. Представлены некоторые возможные варианты динамики группы вихрей при их взаимодействии.
5. Наблюдались прецессии центра масс вихрей и дается объяснение этого явления.
6. В ряде численных экспериментов траектория пары поворачивает в сторону одного из вихрей. Поворот траектории вызывается тем, что к моменту начала поворота вихри имеют несколько различные параметры и форму. Траектории такой пары описывают спираль. Сделана оценка кривизны траекторий вихрей.
7. Предложено объяснение взаимодействия вихрей достаточно далеко удаленных друг от друга.
8. Показано, что взаимодействие группы вихрей сопровождается образованием облака вторичных меньших вихрей.

**Авторы выражают благодарность А.И.Ткачеву за помощь в оформлении статьи.**

### Литература

1. Алексеев С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Новосибирск, 2003, 503с.
2. Борисов А.И., Мамаев И.С. Математические методы динамики вихревых структур. Москва Ижевск, 2005. 368с.
3. Гетлинг А.В. О взаимодействии вихрей конечного размера в вязкой жидкости. Препринт N 87-016, НИИ ядерной физики МГУ, Москва 1987, 27с.
4. Зленко В.А. Гидродинамическая схема расчета траекторий тропических циклонов.- Метеорология и гидрология, 1987, N 5, 56-61.
5. Ньютон Э., Пальмен Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Гидрометеоздат., Л., 1973, 398с.
6. Похил А.Э., Ситников И.Г., Зленко В.А., Полякова И.В. Численные эксперименты по исследованию взаимодействующих атмосферных вихрей. Метеорология и гидрология, 1990, № 4, 21-28.
7. Похил А.Э. О возникновении и разрушении вторичных вихрей в процессе взаимодействия двух тропических циклонов. Метеорология и гидрология, 1991, № 9, 34-41.
8. Похил А.Э. О взаимодействии тропических циклонов в Тихом океане. Метеорология и гидрология, 1990, № 6, 60-67.
9. Похил А.Э. О некоторых условиях возникновения большого вихря и особенностях взаимодействия вихрей. Метеорология и гидрология, 1996, № 2, 24-32.
10. Похил А.Э., Полякова И.В. О влиянии структуры взаимодействующих вихрей на их перемещение. Метеорология и гидрология, 1994, № 7, 17-23.
11. Похил А.Э., Ситников И.Г., Галкин С.А. Взаимодействие трех идеальных вихрей в численной модели и поведение группы реальных тропических циклонов Тихого океана. Метеорология и гидрология, 1997, № 2, 28-32.
12. Похил А.Э., Ситников И.Г., Зленко В.А. О поведении уединенных циклонических и антициклонических вихрей и их взаимодействии в однородных полях с учетом и без учета бета-эффекта. Метеорология и гидрология, 2000, № 9, 39-48.
13. Ситников И.Г., Похил А.Э. Взаимодействие тропических циклонов между собой и с другими барическими образованиями (часть 2), Метеорология и гидрология, 1999, N 7, 36-51.
14. Nagata M. Introduction to the Third COMPARE Exercise: TCM-90 (SPECTRUM, TYRHOON-90) Case Ver.3. - Japan Meteorological Agency, May 1, 1997.

ФИЗИКА В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ – ФРАГМЕНТЫ РАЗВИТИЯ

А.П. Рыженков

*Коломенский Государственный педагогический институт*

Введение экологических аспектов в курсы физики школы и ВУЗов относится к концу 70-х годов XX века. Автор принимал участие в начале развития этого процесса и продолжает работу в этом направлении на разных уровнях и разной форме. Эти заметки не являются полным систематическим анализом истории интеграции физики и экологии. Они отражают, в основном, личный опыт автора и его коллег из разных учебных заведений и разных стран за более чем тридцатилетний интервал времени. Акцент сделан на обучение физике с элементами экологии в общеобразовательной школе и высших учебных заведениях, где такая интеграция является сравнительно новым явлением в сравнении с геофизическими отделениями университетов, где эта область относится к профессиональной специализации и ее развитие имеет другой характер.

**Причины введения в учебную физику экологических аспектов.** Интерес к экологическим проблемам в среде физиков высших учебных заведений проявился в конце 70-х годов XX века в связи с возросшим общественным вниманием к **охране природы**, как тогда называлась эта проблема. Это внимание и интерес возникли в связи с изменениями в природной среде в результате резко возросшего антропогенного давления и некоторых драматических событий, связанных с достижениями физики. К таким событиям, прежде всего, относится использование американцами ядерного оружия в Японии в конце Второй мировой войны. Шок от этого не исчез в сознании многих людей, независимо от того жили и живут эти люди: в странах-победителях, в нейтральных странах или в странах гитлеровской коалиции. Жертвы мирного населения от взрыва двух атомных бомб были абсолютно не оправданы к концу войны. Но факт, есть факт.

Человек на основе достижений физики создал оружие массового поражения фантастической эффективности. Обычно говорят о колоссальной мощности ядерного оружия, но мне специально хочется употребить другой термин - **эффективность уничтожения людей**. Думаю, что многие читатели поймут меня. Другое драматическое событие, связанное с ядерной энергией, произошло в 1979 году на электростанции Три\_Майл\_Айленд в США, когда возникла угроза взрыва ядерного реактора. Следующий эпизод - это взрыв реактора Чернобыльской атомной электростанции в СССР в 1986 г. Последствия этого взрыва Украина и все сообщество физиков-энергетиков будет переживать еще много, много лет. Причина взрыва была не в «молодости» ядерной физики того времени или в слабости технологии, а как теперь говорят, в человеческом факторе. От понимания этого проблема возрастающего могущества человеческого интеллекта (не разума) и его влияния на природные и социальные процессы мягче не становится, а напротив, острее. Позже, крупномасштабные разрушения природной среды происходили при прорывах газо- и нефтепроводов, авариях океанских танкеров и других, подобных катастрофах, техногенного происхождения. Средства массовой информации с 80-х годов сформировали в сознании людей совершенно неправильное понимание о «парниковом эффекте», который возник при загрязнении атмосферы газообразными выбросами и теплом и результатом этого «эффекта» может быть климатическая катастрофа. Из физики этого явления следует, что «парниковый эффект» важнейшее условия существования жизни и нарушение его устойчивости может при-

вести к катастрофическим последствиям. К сожалению, работники СМИ не знали этого, так как в программах физики школы и вузов не было этого явления, нет и сейчас.

Катастрофические события, к которым прямо или косвенно имели отношения достижения физики, с одной стороны охладил «восторг» физиков от роли основателей НТР и покорителей сил природы, с другой, привели к формированию чувства ответственности за издержки «покорения природы» с использованием достижений физики. На основе этого пришло понимание необходимости введения в учебную, технологизированную, физику ВУЗов и школ новой составляющей – физики природных явлений и влияния на них антропогенного давления. Такая физика станет частью формирования новой культуры по отношению к природной среде и использованию достижений физики как основы технологий.

**Эволюция названия нового направления в физике.** В конце 70-х в журнале «Физика в школе» и в материалах конференций по преподаванию физики появляются редкие публикации на тему: физика и охрана природы, физические основы действия очистительных аппаратов, решение физических задач с природоохранным содержанием и т.п. Все эти работы отражают лишь участие физики в природоохранном образовании. Позже, появляется сочетание физика и экология, физика в экологическом образовании, экология на уроках физики и т.п. Таким образом, терминология показывает, что возникает интеграция физики с экологией, другой фундаментальной областью естествознания. Это уже новый, более высокий уровень, переход от участия физики в технике охраны природы, мер по защите природы к фундаментальным проблемам взаимодействия общества с природной средой. В начале 90-х возникает новое сочетание терминов: экологическая физика и физическая экология, отражающее качественно новый этап естествознания – формирование специфической интегративной области знания. В интервале, с середины 90-х до наших дней все чаще появляется сочетание «Физика окружающей среды» в странах бывшего СССР и «Environmental Physics» в англоговорящих странах. Итак, можно считать, что понятия «Экологическая физика» и «Физика окружающей среды» окончательно отражают формирование новой интегративной области знания и хорошо определяют ее содержание. Это новое фундаментальное направление в развитии физики и, с другой стороны, прикладная область, приобретающие все более высокую актуальность в связи с осложнением глобальной экологической ситуации.

**Реакция преподавательского сообщества физиков.** С начала процесса применения физических знаний к решению природоохранных задач, а позднее локальных и глобальных геофизических явлений с воздействием человеческого фактора, а также решения проблем использования природных ресурсов и развития энергетики, прошло почти 40 лет. Однако, участие физиков школы и ВУЗов в этом процессе все еще редкость. В некоторых случаях проявляется даже противодействие и раздражение. Так на конференции «Физика в системе современного образования», Санкт-Петербург, 2005 г., председатель одной из сессий, резюмируя доклад, назвал банальной проблему интеграции физики и экологии и работу в этом направлении конъюнктурной, так как физика по своей сути наука о природе. Причин слабого отклика российских преподавателей физики на эту проблему несколько. Во-первых, учителя и преподаватели ВУЗов получили подготовку в русле традиционной физики, ориентированной в прикладном плане на создание техноло-

гий и техники. Во-вторых, малый ресурс времени на физику в средней школе – 2 часа в неделю, не дает школьному учителю уходить в сторону от очень объемного программ-много материала. В-третьих, в содержании программ по физике школы и ВУЗа не входили воп-росы, связанные с физикой биосферы. Поэтому развитие этого направления было и пока еще остается делом энтузиастов.

Преподавательская среда средней и высшей школы в странах ЕС и США быстрее и позитивнее поняла и приняла необходимость введения экологических аспектов в преподавание физики. Это почувствовал и автор, получая приглашения из-за рубежа: от университета в Чикаго, 1989 г, университета Сан-Франциско, 1992 г., университета Монктлер, штат Нью Джерси, других учебных заведений для участия в разных формах преподавательской деятельности. В университете Монктлер такая работа велась в течение 1997 – 1998 года, на Отделении окружающей среды факультета «Естествознание» (Science) В университете города Лунд в Швеции автор проработал с 1992 по 2008 г. в общей сложности 7 семестров, преподавая Физику твердого тела и Физику окружающей среды и участвуя в повышении квалификации учителей.

**Развитие экологической физики.** Наибольший подъем экологического образования связан с двумя Международными конференциями ЮНЭСКО и ЮНЭП. В 1987 г. в Москве прошел Кон-гресс «Экологическое образование и подготовка учителей», в его документах экологическая составляющая становится обязательной как для обучения детей, так и подготовки учителей. Биология, география и специальный курс экологии определялись как основные каналы по реализации целей и задач экологического образования, рекомендовалась также и интеграция эко-логической тематики с другими дисциплинами, физикой в том числе. Важным событием стал Конгресс ООН в 1992 г. в Рио-де-Жанеро с участием глав государств. На этом Конгрессе была принята «Программа 21» (Agenda 21) и Концепция устойчивого развития (sustainable development), определявшие стратегию развития мира на 21 век. Большое внимание в этих документах уделено экологическому образованию.

#### Экологическая физика в СССР и России

**Программы по физике для средней школы.** Программы и учебный план – основные документы по организации и управлению учебным процессом. С начала 90-х наряду с традицион-ными программами по физике средней школы с акцентом на политехническую прикладную составляющую появляются программы предлагают учителя физику введение экологического материала в достаточном объеме и глубокого по содержанию. Проект Программ по физике М.М. Балашова, Г.Я. Мякишева, Э.Б. Финкельштейна, Л.А. Нотова и Г.Л. Злотник, изданный в 1992 г. рассматривает состояние физического образования как кризисное и предлагает концепцию, в основе которой – изучение физики для формирования нового типа развития общества, гармонизированного с процессами природы. Программа А.А. Фадеевой, М., Просвещение, 2000 г прикладную роль физики дает в политехническом и экологическом направлении, одним из принципов отбора учебного материала называет экологичность содержания, многие разделы Программы предлагают изучение взаимодействия общества с окружающей средой. К традицион-онным программам относятся Программы по физике для 10-11 классов В.С. Данюшенкова, О.В. Кор-

шунова, С.В. Громова, Н.В. Шароновой, П.Г. Саенко, М., Просвещение, 2005 г., не содержащие тем с экологическим содержанием, как и разработки В.С. Касьянова. Программы элективных курсов по физике для 9-11 классов, М. Дрофа, 2006 г. не предлагают ни одного курса физики с экологическим содержанием.

. В 1996 г. Министерство образования РФ начало работу по разработке государственных обще-образовательных **стандартов**. Автор был привлечен к разработке проекта стандарта: «Образовательная область – физика и астрономия» для введения в него экологической составляющей.

#### Учебные пособия по физике с экологическим содержанием.

Развитие этого направления можно проследить по публикациям педагогов, их участию в конференциях по экологическому образованию и различным документам обязательного и информационного характера. Выделю в этом анализе наиболее содержательные работы и заметные имена. Учебное пособие **«Физика и экология»** В.В. Алексеева издано в Москве в 1978 г. Это было первое пособие для школы по этой проблеме. Большое внимание в нем уделено работе тепловых двигателей и физическим процессам в очистных устройствах. Содержание пособия отражает в основном роль физики в плане существовавшего тогда природоохранного образования. В замечательной, отлично иллюстрированной книге для учащихся Л.В. Тарасова, **«Физика в природе»**, М.: Просвещение, 1988, сложные природные явления описаны понятным и образным языком. В описании явлений не показано влияние антропогенного фактора, но для учителя физики, интересующегося такими проблемами, это не составит труда при использовании материала книги.

В 1988 г. в издательстве «Просвещение» выходит первое методическое пособие для учителей физики **«Экологическое образование и воспитание учащихся в процессе обучения физике»** Э.А. Турдикулова. Нужно отметить полезность этого пособия для учителей, в нем на хорошем методическом уровне показаны возможности физики в экологическом образовании детей через различные формы и методы учебного процесса. Дано примерное планирование введения экологических вопросов в физику с 6-го по 10 класс, даны рекомендации по отбору тем с экологическим содержанием. После этого издания имя этого автора, к сожалению, больше не проявилось в сфере экологического образования через физику.

Учебное пособие для студентов физических отделений педагогических институтов **«Физика и экология»** А.П. Рыженкова вышло в издательстве «Прометей», Москва, в 1989 г. Написано пособие для элективного курса, такого же названия, на основе десятилетнего опыта введения экологической тематики в курсы молекулярной физики и электромагнетизма. Уверенность при работе над этой книгой дала и новая специальность «Экология и рациональное использование природных ресурсов», полученная автором в 1986 г. в Ленинградском технологическом институте ЦБП. Руководителем экологического отделения и его основателем был известный эколог-прикладник Стадницкий Г.В. Потребность в специальной экологической подготовке возникла почти в самом начале развития этого направления, когда стало ясно, что обсуждение сложнейших явлений в окружающей среде на популярном, «пальцевом», уровне не привлекает внимания студентов, не дает планируемых результатов и не приносит удовлетворения.

Необходимости в таком высшем образовании для всех преподавателей физики не будет, если они в школе и ВУЗе в процессе изучения физики получают фундамен-

тальные и прикладные знания о явлениях в окружающей среде и антропогенном влиянии на них. В пособии «Физика и экология» первая глава описывает глобальную экологическую ситуацию, вторая и третья – физику геосферных явлений и процессов, четвертая – ресурсные проблемы, пятая – достижения физики в решении экологических проблем.

После издания этой книги следует заказ издательства «Просвещение» на создание серии экологизированных пособий для физики средней школы. Три приложения с общим названием **«Физика. Человек. Окружающая среда -7»** и для 8 и 9 классов были написаны и издавались массовым тиражом с 2000 г. Все они получили статус Министерства просвещения - «Обязательные при изучении физики по любому учебнику». Это были первые учебники с систематическим введением экологических тем во все части школьной физики, от механики до ядерной физики. Нельзя сказать, что все учителя физики стали преподавать экологизированную физику по этим пособиям, но на полках книжных магазинов они не залеживались. В 2002 г. в Уфе выходит пособие **«Экология на уроках физики»** Ш.Г. Зиятдинова, акцент сделан на роль физики в решении энергетических проблем. В 2004 г. публикуется работа Ш.Г. Зиятдинова и А.Г. Наумова **«Вклад физики в школьное экологическое образование»**, «Гилем», Уфа. Работа содержит методологический материал полезный как учителям по экологизации преподавания физики, так и студентам. Большое внимание уделено прикладной роли физики в энергетике.

Заслуживают внимания издания серии пособий под редакцией Н.М. Мамедова, одно из них **«Устойчивое развитие и экологизация школьного образования»**, Ступени, М., 2003, содержит в разных главах материал, полезный преподавателям ВУЗов и школ по интеграции физики и экологии.

Большое влияние на процесс формирования экологического образования и экологической физики и вовлечение в него физиков-преподавателей оказали работы академика Моисеева Н.Н.

Работы разных авторов, в том числе в области экологической физики, отражены в справочных изданиях по экологическому образованию:

1. **Экологическое образование в России**. Справочник для преподавателей, Обнинск, 1997
2. **Экологическое образование в России**. Сведения о специалистах в области экологического образования, Государственный комитет РФ по охране окружающей среды, М., 1997
3. **Экологическое образование детей**. Каталог ресурсов. ИСАР., М., 2000
4. **Общественные ресурсы образования**, Справочник. Министерство образования РФ. М. 2003

#### Физика окружающей среды в других странах

Общеизвестен высокий уровень экологического образования в странах Европы, США, Новой Зеландии, Австралии. Однако, но участие физиков школы и ВУЗа и в этих странах, как и у нас, все еще редкость. В Швеции, где автору довелось участвовать в становлении этого процесса, основным центром развития физики окружающей среды является Лундский университет, где в начале 90-х был введен элективный курс Физика окружающей среды, В 1998 г. этот курс стал обязательным для студентов Учительского университета Мальме, а через год и для студентов физиков Лундского университета. В 1999 г. вышел учебник **«Физика окру-**

**жающей среды: энергия и климат»** (Miljöfysik. Energy och klimat), Марс Ареског, где на глубоком теоретическом и актуальном практическом уровне изложены основы физики в формировании климата, антропогенного влияния и современной и альтернативной энергетики. М. Ареског был одним из первых слушателей элективного курса и после окончания Лундского университета стал преподавать физику в Учительском университете в г. Мальме. Учителя физики шведских школ с начала 90-х активно включаются в развитие этого направления физики. Яркой иллюстрацией участия физики в решении экологических проблем в Швеции является быстрое и широкое распространение систем солнечного бытового и промышленного теплоснабжения, а в последние 5-7 лет и солнечных электрических преобразователей. И это в не очень солнечной Швеции. Кстати, все эти системы шведского производства.

В США экологические темы входят в программы по физике многих университетов и школ. Объем и глубина тем различна в зависимости от особенностей штата и опыта преподавателей.

Наиболее широкое применение элементы физики и физические методы для измерения различных характеристик окружающей среды нашли в специальных центрах экологического образования при университетах. Особенность образовательного процесса всех этих центров в применении, так называемой “Hands-on technology”, обучение через собственный опыт. Это отражено в пособии «**Обучение на природе**» (Teaching in the outdoors), Дэввилл, 1991, написанном энтузиастами и профессионалами экологического образования, преподавателями университета Сан Франциско, университета Северный Иллинойс и Центра экологического образования в штате Иллинойс, Д. Хаммерман, В. Хаммерман и Э. Хаммерман. Автор перенял много полезного, работая с ними. Великолепным пособием для преподавания Физики окружающей среды является фундаментальный труд «**Системы окружающей среды**» (Environmental Systems), издательство Чапмен и Халл, Лондон, Токио, Нью Йорк, 1994 г., авторы: И. Вайт, Д. Моттерсхед, С. Харрисон (620 страниц!). Нет возможности пересказывать содержание этой книги. Особенно интересна эта книга применением методов системного анализа к природным системам. Треть посвящена физическому анализу явлений и процессов в геосферах, треть системам почв, побережий, горных склонов и т.п. Треть антропогенным изменениям в системах. Научный, прикладной и иллюстративный уровни – высокого класса. Подобного типа книги «**Общая и экологическая геофизика**», В.И. Трухин, К.В. Показеев, В.Е. Куницын и «**Основы экологической геофизики**», В.И. Трухин, К.В. Показеев, В.Е. Куницын, А.А. Шрейдер, изданы недавно геофизическим отделением Физического факультета МГУ.

В Новой Зеландии центром развития физики окружающей среды с конца 80-х стал Университет Линкольна в Кантербюри, организаторы этого процесса Л. Ливингстон и Г. Бухан создали элективные курсы в университете и школах. Ими издан ряд учебных пособий, одно из них «**Задачи по физике окружающей среды**» (“Environmental Physics Workbook”, L. Livingstone, G. Buchan, Lincoln University, Canterbury, New Zealand, 1994) содержит много вычислительных и проблемных задач и вопросов по физике земных явлений и влиянию на них человеческой деятельности. Насколько мне известно, это, пожалуй, первое такое издание не только для Новой Зеландии. Можно привести еще ряд примеров введения экологических

аспектов в преподавание физики, но это локальный опыт, не оказывающий пока значительного влияния на работу сообщества физиков в школах и ВУЗах.

#### Некоторые итоги.

1. Участие физики в развитии общего экологического образования и воспитания явление до-вольно «молодое» в сравнении с биологией и географией.
2. Россия за последние 10-15 лет становится заметным участником этого процесса.
3. Развитие интеграции физики с экологией в России и в мире отражает процесс формирования нового фундаментального и прикладного направления в образовательной области «Физика» - «Физика окружающей среды».
4. Необходимость формирования и развития этого направления определяется Концепцией устойчивого развития на 21 век, принятой мировым сообществом.

### УРБОЭКОСИСТЕМЫ КАК ВЫРАЖЕННЫЙ НЕЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕМЕНТ АНТРОПОСФЕРЫ

Сидорова А.Э., Твердислов В.А.

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

Урбоэко системы крупных городов, в первую очередь мегаполисов, относятся к нелинейным системам, характеризующимся множественностью режимов самоорганизации и, вследствие этого, сложностью оперативного и стратегического управления ими. Урбоэко системы составлены иерархией сопряженных активных сред, и их нелинейность объективно формируется экстремальностью антропогенных нагрузок, несоответствием характерных времен и масштабов эволюции природной и антропогенной компонент урбоэко систем, а также наличием сложной системы положительных и отрицательных обратных связей между подсистемами. Актуальным социальным запросом для научного сообщества в настоящий момент является разработка теоретической модели коэволюции природно-антропогенных подсистем в урбоэко системах. Модели, способной стать инструментом рационального управления мегаполисами в границах их устойчивого развития. Настоящая статья посвящена качественному обсуждению важнейших факторов, определяющих структуру и особенности такой модели.

Опыт нынешнего поколения показал, что «линейное» планирование и «ручное управление» в экономике и развитии социальных проектов для мегаполисов в принципе малоэффективны: при попытке залатать одну «дыру», тут же всплывают другие, а простые, представляющиеся вполне логическими, экстраполяции не работают – эти сложные системы существенно нелинейны.

В настоящей статье авторы анализируют процессы и факторы, определяющие нелинейность крупных урбоэко систем и мегаполисов.

#### Урбоэко системы. Общие свойства

Около 17% территории России, где проживает более 60 млн человек, экологически неблагополучны. Эти цифры были приведены на недавней коллегии Счетной палаты РФ, где рассматривались результаты аудита эффективности охраны окружающей среды в Российской Федерации в 2005-2007 годах. При этом было отмечено, что в ряде регионов антропогенные нагрузки намного превысили уста-

новленные нормативы и сложилась критическая ситуация, при которой возникают значительные изменения ландшафтов, происходит истощение и утрата природных ресурсов, значительно ухудшаются условия проживания населения. В первую очередь это относится к крупным городам, особенно – к мегаполисам.

Причиной подобного состояния дел является не только и не столько известный «человеческий фактор», но в значительной степени мировоззренческая несостоятельность управленческих подходов к анализу функционирования урбо-экосистем (УЭС). В основе проблемы лежит традиционное линейное рассмотрение сложных систем, тогда как УЭС являются наиболее «экологически активными» в хозяйственном и геобиофизическом отношении экосистемами и характеризуются перенапряженностью потоков вещества и энергии, высокой локальной мощностью энергопреобразующих систем, неравномерностью и спонтанностью антропогенного воздействия, размытостью системных границ, подавляющим количеством необратимых системных процессов [1].

Известно, что нелинейные взаимодействия в открытых системах характеризуются далекодействующими корреляциями, амплитуды которых растут по мере приближения к точке бифуркации и, тем самым, организуют систему (от статистической независимости к когерентности элементов). Данный процесс связан с зависимостью критических параметров экосистемы от свойств когерентных подсистем. Особое место в этом ряду занимает *контринтуитивный* характер реакции природных систем на внешнее (антропогенное) воздействие, определяемый степенью структурно-функциональной сложности системы: чем сложнее структура экосистемы, тем большему количеству перемежающихся устойчивых и неустойчивых состояний одновременно она может быть подвержена (мультистабильность) [1].

Теоретической базой описания указанных особенностей УЭС является системный анализ устойчивости на базе синергетических закономерностей для неукоснительного введения в деловую практику нормативных экологических регуляторов. Если конкретные естественнонаучные дисциплины рассматривают конкретные механизмы трансформации вещества и энергии, то синергетика (наука о неаддитивно слагающихся факторах внешних воздействий на системы и внутренних взаимодействий), в свою очередь, рассматривает потоки и схему связей в экосистемах, пути преобразования вещества и энергии. Подобный системный подход позволит последовательно перевести «урбанизацию биосферы как фактор риска» в область устойчивого развития.

Необходимой предпосылкой возникновения эффекта самоорганизации в границах природно-антропогенных экосистем является синергетическое соответствие социума, биотических и абиотических факторов, т.е. биологической, геохимической, гидрологической и физической ипостасей экосистемы масштабам антропогенного воздействия [2]. В настоящее время данный вид экосистем, в отличие от природных, характеризуется высокой скоростью роста, активным энерго- и массообменом, а также значительной средней плотностью народонаселения и высокой интенсивностью метаболизма [2]. Эти условия формируют нелинейность и неустойчивость природно-антропогенных экосистем при перегрузке путей поступления ресурсов и наличии неблагоприятных экологических факторов. Так, в УЭС наглядно выполняется «Закон снижения энергетической эффективности природопользования»: с течением времени при получении полезной продукции из природных систем на ее единицу затрачивается все большее количество энергии хотя

бы уже из-за того, что в мегаполисах возрастают транспортные, энергетические и коммуникационные издержки.

В предыдущих работах мы обсуждали синергетическую закономерность, свойственную развивающимся системам различной физической, химической, биологической и т.д. природы и заключающуюся в том, что эти системы проходят стадии одинаковой с точки зрения симметрии организации [3]. Нечто подобное наблюдается при рассмотрении проблемы формирования людьми центров поселения, где проявляется общий степенной характер зависимостей, характеризующих эту систему. Так, например, зависимость между числом жителей города и его рангом (номером в списке городов, упорядоченном в порядке убывания населения) представляет собой обратную пропорциональность (закон Ауэрбаха, в других областях знания - закон Ципфа или закон Парето), т.е. имеет степенной вид. Существенно, что эта закономерность «работает» для более чем 42 тысяч разномасштабных городов России, за исключением Москвы и Санкт-Петербурга – мегаполисов, для которых характерны иные социально-экономические и экологические закономерности [4].

Важно отметить, что мегаполисы в принципе не способны самостоятельно обеспечить оптимальные условия естественной самоорганизации:

1. воспроизводство основных компонентов природной среды, обеспечивающее баланс вещества и энергии в системе;
2. соответствие степени биогеохимической, гидрологической и физической устойчивости экосистемы уровню техногенного воздействия.

Это связано с тем, что высокая плотность населения и повышенная интенсивность преобразования энергии и «вещества» (материальных ресурсов) требуют перенапряженных режимов функционирования транспортных систем, вследствие чего вся инфраструктура мегаполиса становится относительно неэффективной. Иными словами, «удельный КПД» мегаполиса, по сравнению с менее населенными урботерриториями, относительно мал и снижается пропорционально возрастанию антропогенной нагрузки на природные подсистемы. Перечисленные условия нарушают динамическое равновесие потоков энергии, вещества и информации (увеличивается скорость и уменьшается «условный КПД»), снижают «буферную емкость» природных подсистем и увеличивают нелинейность, а значит и неустойчивость, системных процессов [5].

Например, Москва занимает 0,006% территории России, и при этом на ее территории проживает около 9% населения страны - это мировой рекорд дисбаланса между количеством населения и занимаемой им территорией государства (!). Заметим еще, что Москва, имеющая радиальную структуру, этим самым существенно затрудняет движение автотранспорта и подвижного состава старой системы железнодорожного транспорта, как и всю работу системы коммуникаций и снабжения. Это еще один существенный фактор нелинейного ответа системы на внешние возмущения. Достаточно очевидно, что прямоугольная сетка инфраструктуры (типа Нью Йорка) в большей степени способствует «ламинарному» режиму городского хозяйствования.

Международная консалтинговая компания *Mercer Human Resource Consulting* оценила качество жизни в 215 крупнейших городах мира по 40 показателям (уровень преступности, жилищные условия, экологическое состояние, качество услуг и т.д.). На первом месте оказался Цюрих, а Москва лишь на 171-м в компа-

нии Хараре в Зимбабве и Лагоса в Нигерии. Согласно принятой в Европе норме комфортного проживания плотность населения в городах должна составлять 15 человек на гектар. Однако в Москве этот показатель составляет более 150 жителей/га (примерно как в Гонконге), в то время как в Лондоне - менее 50 человек, а в Париже - всего 40. В настоящее время в столице, по оценкам экспертов, проживает порядка 13 млн. человек, и эта цифра растет. При этом плотность населения в Москве примерно в тысячу раз выше, чем в среднем по России (учитывая малозаселенные территории), и в три раза выше, чем в Северной столице. Вместе с тем нынешний Генеральный план развития Москвы до 2025 года не предусматривает расширения границ столицы.

Согласно докладу Главной геофизической обсерватории им. А.И.Воейкова (Санкт-Петербург), подготовленному по данным спутниковой информации и наблюдений сети станций Росгидромета за последние пять лет, на территории России просматриваются два крупных пятна высокого загрязнения воздуха оксидами азота. Эти два крупных пятна находятся в районе Санкт-Петербурга и Москвы, сообщает MIGnews со ссылкой на журнал «Наука и жизнь».

Основным источником загрязнения воздуха оксидами азота являются промышленные предприятия и автотранспорт. Оксиды азота опасны тем, что попадая в атмосферу они вступают в химические реакции с другими загрязнителями воздуха, в результате чего в приземном слое воздуха образуются скопления вредных газообразных и аэрозольных примесей. А из-за этого и в Москве, и в Санкт-Петербурге возможно более частое образование городского смога.

С учетом того, что ни в Москве, ни в Санкт-Петербурге за последние годы не прибавилось химических и металлургических заводов и ТЭС, остается вне сомнения, что главным загрязнителем двух российских мегаполисов является именно автотранспорт, и количество его в городах неуклонно растет.

Так в Москве наблюдается рекордный прирост автомобильного транспорта: каждый год автопарк столицы увеличивается примерно на 120 тысяч автомобилей, при этом ежедневно в город прибывает порядка 400 тысяч транзитных машин, что не только существенно снижает уровень личной и экологической безопасности граждан, но и пороговый уровень мегаполиса как экосистемы. Согласно данным НИИАТ, львиная доля загрязняющих веществ (ЗВ) в мегаполисах приходится на долю автомобильного транспорта – до 90% от общей массы выбросов (включая соединения серы, азота, углерода, свинца и углеводородов): на порядок больше воздушного, железнодорожного и водного видов транспорта (имеется в виду массовая доля каждого вида отдельно) [6]. В настоящее время автотранспорт Москвы выбрасывает в атмосферу более 1,5 млн. т ЗВ, а с учетом транзитного транспорта эта величина достигает 4-6- млн. т.

В отличие от стационарных промышленных источников ЗВ, автомобильный транспорт рассредоточен по всему пространству УЭС, а его численность, в связи с ростом населения городов, растет несравнимо быстрее. Кроме того, если промышленные входящие газы поступают в атмосферу на высоте более 300 м и, следовательно, рассеиваются ветровыми потоками, то автомобильные ЗВ скапливаются в приземном слое (десятки метров), создавая приземную инверсию температуры и вредных химических элементов. В результате затрудняется воздухообмен по вертикали, поскольку пороговая высота слоя перемешивания 1.5 м.

Следует отметить, что влияние столичного автотранспорта на экологию региона настолько велико, что зона влияния выбросов автомобилей распространяется уже не только на Московскую область, но также и на районы Владимирской, Калужской и Костромской областей. Область высоких концентраций диоксида азота, превышающих ПДК (40 мкг/м<sup>3</sup>) простирается до Коломны, Серпухова, Владимира, т.е. на 100-200 км вокруг мегаполиса. В Санкт-Петербурге и в городах Ленинградской области зона концентраций NO<sub>2</sub> выше 40 мкг/м<sup>3</sup> распространяется от Выборга на северо-востоке до Кингисеппа на юго-западе. Такие печальные данные свидетельствуют о том, что даже в пригородах российских мегаполисов тяжело отыскать экологически чистые районы.

Да и в относительно благополучном с точки зрения экологической ситуации сибирском регионе дела обстоят не лучшим образом. След загрязняющих веществ, создаваемый выбросами предприятий и автотранспорта в крупнейших городах Сибири, который протянулся от Омска до Новосибирска и далее к Кемерово и Новокузнецку, Красноярску и Братску.

#### **Зеленые насаждения**

По самым разным оценкам сосновые леса выделяют кислорода 30 т/га в год, лиственные леса – 16 т/га, сельхозкультуры – 3-10 т/га. В соответствие с правилами СНиПП [7], для устойчивого функционирования экосистемы (в том числе для восполнения потребляемого всеми техногенными источниками кислорода) доля природного каркаса должна составлять не менее 40% от общей площади города. После развала СССР в Москве многократно уменьшилась площадь зеленых насаждений и резко увеличилась плотность застройки. В результате в настоящее время на каждого москвича приходится лишь 25 кв. метров зеленых насаждений, а, например, в Киеве - 210 кв. метров, в Вашингтоне – 400, что, по самым скромным оценкам, гораздо ниже допустимой нормы. Значительное уменьшение площади природного каркаса (за счет замены естественно-природной зоны индустриально-урбанистической, искусственными монокультурами, вследствие уничтожения природных биоценозов) ведет к снижению системной устойчивости.

В результате постоянного воздействия одного из наиболее распространенных ЗВ – диоксида серы в растениях происходит накопление токсических веществ, вызывающих необратимые процессы: например, таким пороговым значением концентрации SO<sub>2</sub> для лиственных растений является 0,5-1,5 мг/м<sup>3</sup>, а для хвойных растений - 0,01-0,001 мг/м<sup>3</sup>. Но нарушение структуры мембран хлоропластов и подавление фотосинтеза начинается уже после 20-30минутного воздействия этого токсиканта, т.е. природная подсистема городов существует в режиме постоянного стресса [6].

Экологи обеспокоены ситуацией, которая сложилась вокруг российских лесов в последние несколько лет. Из-за реформы лесного хозяйства были практически ликвидированы механизмы государственной защиты лесов, ведется захват и застройка лесных земель, а также варварская вырубка лесов. Все это ставит страну на грань экологической и социально-экономической катастрофы в лесной сфере. Несовместимость нового лесного законодательства может привести к тому, что в Подмосковье через 10 лет исчезнет около 12% лесов. Например, с 1991 года в радиусе примерно 25 километров от МКАД исчезло около 4% лесов - это то, что было застроено или вырублено. Новый Лесной кодекс предусматривает понятие так называемой «рекреационной аренды» леса, которая позволяет строить временные

сооружения без определения понятия «временное». Фактически это позволяет вести коттеджную застройку в лесных массивах.

### Почвогрунты

Рост численности населения Москвы и увеличение промышленных мощностей привели к тому, что объем твердых бытовых отходов (ТБО) начал расти буквально в геометрической прогрессии: в 1997 г. - порядка 10-15 млн т, в 2007 г. - 20-25 млн т, из них 17 млн т промышленных отходов, из этого объема утилизируется всего 18%.

Радиус негативного воздействия на почво-грунты и подземные воды в районах расположения свалок ТБО составляет 2-3 км, что влечет загрязнение поверхностных вод (до 2,5 км), изменение теплового баланса (до 0,05 км в глубину) и угнетение растительного покрова (до 0,15 км). Загрязнение подземных вод под зонами ТБО влияет на изменение свойств естественных геохимических барьеров (рН, глеевые, сорбционные), гидродинамических ловушек (бессточные водоемы, болота), донных отложений. Данная проблема, с одной стороны, связана с несбалансированным локальным ростом народонаселения и продуктов метаболизма, а с другой стороны, с необходимостью «грамотной» утилизации ТБО. Так, согласно литературным данным, допустимая удельная величина ТБО в городах составляет  $1\text{ м}^3/\text{чел}$  в год или  $200\text{ кг}/\text{чел}$  в год, а в мегаполисах –  $1,07\text{ м}^3/\text{чел}$  в год или  $200\text{ кг}/\text{чел}$  в год, что значительно превосходит существующие показатели загрязнения ТБО [2].

Геофизические техногенные поля (тепловые, механические и электромагнитные) охватывают практически всю верхнюю часть литосферы в пределах городских агломераций и промышленных центров и оказывают перекрестное влияние на формирование гидробаланса, гео- и биохимические параметры сред. Так, механические поля искусственного происхождения, включающие акустические (шумовые, вибрационные) поля и поля индуцированной сейсмичности, как и блуждающие токи, в ряде случаев генерируют необратимые процессы, поскольку охватывают верхнюю часть литосферы в пределах городских агломераций [2].

Для урботерриторий характерно антропогенное изменение физико-механических свойств почво-грунтов и подземных вод. Оседание верхнего горизонта литосферы включает общее возможное тектоническое движение местности, необратимое уплотнение грунтов под действием статических нагрузок, техногенных вибраций и снижения уровня подземных вод. Так, в условиях мегаполисов скорость проседания поверхностного слоя литосферы для слабых глинистых грунтов может достигать величины до 3 мм в год.

Как известно, подземные воды составляют 14%, от мировых запасов пресной воды на планете, а в некоторых странах - до 70-100%. Дефицит этих ресурсов связан с тремя причинами: природные, техногенное загрязнение и нерациональное использование водоносных горизонтов. Амплитуды колебаний уровня подземных вод на урботерриториях значительно выше, чем в равновесных и слабо неравновесных естественных экосистемах, и, как правило, не подвержены сезонным изменениям. По мере роста интенсивности антропогенных нагрузок на водный бассейн резко возрастают обратные реакции гидросферы - скачкообразное или постепенное снижение качества и уровня подземных вод: гидродинамическая, температурная, гидрохимическая и гидробиологическая аномалии. Требования к влажности почв в границах УЭС выше, чем для других типов экосистем, поскольку на этих

территориях резко снижается потенциал почвенной влаги и возрастает плотность почв. В этих условиях даже при максимальной влагоемкости происходит нарушение гидробиологических процессов (вода менее доступна для всасывания растениями, снижается активность почвенных бактерий) [5].

Однако следует учитывать, что эффективность природного каркаса определяется не только его площадью, но наличием монокультур, а также непосредственным воздействием ЗВ в атмосфере (превышающий те же показатели в естественной среде, как минимум, в 3 раза), почве и подземных водах и изменением минерального баланса и условий питания последних. Учет эффективности природного каркаса позволяет опосредованно учитывать синергизм различных воздействий на экосистему: величину биомассы, площадь и качественный состав (естественные для данной ландшафтно-климатической зоны виды растений и монокультуры) природного каркаса УЭС. Специально отметим, что, в отличие от предлагаемых другими авторами соотношений между техногенно измененной и естественной площадями, предлагается в качестве порогового значения этого соотношения число 1.62 (в соответствии с правилом «Золотого сечения») [8].

### Физические загрязнения. Электромагнитные излучения как фактор антропогенного воздействия

Характерной особенностью крупных городских агломераций является нарушение теплового режима на глубине до 100-300м, при этом температура пород и подземных вод часто превышает фоновую на  $10-40^\circ\text{C}$ , а под «горячим производством», в зонах выработки, подземных транспортных и др. коммуникаций -  $60-100^\circ\text{C}$  [2]. В мегаполисах источники теплового поля увеличивают тепловой поток в 2-3 раза относительно фоновой составляющей, что приводит к нарушению физико-химических свойств среды, росту многопрофильного воздействия загрязняющих веществ (ЗВ) и скорости биодеструкции (увеличение температуры верхнего слоя литосферы на  $10^\circ\text{C}$  ведет к увеличению скорости биодеструкции в 1,5-2 раза) [9]. Когда источник тепла находится вблизи источника уровня грунтовых вод, наблюдается конвективный перенос тепла, т.е. увеличение диссипации, что приводит к расширению зон тепловых аномалий до 30-50%, в зависимости от скорости потока подземных вод. При скорости течения потока более  $0,2$  м/с колонии прикрепленных диатомовых, нитчатых зеленых водорослей способны подниматься со дна на 10-15 см и перемешиваться в потоке, а при скорости менее  $0,1$  м/с – происходит их осаждение в виде плотного донного осадка [9].

Существующая тенденция увеличения использования электромагнитной энергии в хозяйственной деятельности позволяет прогнозировать дальнейшее увеличение электромагнитного загрязнения экосистем. Электромагнитный фон Земли является важным эколого-эволюционным фактором биосферы, но за последнее столетие он на 1-2 порядка превышен техногенными электромагнитными полями (ЭМП), которые отличаются относительно простой частотной организацией, импульсной структурой и пространственной неоднородностью. Формируется высокий техногенный фон неблагоприятных (биофизических, биохимических и медико-биологических) воздействий на экосистемы: ЭМП стали существенным фактором риска для биосферы, особенно в границах урбоэкосистем (УЭС).

Длины волн ЭМП промышленных частот составляют тысячи км (в вакууме и воздухе порядка 6 тыс. км, а в грунтах – 1-3 тыс. км), а сами волны спо-

способны проникать в верхние слои литосферы на значительные расстояния – до десятков и сотен метров (в отличие от высокочастотных полей, характеризующихся скин-эффектом). Существенно, что при таких длинах волн ЭМП могут воздействовать на экосистемы практически независимо по своим электрической и магнитной компонентам, а не только суммарным потоком электромагнитной энергии.

Следует отметить, что оценка последствий воздействия ЭМП на биосферу в целом является чрезвычайно сложной задачей, решение которой возможно лишь с позиций системного подхода, основанного на знании общих принципов, характеризующих динамику режимов экосистем. В научной литературе, как правило, рассматривается воздействие ЭМП на экосистемы в воздушной среде, тогда как большая часть биомассы биосферы сосредоточена в верхних слоях литосферы. ЭМП от наземных источников частично отражаются от земной поверхности, вместе с тем, значительная часть энергии ЭМИ, в зависимости от частотного диапазона, переходит в почво-грунты – активную среду [10].

При этом, несмотря на незначительные энергетические параметры, ЭМП промышленных частот способны вызывать необратимые системные процессы и, что самое важное, возникновение или модификацию автоволновых процессов, присущих активным средам, ввиду чего данный вид антропогенного воздействия вносит значительный вклад в формирование системной устойчивости. В условиях плотной застройки промышленными и жилыми сооружениями формируется высокий неоднородный электромагнитный фон с большими градиентами напряженностей электрической и магнитной компонент ЭМП [10].

Несмотря на актуальность данной проблемы, в настоящее время нормирование ЭМП не является «экологическим». Как правило, это результаты разрозненных исследований, посвященных изучению влияния полей на природные биологические системы организменного и надорганизменного уровня, ориентированные на нормы СанПиН, в 20-200 раз превышающие уровни излучения современных персональных компьютеров (ПК). Ввиду более низкого порогового уровня природных систем, по сравнению с организмом человека, экологический подход к воздействию электромагнитных источников (ЭМИ) дает возможность разработки более совершенных стандартов нетепловых эффектов ЭМП. Известно, что фоновые нетепловые факторы воздействия ЭМП промышленных частот являются не менее существенным биотропным фактором, чем температура, влажность, давление и т.д. и характеризуются скрытым пролонгированным пространственно-временным действием на экосистемы. При этом магнитная, электрическая, электростатическая, тепловая, химическая и др. компоненты воздействия ЭМП, взаимодействуя нелинейно, в различных элементах экосистем проявляют свойство неаддитивности.

Большинство исследований воздействия ЭМИ направлено на изучение их влияния на организм человека для создания и корректировки предельно допустимых уровней (ПДУ) воздействия. При санитарно-эпидемиологическом нормировании внепроизводственных воздействий ЭМП определяется напряженность электрического (ЭП) и магнитного (МП) - магнитная индукция полей. В СанПиН 2.1.2.1002-2000 устанавливаемые ПДУ ЭП составляют 0,5 кВ/м для любых типов жилых помещений и 1 кВ/м на территориях жилой застройки. До недавнего времени в Российской Федерации отсутствовали гигиенические нормы на МП часто-

ты 50 Гц. В настоящее время имеется временный норматив, указанный в СанПиН 2.1.2.1002—2000: внутри жилых помещений - 10 мкТл (8А/м) и на территории жилой застройки - 50 мкТл (40А/м). Как видно из приведенных данных, эти нормы во много раз превышают нормы, определенные для ПК в СанПиН 2.2.2.542-96: ПДУ ЭП 25 В/м и 0.2А/м для МП. Вместе с тем, воздействие на организм человека в долговременном плане может быть опосредованно оценено через устойчивость (или неустойчивость) окружающих природно-антропогенных экосистем. Результаты исследования свидетельствуют о том, что принятые для жилых помещений и территорий жилой застройки нормы обеспечивают безопасность биологических объектов в процессах регенерации и сходного процесса эмбриогенеза. Вместе с тем, уже 10-кратное превышение этих норм, возможное в неоднородных ЭМП, может стать опасным демографическим фактором для человеческого организма и биосистем в целом. В условиях плотной застройки промышленными и жилыми сооружениями в границах УЭС наблюдается как повышенный и неоднородный фон техногенных электромагнитных полей (ЭМП), так и фрагментированный характер биоценозов. Фоновые нетепловые факторы воздействия ЭМП промышленных частот являются не менее существенным биотропным фактором, чем температура, влажность, давление и т.д., и характеризуются скрытым пролонгированным пространственно-временным действием на экосистемы. При этом магнитная, электрическая, электростатическая, тепловая, химическая и др. мишени воздействия ЭМП, взаимодействуя нелинейно, в различных элементах экосистем проявляют свойство неаддитивности. Поэтому, в зонах воздействия ЭМП может существенно изменяться соотношение популяций и видов, что объясняется связью почвогрунтов УЭС с формированием и развитием урбоценозов. Специально отметим, что речь идет не только о высоковольтных линиях как наиболее исследованных объектах, но, в первую очередь, об источниках ЭМИ, непосредственно связанных с объектами, оснащенными сетями электроснабжения, трансформаторами, электродвигателями, коммутационными системами, бытовыми и офисными приборами. В этой связи, воздействие ЭМП на определенные звенья сопряженных процессов является значимым, ввиду того, что синергизм системы определяет трудно прогнозируемую – *контринтуитивную* - обратную связь (как по знаку, так и по величине) [2,10].

Поскольку в местах локализации наземных источников низкочастотных ЭМП мы имеем дело с пространственно несформировавшимися электромагнитными волнами, необходим учет обеих составляющих, т.е. потока мощности, что, с одной стороны, позволяет учитывать величину энергии, а с другой стороны, область перекрытия ЭМП от различных источников в активных средах. Размеры характерных зон неоднородностей интенсивности низкочастотных ЭМП соответствуют размерам биоценозов УЭС (от 30 до 100 м в зависимости от этажности), а средняя величина поглощаемой почвенно-грунтовыми средами от мощности, излучаемой наземными источниками, составляет до 20%. Оба этих фактора должны учитываться в градостроительстве на базе экологических критериев [8,10].

При рассмотрении результатов влияния химических веществ или физических факторов, в основном электромагнитных полей (ЭМП), на биологические (экологические) системы выявлено существование ряда закономерностей: полимодальных дозовых зависимостей, эффективности при наличии уровней воздействия ниже фоновых значений, синергетической модификации системы под действием

последующих воздействий, возможности наступления кризисных ситуаций в результате воздействия малых начальных флуктуаций [10].

#### УЭС как динамические системы

В неравновесных системах, к которым относятся УЭС, при одном и том же наборе начальных условий и малых неоднородностей (вне критических условий функционирования) увеличивается взаимовлияние подсистем (петли отрицательных и положительных обратных связей) и возрастает множество возможных траекторий развития. Иными словами, в нелинейных неравновесных системах малые флуктуации развиваются в «гигантские» [3].

Как открытая система УЭС в целом характеризуется обменом информацией, энергией и веществом, а ее составляющие биота – информацией, энергией, веществом, социум – информацией, абиотическая среда – веществом. При этом все потоки продуцируются как природными элементами, так и антропогенными факторами и характеризуются высокими плотностями скоростей на всех уровнях, что инициирует нелинейный рост потоков. Отсюда вывод: в своем неумеренном росте мегаполисы «руководствуются» не соображениями оптимальности или эффективности полной системы, а следуют неким объективным законам своего развития, основанным на автокатализе, приводящем к лавинному наращиванию энерго- и продуктопотребления, а также к агрессивному территориальному росту [2].

Известно, что каждая система, в которой происходят процессы отслеживания, наведения, саморегуляции (самоорганизации) чаще всего функционирует в колебательном режиме. В пространстве это режим волновой, а в активной среде, где самой системой поддерживается устойчивость – автоволновой. Единство каждой экосистемы, в частности УЭС, определяется общностью геопространства и, в первую очередь, интегрирующими свойствами почво-грунтов и подземных вод. Распределенный характер неравновесных процессов в верхних слоях литосферы позволяет рассматривать ее в качестве первичной активной среды с возможными устойчивыми и неустойчивыми режимами поведения. Следует отметить, что процессы в воздушной среде непосредственным образом напрямую связаны с процессами в геосредах, поэтому анализ устойчивости УЭС строится на базе синергетических представлений об автоволновой самоорганизации в распределенных активных средах со значительным количеством прямых и обратных связей, при этом существенно нелинейной, и может быть описана соответствующей системой уравнений [5].

Нелинейность системных процессов – проявление их неаддитивности, формируемой петлями отрицательных и положительных обратных связей:

- наибольшее количество прямых и обратных связей (петель) приходится на долю природной подсистемы как более стабильной структуры с жесткими взаимосвязями, характерными для живых систем;
- положительные обратные связи, в основном, наблюдаются на внутрисистемном уровне, в то время как отрицательные – между подсистемами, что объясняется противодействием сопряженных подсистем, лимитирующим функциональные возможности системы в целом, в соответствии с *Правилом ограничения факторов* [1].

Формы кооперативного поведения, свойственные живым системам, распространяются на органические системы и тем более на сложные природно-антропогенные системы. Поскольку крупные УЭС – это сверхоткрытые системы,

их естественным состоянием является неустойчивость, значительное место в формировании которой играют необратимые системные процессы. Чем выше несущая способность УЭС (способность к гомеостазу), определяемая интенсивностью антропогенного разрушения и эффективностью отклика природной подсистемы, тем больше шанс для системы избежать необратимых процессов, сохранить экологическое равновесие и приблизиться к состоянию устойчивости.

Следует отметить, что процесс оценки взаимовлияния природно-антропогенных факторов в настоящее время является мало изученным. Кроме того, в зависимости от величины, одни и те же параметры при интерференции природных факторов и антропогенных воздействий могут изменять знак в системе обратных связей. Указанные нелинейные синергетические эффекты требуют дальнейшего специального изучения с использованием модельных подходов.

#### К выбору типа модели УЭС

В литературе встречается достаточно много моделей урбосистем, значительная часть которых основана на использовании адаптированных уравнений диффузии, теплопереноса или гидродинамики [11]. Их объединяет наличие в системе макроскопической разности концентраций вещества, температуры или давлений. Движущей силой в подобных распределенных системах является неравенство в соседних ячейках системы того самого «компонента», который как раз и «перераспределяется». В такой системе энергия и вещество переносятся, и, кроме того, в ней отсутствуют т. н. «трансформаторы» вещества и энергии. Это – пассивная среда. Процессы в пассивной среде могут быть как линейными (ламинарное течение жидкости), так и нелинейными (турбулентный поток).

В качестве примера, иллюстрирующего неприемлемость «очевидных» моделей, напомним, что вязкая жидкость при ламинарном течении в трубе имеет минимальную скорость в пристеночных «трубках тока». Представляется естественным описать движение потока пешеходов или автомобилей с помощью простой гидродинамической модели. Однако, каждый из нас, кто ездил в метро, замечал, что на пути к эскалатору быстрее всех продвигаются люди по краям потока, хотя хорошо на своем опыте знаем, что данная система обладает внутренним трением. В данном случае каждый человек как элемент системы имеет запас скорости и движим не внешней силой, а внутренним запасом энергии, и модель описания такого потока должна быть принципиально отличной от известных гидродинамических моделей. Пример можно расширить на движение автотранспорта на многоуровневых автотрассах, когда слева и справа недисциплинированные водители совершают обгоны с нарушениями правил.

УЭС заведомо относятся к нелинейному классу динамических систем, поскольку, как учит практический опыт управленцев и населения, по всем изложенным выше важнейшим факторам воздействия на них наблюдается синергизм – нарушение *принципа суперпозиции*, присущего линейным системам.

Сущность самоорганизации такой системы состоит в ее зависимости от параметров: система, ввиду неустойчивости симметричного состояния конкурирующих подсистем, «выбирает» режим функционирования. Поэтому математическая модель активной среды может быть применима для анализа устойчивости природно-антропогенных экосистем. УЭС, как сопряженная природно-антропогенная экосистема, является типичной возбудимой активной средой, бла-

годаря чему в ее границах способны распространяться незатухающие волны, процесс самоорганизации которых подчиняется законам активных сред [5]:

- УЭС - макроструктуры, состоящей из возбудимых элементов, что позволяет говорить об упорядоченных структурах в ее границах;
- как активная среда, УЭС содержит распределенный источник воздействия, способный питать энергией (веществом, информацией) идущие в системе процессы в каждой точке пространства и обусловленный когерентным взаимодействием подсистем;
- динамика УЭС определяется нелинейными взаимодействиями между прямыми и обратными связями природно-антропогенных подсистем;
- управляющими параметрами являются природно-антропогенные параметры, формирующие амплитуду автоволн;
- скорость природных процессов (ингибитора) намного меньше скорости активатора, что соответствует скоростям распространения природных (ингибитор) и антропогенных (активатор) процессов в УЭС.

В реальных урбо- и экосистемах запас энергии делокализован, а локальные трансформаторы энергии и вещества ее не переносят, а высвобождают и преобразуют ее сопряженно с преобразованием вещества при наличии «возмущения» в соседних ячейках или при получении управляющего «сигнала» через обратную положительную или отрицательную связь. Ресурс энергии распределен по системе, это - «активная среда». В общем случае их относят к реакционно-диффузионным системам. Разумеется, когда мы говорим о «веществе» и «энергии», в отношении урбо- и экосистем мы имеем в виду «обобщенные», поддающиеся количественному измерению движущие силы. Это может быть и электроэнергия, и топливные запасы, и финансовые ресурсы, и ресурсы рынка труда и т.д. Существенно, что в активной среде обязательно наличествуют локальные преобразователи энергии и вещества, обобщенно обозначаемые как машины. Хотя бы на интуитивном уровне мы осознаем, что в урбоэкосистемах подобные преобразователи работают наиболее интенсивно.

По изложенным выше соображениям предельно редуцированная модель, адекватно описывающая УЭС крупных городов и мегаполисов, должна включать уравнения, описывающие иерархию активных сред. По-видимому, УЭС целесообразно представить двумя активными средами — природной и антропогенной подсистемами, иерархически связанными между собой сетью положительных и отрицательных обратных связей. Экологический смысл обратных связей состоит в учете горизонтальных взаимосвязей внутри каждой из активных сред и вертикальных связей между ними, физическое наполнение которых включает количественное отображение системных факторов, рассмотренных выше. Цель создания модели состоит в выявлении условий поддержания устойчивых режимов функционирования УЭС.

Работа выполнена при частичной поддержке Гранта РФФИ 08-05-12031-офи

#### Литература

1. Сидорова А.Э., Твердислов В.А. Экос. Грани устойчивости // Экология урбанизированных территорий. – 2008, №1. – М.: Изд. Дом «Камертон». - С. 6-14.

2. В.А. Твердислов, Сидорова А.Э., А.В. Дмитриев. Синергетические аспекты региональной и глобальной экологии: Учебное пособие. – Липецк: ГУ «Издательский дом «Липецкая газета», 2009. – 352 с.

3. Твердислов В.А. Активные среды. От физико-химических – к экологическим и социальноэкономическим системам. // Экология урбанизированных территорий. – 2006, №4. – М.: Изд. Дом «Камертон». - С. 6-14.

4. А.В. Подлазов. Теоретическая демография. Модели роста народонаселения и глобального демографического перехода в: «Новое в синергетике: Взгляд в третье тысячелетие». – М.: Наука, 2002. – С. 324-346.

5. Сидорова А.Э. Урбоэкосистемы как активные среды: автоволновая самоорганизация и устойчивость. // Физические проблемы экологии (Экологическая физика): Сб. научных трудов. / Под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева. – М.: МАКС Пресс, 2007, № 14. - С. 293-307.

6. В.Р. Битюкова. Социально-экологические проблемы развития городов России. Изд. 2-е, испр. – М.: Книжный д-м «Либроком», 2009. – 448 с.

7. Обеспеченность промышленных и селитебных территорий города зелеными насаждениями. – М., 1984. – 134 с.

8. А.Э. Сидорова. Урбоэкосистемы как активные среды. Критерии системной устойчивости. // Экология урбанизированных территорий. – 2007, №4. – М.: Изд. Дом «Камертон». - С. 6-15.

9. А.Е. Кузнецов, Н.Б. Градова. Научные основы экибиотехнологии. – М. Изд-во «Мир», 2006. – 503 с.

10. В.А. Антонов, А.Э. Сидорова, Л.В. Яковенко. Воздействие электромагнитных полей промышленной частоты на устойчивость био- и урбоэкосистем. // Экология урбанизированных территорий. – 2007, №1. – М.: Изд. Дом «Камертон». - С. 25-34.

11. В.В. Семенов. Математические методы моделирования транспортных потоков в: «Новое в синергетике». – М.: Наука, 2002. – 281 с.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ АТМОСФЕРНОЙ ВЛАГИ НА ВОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

А. А. Соловьев, К. В. Чекарев

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова,

Географический факультет

Разработан экспериментальный метод измерения коэффициентов конденсации паров атмосферной влаги на водную поверхность. С помощью созданного лабораторного комплекса измерительных средств выполнены прямые измерения коэффициента приводной конденсации атмосферной влаги в отсутствии воздушных течений. Обсуждаются вопросы использования полученных данных о величине стоков паров атмосферной влаги на поверхность водосборных бассейнов для уточнения существующих оценок составляющих водного баланса.

### Введение

В современных оценках водного баланса гидросферы до сих пор остается количественно неопределенная составляющая баланса воды, которая связана с конденсацией атмосферной влаги на водную поверхность [1-5]. В значительной степени это связано с трудностями экспериментального определения величины приводной конденсации и отделения ее доли от других приходных составляющих водного баланса [6-8]. Существует не подкрепленная фактическими данными точка зрения, согласно которой величиной конденсации паров атмосферной влаги на поверхность водосборных бассейнов пренебрежимо мала по сравнению с осадками и стоками [9]. Поэтому, обычно предполагается, что при расчетах водного баланса для замыкания балансных соотношений вполне достаточно условно её учитывать вместе с осадками и испарением [2]. Этот подход может оказаться не вполне корректным при сопоставимости вероятной величины приводной конденсации с ошибкой определения других элементов баланса. Использование других существующих расчетных методов водного баланса также обладает рядом недостатков, из-за сложности учета особенностей аэро- и гидродинамики приводного слоя, наличия трудноопределимых коэффициентов как состояния воды, на поверхности которой происходит конденсация, так и эффективной площади испаряющей поверхности, количества влаги в атмосферном воздухе [3].

Это далеко не единственные факторы, которые не исчерпывают всех вопросов, возникающих при изучении роли приводной конденсации паров атмосферной влаги в водном гидрологическом балансе. При изучении конденсации кроме общих вопросов связанных географией водных объектов, наличия годового, сезонного и суточного хода процессов испарения и конденсации, влияния погодных условий возникает много частных, но очень важных задач, требующих специального изучения. Среди них - образование конденсационной влаги из туманов, зависимость конденсации от скорости воздушного потока, приземного распределения по вертикали температуры и влажности. Кроме перечисленных выше особенностей анализа конденсационного вклада в водный баланс имеется и ряд специфических. К их числу относится необходимость учета турбулентной структуры воздушных потоков, возможностей переноса влаги из местных испаряющих источников, конденсационных сорбционных процессов разных видов (капельной конденсации, молекулярной и пр.). Исследований по всем этим направлениям пока немного и результаты их весьма противоречивы.

Все из выше перечисленного свидетельствует об исключительной сложности проблемы. Это и побудило авторов провести первоначальное экспериментальное изучение «нулевой» конденсации паров атмосферной влаги на водную поверхность при абсолютно неподвижном воздухе в специально созданной лабораторной

климатической камере. Такая постановка задачи преследует цель определения практической значимости конденсационного стока по отношению к другим элементам водного баланса при различных вариациях основных приходно-расходных факторов.

### Описание экспериментальной установки

Для определения зависимости скорости конденсации паров атмосферной влаги на водную поверхность от температуры и влажности воздуха, а также температуры поверхности воды, на которой происходит конденсация паров воды, была создана установка, с климатической камерой, в которой эти параметры поддерживались с высокой точностью. Схема установки приведена на рис 1.

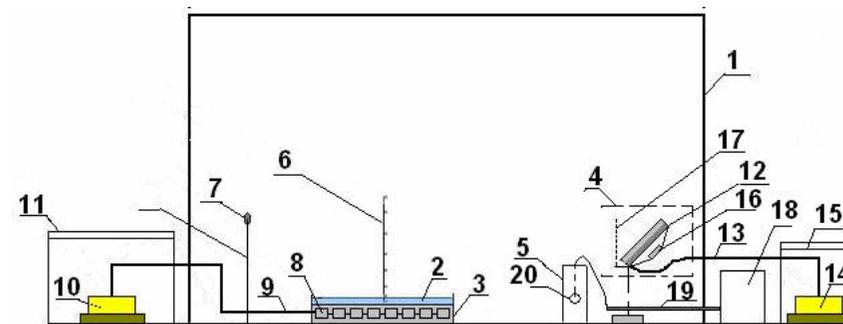


Рис. 1. Схема лабораторной установки для исследования конденсации паров влаги содержащейся в воздухе на водную поверхность.

Климатическая камера 1 имела размеры по длине 1,8 м, высоте 1,5 м и ширине 0,72 м. Её стенки были изготовлены из термоизоляционного материала, покрытого изнутри металлизированной отражающей поверхностью. Передняя стенка камеры состояла из раздвижных окон. Находящийся внутри камеры воздух с парами воды находился в полностью изолированном состоянии от окружающей воздушной среды. Герметизация камеры исключала возможность возникновения в ней воздушных потоков в результате проникновения воздуха из внешней среды.

В камере 1 находилась мерная кювета 2, с открытой на атмосферу водной поверхностью, установленная на термостатирующей емкости 3, регулятор температуры воздуха 4 и регулятор влажности воздуха 5, с помощью которых задавались и поддерживались температура, влажность воздуха и температура воды. Внутри камеры были установлены датчики температуры 6 и влажности 7 для измерения этих величин на различных уровнях от поверхности воды по вертикали (рис. 2).

а)

б)

в)

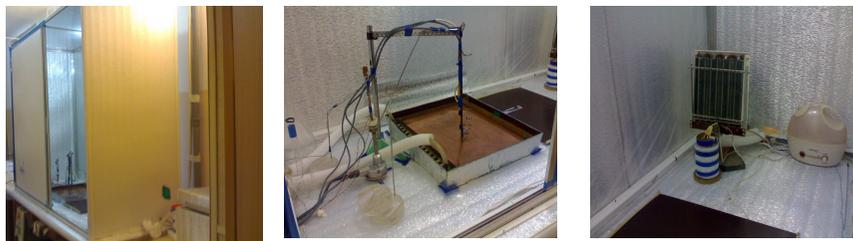


Рис. 2. Климатическая камера (а); мерная кювета (б); регулятор температуры и влажности (в).

Температура воды, на поверхности которой конденсировались содержащиеся в воздухе пары воды, задавалась с помощью регулятора температуры воды. Он состоял из термостатирующей емкости 3, на дне которой находился теплообменник 8 с размерами (36 x 34 x 2) см, соединенный трубками 9 с гидронасосом 10, расположенном в термостате 11. В термостат наливалась жидкость заданной температуры, которая с помощью гидронасоса прогонялась через теплообменник. На теплообменник помещалась мерная кювета 2. Она была выполнена из медной фольги толщиной 0,02 см и имела размеры (36 x 33,7 x 1,3) см. В неё наливалась вода объемом один литр с глубиной слоя воды 0,824 см. Температура воды в мерной кювете 2 поддерживалась постоянной при прокачке воды из термостата 11 через теплообменник 8 при одинаковом уровне жидкости в термостатирующей емкости 3 и воды в кювете 2.

Температура воздуха в камере задавалась и поддерживалась с помощью регулятора температуры воздуха 4. В его состав входили теплообменник 12, соединенный трубками 13 с гидронасосом 14, расположенным внутри термостата 15, в который наливалась вода заданной температуры. Теплообменник был заключен в кожух, внутри которого был расположен вентилятор 16. Перед теплообменником находился нагреватель 17, выполненный в виде проволочной спирали, закрепленной рядами на рамке. Нагреватель был соединен через выключатель с источником регулируемого напряжения. Температура измерялась с помощью платинового датчика температур марки 700-102ВАА-В00 с точностью  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ .

Влажность воздуха в камере задавалась и поддерживалась с помощью регулятора влажности. Он состоял из малой 5 и большой 9 емкости, соединенных трубкой и образующих сифон. Малая емкость была теплоизолирована от окружающей среды. Внутри нее находился нагреватель 20, соединенный через выключатель с источником регулируемого напряжения. Влажность измерялась датчиком ИРТВ-5215. Погрешность относительной влажности не превышала 0,25% единицы младшего разряда. Влажность измерялась в процентах.

Для измерения температуры и влажности в верхней части камеры на стойке высотой 30 см от дна камеры располагались датчики температуры и влажности. В состав установки также входила стойка с датчиками температуры, расположенными на различных уровнях для измерения градиента температур над поверхностью воды. Она устанавливалась в центр мерной кюветы с помощью кронштейна. На

основании предварительных экспериментов были выбраны следующие высоты для датчиков температуры. Три первых платиновых датчика температуры марки 700-102ВАА-В00 с размерами (0,21 x 0,23 x 0,09) см помещались так, что их верхние плоскости находились на расстояниях  $H_1=0,9$  см,  $H_2=1$  см и  $H_3=1,1$  см от дна мерной кюветы. Это означает, что датчик 1 касался воды, датчик 2 находился в области (0,18-0,09) см над поверхностью воды, а датчик 3 находился в области 0,28-0,19 см над поверхностью воды. Точность измерения температуры этими датчиками составляла  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ . Датчики 4-9 находились от дна мерной кюветы на высотах соответственно: 2;3;5;10;15;27 см. Точность измерения температуры указанными датчиками  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

Скорость конденсации паров воды атмосферной влаги на водной поверхности в экспериментах определялась через измерение объема сконденсированной воды на открытой поверхности мерной емкости за определенное количество времени.

### Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились следующим образом. В начале эксперимента термостаты 2 и 11 наполнялись льдом, в них заливалась вода, и включались гидронасосы 10,14. Если температура внутри камеры была ниже комнатной, то одновременно наполнялся льдом термостат 2, наполнялся водой и включался гидронасос 10. Гидронасосы прогоняли воду как термостатирующую жидкость соответственно через теплообменник 8 мерной кюветы через теплообменник 1 регулятора температуры воздуха. В термостатирующую емкость 3 наливалась вода из термостата 11 таким образом, чтобы она доходила до верхнего края теплообменника. После этого на теплообменник помещалась мерная кювета 2 и устанавливалась стойка с датчиками температур для измерения температурного градиента над поверхностью воды. Через время порядка 15 минут температура вытекающей воды из теплообменника 8 становилась равной  $(1 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ . В это время в емкости 5 и 9 регулятора влажности заливалась теплая вода, и включался вентилятор 16, прогоняющий воздух через теплообменник 12. Для того, чтобы над поверхностью воды в мерной кювете не возникали горизонтальные перемещения воздуха, плоскость теплообменника устанавливалась под углом  $10^\circ$  с вертикалью. Визуализация воздушных потоков в камере показала, что именно при такой ориентации воздушного теплообменника перемещения воздушных потоков над мерной кюветой отсутствуют. После того, как вытекающая вода из теплообменника принимала заданное значение  $(1 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ , мерная кювета насухо вытиралась и в нее наливалась вода из мерной колбы объемом один литр с температурой близкой к  $0^\circ\text{C}$ . Чтобы предотвратить всплытие мерной кюветы в термостатирующей емкости в нее доливалась вода из термостата 11 до уровня немного ниже уровня воды в мерной кювете. После этого термостатирующую емкость и мерную кювету закрывали крышкой с узкой прорезью для стойки с термодатчиками. Затем раздвижные окна климатической камеры закрывались и герметизировались сверху и сбоку. На этом завершался начальный этап экспериментов, в результате которого установка была готова для задания нужных параметров температуры и влажности.

Следующий этап экспериментов связан с установкой заданных параметров воздушной и водной среды. Для этого нагреватели воздуха и воды для создания пара и 8 подключались к источникам питания. С помощью нагревателя 17 изме-

нялась температура воздуха в камере, а при включении нагревателя 20 начинался процесс парообразования, в результате чего влажность в камере повышалась. После того как достигались нужные параметры температуры и влажности, напряжения источников питания выставлялось на определенные в предварительных опытах значения. Регулировкой напряжения источников питания, устанавливались фиксированные значения температуры и влажности воздуха в камере.

Поле этого, не раскрывая окна камеры с помощью специального рычага манипулятора, выведенного за пределы камеры, снималась крышка, закрывавшая термостатирующую емкость и мерную кювету. С этого момента начинался измерительный этап экспериментов, отсчет времени, которого фиксировался. Значения температуры измеряемой датчиками 1-9 регистрировались через 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75 и 90 минут. Эксперименты продолжались в течение 1 час 30 минут. После завершения измерений выключались нагреватели регуляторов воздуха и влажности, вентилятор и гидронасосы.

Заключительный этап экспериментов был связан с определением количества сконденсированной на воду мерной кюветы паров воды, содержащихся в климатической камере. Для этого сдвигалось одно раздвижное окно камеры, отводилась в сторону от мерной кюветы стойка с термодатчиками и сливалась вода из термостатирующей емкости. Далее в специальный держатель, закрепленный на мерной кювете, вставлялся шланг диаметром 0,8 см, и с его помощью вода через сифонный слив направлялась в ту же колбу, из которой она наливалась. Таким образом, исключались потери воды на стенках колбы. После того, как основное количество воды из мерной кюветы вода переливалось в колбу, и процесс сифонного перелива через трубку прекращался, мерная кювета снималась с теплообменника. Ее наружные стенки и дно тщательно осушались, после чего остатки воды аккуратно сливались в стаканчик. Вода, из стаканчика доливалась в мерную колбу до риски, соответствующей количеству до конденсации и равному одному литру. Оставшаяся после этого вода в стаканчике являлась водой, которая сконденсировалась во время экспериментов. Ее количество измерялось мерной колбой с точностью до 0,1 г.

#### Результаты экспериментов и их обсуждение

Всего было проведено 150 экспериментов при различных условиях. Далее приводятся данные опытов по изучению конденсации паров воды во влажном воздухе при влажности воздуха 80% и изменении температуры воздуха в камере в интервале от 20 до 50 °С.

На рис. 3 приведен график зависимости температуры воздуха на различных уровнях  $h_i = (H - 0,824)$  см ( $i=1,2...9$ ) над поверхностью воды при влажности воздуха 80%. Как видно из графика температура на всех уровнях меняется линейно с изменением температуры воздуха в камере. По этому графику были получены градиенты температуры воздуха над поверхностью воды при различных температурах воздуха в камере. Некоторые из них представлены на рис.4. Как видно из рисунка, наибольшие изменения температур происходит в интервале высот ( $h_4 \div h_5$ ), т.е. в интервале (2,2 ÷ 4,2) см над поверхностью воды.

По данным, представленным на рис. 3, была построена функция зависимости температурного коэффициента от высоты уровня над поверхностью воды. График этой зависимости представлен на рис.5. По графику этой зависимости в более

крупном масштабе была определена предполагаемая температура поверхности воды, на которой происходит конденсация паров воды.

С помощью прямых измерений определение температуры поверхности воды представляется затруднительным. Эти данные были использованы для построения зависимости скорости конденсации содержащихся в воздухе паров воды на поверхности воды при влажности воздуха 80% от разности плотности паров воды в камере и насыщенной плотности паров при температуре, равной температуре поверхностного слоя воды.

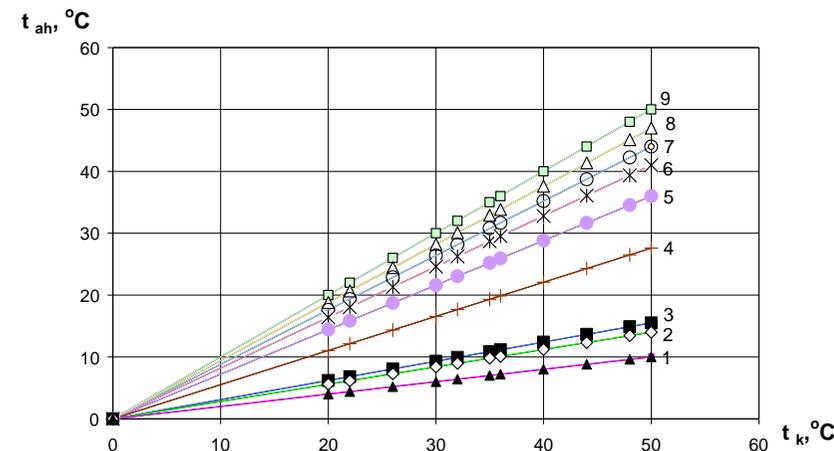


Рис. 3. Зависимость температуры воздуха  $t_{ah}$  на разных уровнях  $h$  от поверхности воды от температуры воздуха  $t_k$  в климатической камере при влажности 80%:  
1-  $h=0$ см; 2-0,1; 3-0,2; 4-1; 5-2; 6-4; 7-9; 8-14; 9-26см.

График этой зависимости представлен на рис.6. Ход кривой хорошо аппроксимируется функцией, построенной на аналогии определения скорости тока через проводник в зависимости от приложенной разности потенциалов, т.е. закона Ома.

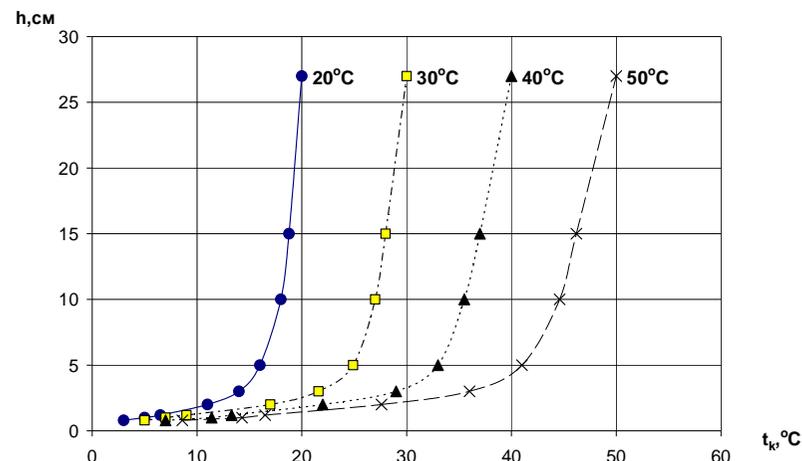


Рис. 4. Вертикальные профили температуры воздуха над водной поверхностью в климатической камере с влажностью воздуха **80%** и различной температурой воздуха в камере (**20°C;30°C;40°C;50°C**) на уровне **26 см** от водной поверхности.

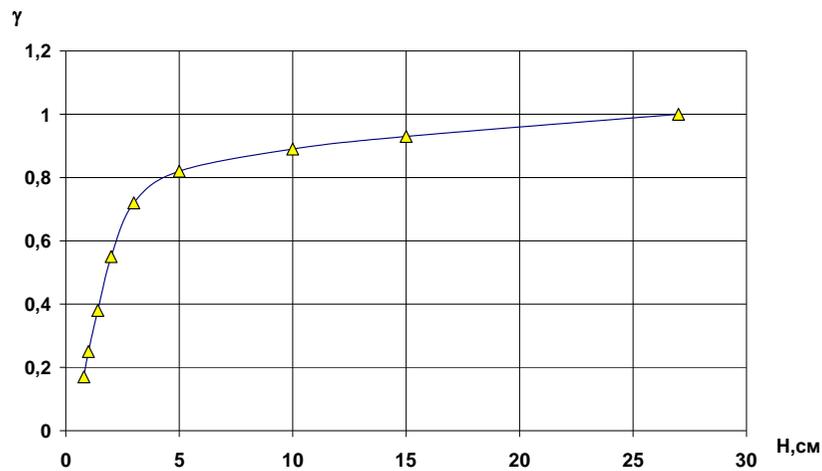


Рис. 5. Изменение с расстоянием  $H$  по вертикали от дна мерной кюветы с водой температурного коэффициента линейных зависимостей температуры воздуха на различных уровнях от температуры в климатической камере  $\gamma = dt_{ah}/dt_k$ .

Поскольку приведенная функция отличается от линейной, соответствующей закону Дальтона  $\Delta h = C(\rho_s - \rho_0)$ , было высказано предположение о зависимости

скорости потока молекул воды в воздухе при конденсации на водной поверхности от температуры воздуха. По аналогии с законом Ома, скорость потока молекул воды в зависимости от разности плотностей пара  $\Delta \rho$  в камере и на поверхности воды, может быть представлена в виде

$$\Delta h = \frac{\Delta \rho}{R(1 + \alpha t)} \quad (1)$$

Здесь  $[\Delta h] = \frac{i \cdot i}{i^2 \cdot \Delta h}$ , а знаменатель  $R(1 + \alpha t)$  формально имеет значение сопротивления воздуха, зависящее от температуры. По двум реперным точкам были определены значения воздушного сопротивления  $R$  и температурного коэффициента  $\alpha$ . Они оказались равными:

$$R = 152,68 \frac{\tilde{a} \cdot \Delta h}{i \cdot i}, \quad \alpha = 0,0177 \text{ 1/} \tilde{a} \Delta h$$

Значение воздушного сопротивления и температурного коэффициента можно предвычислить, следуя кинетической теории конденсации, в которой предполагается, что характерная скорость необходимая для проникновения молекул из воздуха в воду определяется теплотой конденсации [1,13]. Расчет с использованием формулы (1) зависимости скорости конденсации паров воды на водной поверхности при фиксированной влажности находится в хорошем соответствии с данными измерений (рис. 7).

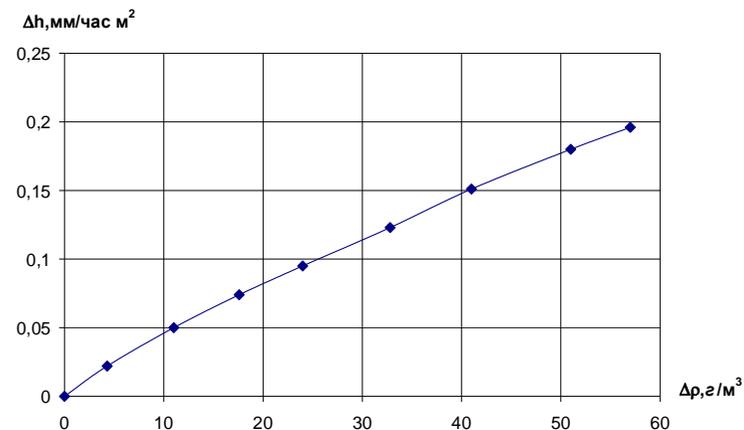


Рис. 6. Зависимость скорости конденсации от разности плотности  $\Delta \rho = \rho_s - \rho_0$  Упругих паров  $\rho_s$  в воздухе с влажностью 80% и плотности насыщения паров  $\rho_0$  при температуре воды.

Аналогичные зависимости могут быть получены для зависимости скорости конденсации от температуры на любом уровне по вертикали от водной поверхности. Такое представление может оказаться полезным, поскольку было обнаружено,

что при изменении скорости конденсации в лабораторном эксперименте наибольшие изменения температуры происходят в интервале между уровнями  $h_4=1\text{ см}$  и  $h_5=2\text{ см}$ , т.е. в той области, где наблюдаются самые резкие изменения градиента температур по вертикали.

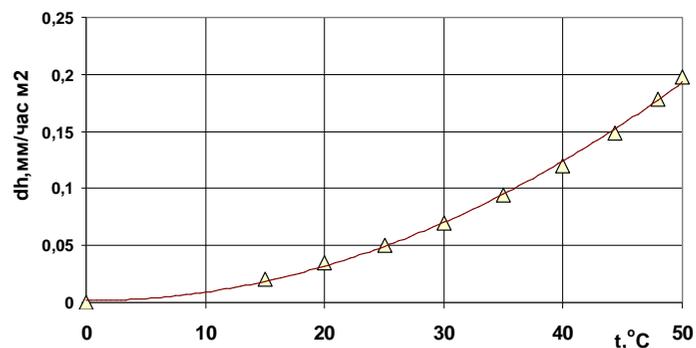


Рис. 7. Зависимость скорости конденсации паров атмосферной влаги на водную поверхность в климатической камере от температуры воздуха при влажности 80%. Точки – эксперимент, линия – расчет по формуле (1).

### Выводы

Таким образом, созданная на основе климатической камеры лабораторная установка и разработанная методика прямого измерения коэффициентов конденсации паров атмосферной влаги на водную поверхность позволяет проводить изучение влияния на конденсационный сток водного баланса различных термодинамических и гидроаэродинамических характеристик воздушной и водной среды.

Установленная в экспериментах нелинейная зависимость величины конденсации от избытка влажности отличается от закона Дальтона. Отклонение от закона Дальтона может быть описано с использованием предположения о линейном соотношении нисходящих потоков молекул и сил, вызванных разностью концентраций влажности в приводном слое.

Полученные в экспериментах оценочные средние значения коэффициента конденсации атмосферной влаги на водную поверхность  $0,017 \text{ л/м}^2\cdot\text{час}$  в расчете на среднегодовую температуру мирового океана  $12^\circ\text{C}$  обеспечивают конденсационный сток воды из атмосферы в океан в  $151 \text{ мм/год}$ , согласующийся с величиной разности осадков и испарения в балансе воды Материки - Мировой океан.

В заключении выражаем благодарность за помощь в организации экспериментов С.И.Зайцеву, В.А.Никитиной, К.П. Павловскому, Н.В. Радомскому.

### Литература

1. Шулейкин В.В. Физика моря. – М.: Наука, 1968. Р.844-860.
2. Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. Том 1. Гидрофизика. – М.: Физический факультет МГУ, 2002.
3. Клизе Р.К., Данилов Н.И., Коницев В.Н. История гидросферы. – М.: Научный мир, 1998. 369 с.
4. Лосев К.С. Вода. Л.: Гидрометеиздат, 1989.
5. Тугаринов В.В. Некоторые результаты изучения конденсации водяных паров из воздуха. // Вопросы изучения подземных и инженерно-геологических процессов. – М.: Гостехиздат, 1955. –С.60-78.
6. Алексеев В.В., Рустамов Н.А., Иванов В.Н., Дубовская В.А. Экспериментальное изучение процесса наземной конденсации влаги // Доклады РАН.-2003. Т.393. №1. С.97-100.
7. Nikolayev V., Beysens D., Gioda A., Milimouk I., Katiushin E., Morel J.P. Water Recovery from Dew. // Journal of Hydrology.-1996. № 182. Р. 19-25 .
8. Неизвестный А.И. Результаты экспериментального определения коэффициента конденсации воды. – Обнинск, 1976. - 52с.
9. Хилл М.М. Море. Развитие идей и наблюдений, связанных с изучением морей. Перевод с англ. под ред. В.В.Тимонова. Л.: Гидрометеиздат, 1965. С.5-57.
10. Newell R E., Newell N E., Zhu Y.S. Courtney tropospheric rivers? A pilot study. // Geophysical Research Letters. - 1992. V. 19. № 24. P. 2401-2404.
11. Соловьев А.А. Исследования возобновляемых источников воды // Энергетическая политика. -2008. №3. С.39-45.
12. Соловьев А.А., Зайцев С.И., Павловский К.П. Проблема потребления водных ресурсов и конденсаторы атмосферной росы. // Физические проблемы экологии. - М.: Макс Пресс, 2008. С.352-358.
13. Эйкен А. Курс химической физики. Т.1. М.: ОНТИ, 1935.

### РОЛЬ ТЕПЛО - ВЛАГООБМЕНА ВОДОЕМА С АТМОСФЕРОЙ В ТЕПЛОМ БАЛАНСЕ ВОДОЕМА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЯХ

Д.А. Соловьев

Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН

В работе рассматривается математическую модель аналога природного пресноводного водоема длиной 10 км и глубиной 80 м с наклонным дном. При моделировании термодинамических процессов в водоеме, в уравнении теплового баланса [3]  $c_p \rho_a \frac{\partial T}{\partial t} = (1-A)Q_R + Q_T \pm Q_L \pm Q_0 \pm Q_D$  был учтен радиационный ба-

лансовый поток тепла  $Q_R$ , потоки скрытого  $Q_L$  и явного тепла  $Q_T$  между водоемом и атмосферой, а так же контактный теплообмен, осуществляющийся посредством турбулентного потока  $Q_0$  и  $Q_D$  - поток тепла от дна. Направление этих потоков может быть положительным, либо отрицательным в зависимости от начальных условий численной модели.

Расчеты обмена потоков явного и скрытого тепла производятся с использованием уравнений переноса классической физики [1], которые после соответствующей

щих преобразований можно представить в виде  $Q_T = \rho_a c_p C_T (T - T_{air}) V$ ,  $Q_L = LC_q (q - q_{air}) V$ , где  $A$  – альbedo водной поверхности,  $\rho_a$  – плотность воздуха,  $c_p$  – теплоемкость воздуха при постоянном давлении,  $C_T$  и  $C_q$  – коэффициенты Стентона для переноса тепла и влаги, соответственно,  $L$  – скрытая теплота парообразования,  $T_{air}$  и  $q_{air}$  – температура и удельная влажность воздуха,  $T$  и  $q$  – температура поверхности воды и удельная влажность вблизи ее поверхности,  $V$  – скорость ветра над поверхностью водоема,  $Q_R$  – суммарный поток лучистой энергии от солнца,  $t$  – время.

Удельную насыщающую влажность воздуха  $q$  вблизи подстилающей поверхности можно выразить через насыщающую влажность  $\Phi$  при температуре подстилающей поверхности  $T$  следующим образом [1]:

$$q = \Phi(T) = \Phi(T_{air} + (T - T_{air})) = \Phi(T_{air}) + \frac{\partial \Phi}{\partial T} (T - T_{air})$$

Удельную влажность воздуха представим как  $q_{air} = f \cdot \Phi(T_{air})$ , где  $f$  – относительная влажность воздуха. Тогда,

$$Q_L = LC_q (q - q_{air}) V = (1 - f) \Phi(T_{air}) + \frac{\partial \Phi}{\partial T} (T - T_{air}), \text{ где } \Phi(T_{air}) - \text{ насыщающая влажность воздуха.}$$

Модель включает в себя течение несжимаемой вязкой жидкости, находящейся в поле сил тяжести, в области с наклонным дном. Для описания термогидродинамических процессов в вязкой несжимаемой жидкости используется система уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска и уравнение теплопроводности. К системе уравнений гидротермодинамики присоединяется уравнение состояния для пресной воды. Предполагается, что крупномасштабные конвективные структуры в водоеме формируются в турбулентной среде. Это позволяет записать исходную систему уравнений движения в виде уравнений турбулентности О. Рейнольдса [2]. Построенная система уравнений замыкается с помощью коэффициента турбулентной вязкости, который вычисляется в ходе решения задачи. На границах области решения задаются соответствующие весеннему периоду граничные условия для температуры, характерные для природных водоемов средней полосы России. В начальный момент времени движение жидкости в водоеме отсутствует, и значение температуры на поверхности устанавливается несколько меньше, чем значение максимальной плотности для пресной воды - около 4°C.

В ходе численного эксперимента проводилась оценка величин потоков  $Q_T$ ,  $Q_L$  при различных значениях скорости ветра и перепада температуры вода – воздух. Расчеты показали, что их величины при определенной гидрометеорологической ситуации могут давать вклад соизмеримый с радиационным потоком тепла от Солнца. На рис.1 представлены зависимости средних значений явного  $Q_T$ , скрытого  $Q_L$  и их суммы  $Q_\Sigma$  от скорости ветра при различных перепадах температур вода – воздух ( $T - T_{air}$ ) и относительной влажности воздуха 60%. В оценочных расчетах использовалось среднее значение температуры воды на поверхности водоема  $T$  установившееся через 21.7 суток после начала его прогрева, равное 3.987°C. Как видно из рис.1 потоки явного и скрытого тепла увеличиваются с увеличением скорости ветра. При этом направление этих потоков зависит от перепада температуры вода – воздух. Рассматривались два характерных случая:  $T < T_{air}$  и  $T > T_{air}$ . В слу-

чае, когда температура воздуха выше температуры воды могут наблюдаться разные ситуации.

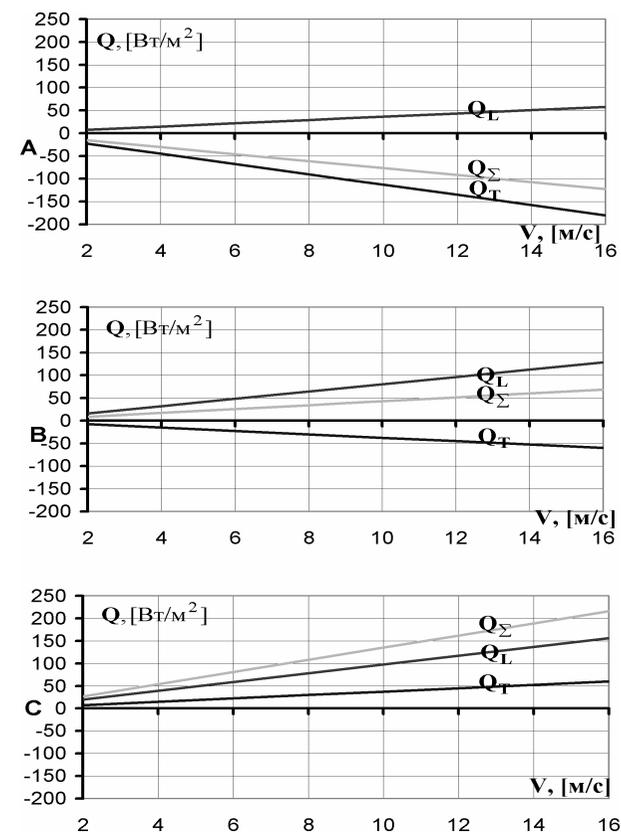


Рис.1. Зависимость средних значений явного  $Q_T$  и скрытого  $Q_L$  потоков тепла и их суммарного  $Q_\Sigma$  от скорости ветра  $V$  в момент времени  $t = 21.7$  суток после начала прогрева водоема при различных значениях температуры воздуха. Случай А -  $(T - T_{air}) = -6^\circ C$ , случай В -  $(T - T_{air}) = -2^\circ C$ , случай С -  $(T - T_{air}) = 2^\circ C$ .

В случае (А) (рис. 3.1, А), когда воздух теплее воды на 6°C, явный и скрытый потоки тепла имеют разные направления. Явный поток тепла направлен в водоем, а скрытый в атмосферу. При этом суммарное их значение приводит к дополнительному нагреву поверхностных вод и, следовательно, к увеличению скорости распространения термобара.

При меньшем перепаде вода-воздух (случай В) ( $T - T_{air} = - 2^{\circ}\text{C}$ ) суммарный поток тепла направлен в атмосферу, что связано с преобладанием скрытого потока тепла над явным потоком тепла. В случае С) при ( $T - T_{air} = 2^{\circ}\text{C}$ ), как явный, так и скрытый потоки тепла направлены из водоема в атмосферу, что приводит к охлаждению поверхности воды.

Как видно из приведенных оценок потоки скрытого и явного тепла могут приводить как к дополнительному нагреву, так и охлаждению поверхностных вод.

Кроме того, следует отметить, что весной температура поверхностных вод в прибрежной области и глубинной части водоема значительно различаются. Это различие может составлять несколько градусов Цельсия. При этом направление суммарного потока скрытого и явного тепла может иметь разные знаки на протяжении поверхности водоема. В то время как в глубинной части водоема может происходить дополнительный нагрев поверхностных вод (из-за большой разницы температур вода-воздух), в прибрежной области – остывание (из-за значительно меньшей разницы температур вода-воздух).

Из проведенных оценок следует, что учет этих потоков в граничных условиях при построении численных моделей природных водоемов является существенным. Суммарное их значение может приводить к изменению скорости конвективных плотностных течений (до 25%) пропорционально дополнительно поступившему в толщу воды количеству тепла.

#### Литература

1. Шулейкин В.В. Физика моря. 3-е изд. АН СССР, М.: , 1953. с.1085
2. Нигматулин Р.И., Блохина Н.С., Соловьев Д.А. Динамика развития весеннего термобара в водоеме большого размера. //Состояние и перспективы взаимной интеграции производства с достижениями механики /Сборник научных трудов, посвященный памяти академика Х.А.Рахматулина. Узбекистан: Карши, 2003. С.7-16.
3. Пивоваров А.А. Термика пограничных слоев океана и атмосферы. М.: Изд-во Московского университета, 1986. 129с.

ИЗМЕНЕНИЕ ПЕРИОДА СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОДНОРОДНОГО  
ОКЕАНА В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

<sup>1</sup>Соловьев Д.А., <sup>2</sup>Нигматулин Р.И.

<sup>1</sup>Учреждение Российской академии наук Институт океанологии им. П.П.Шириова РАН

<sup>2</sup>Научный Центр нелинейной волновой механики и технологии РАН

Задача формирования и прогноза изменений климата Земли принадлежит к числу наиболее актуальных проблем экологической физики. Климат – это глобальная характеристика планеты, которая определяется множеством факторов, важнейшим из которых является ее вращение. Известно, что вращением Земли обусловлены явления приливной эволюции, движение полюсов, суточной и сезонной инсоляции, а так же собственных колебаний океана, или крупномасштабных планетарных волн. Свойства крупномасштабных планетарных волн, существенно отличаются от свойств поверхностных гравитационных волн. Так, например, экваториальные волны Россби, имея пространственные масштабы в сотни километров, локализируются вдоль экватора и проявляются не в изменении уровня, а, прежде всего в форме вихревых течений, которые оказывают существенное влияние на термогидродинамику океана, взаимодействие атмосферы и океана, климат и погоду. Собственные колебания изменяют форму поверхности однородного океана, которое в свою очередь приводит к перераспределению воды на Земле (рис. 1).

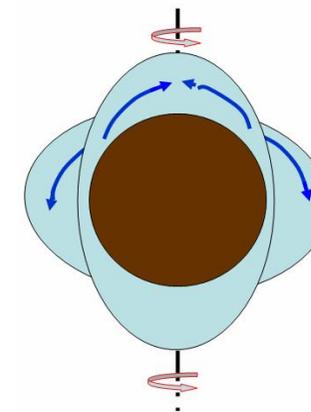


Рис.1 Схематическое изменение формы поверхности однородного океана.

Эффект перераспределения влаги обсуждается в литературе уже более века. Колебания уровня Мирового океана, изменение толщины льда на полюсах ученые пытались объяснять неравномерностью вращения Земли [5]. Колебания компонентов вектора мгновенной угловой скорости связаны с изменением вектора тензора инерции Земли, который определяет момент импульса нашей планеты:  $H_i = N_{ik} \omega_k$ , где  $N_{ik}$  – тензор инерции.

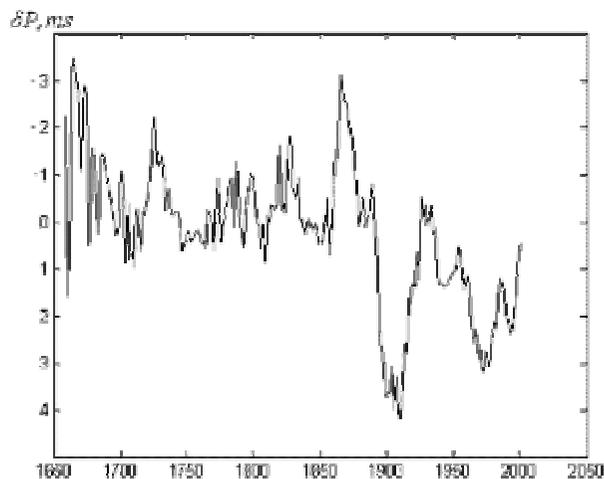
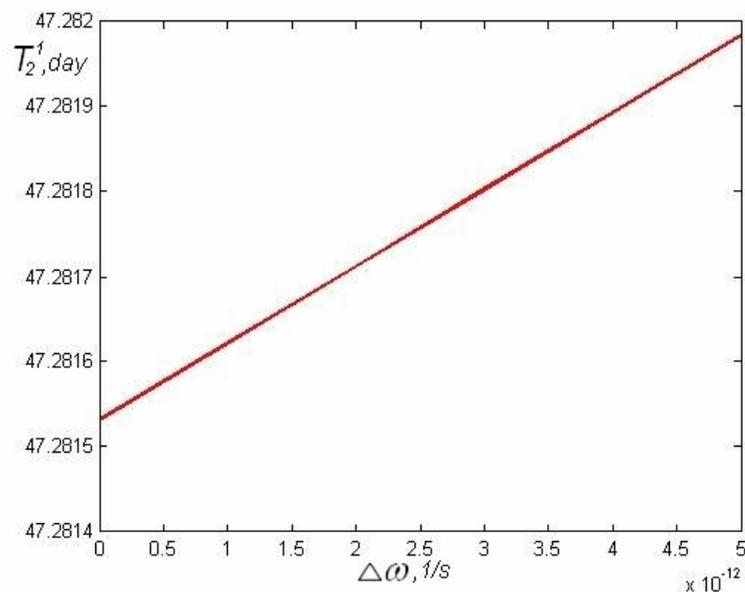


Рис.2 Отклонения δP длительности суток от эталонных за последние 350 лет

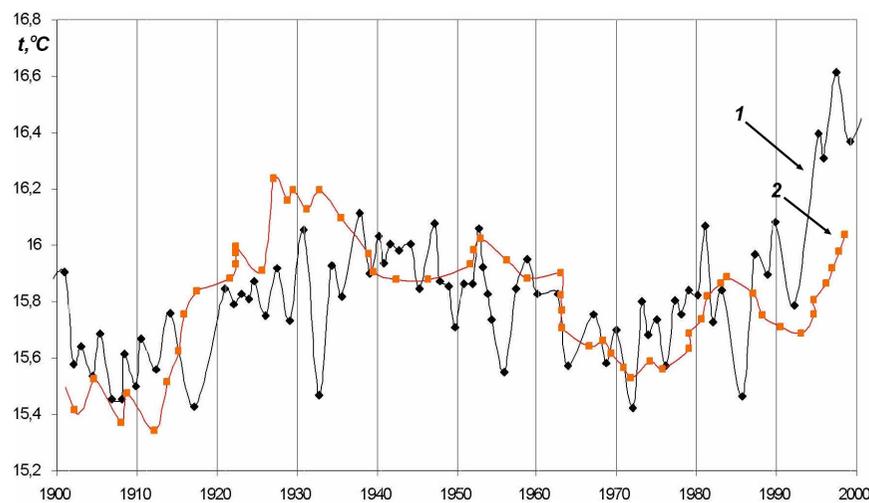
Рис. 3. Зависимость периода собственных колебаний однородного океана  $T_2^1$  от угловой скорости вращения Земли  $\omega$ .

Данные измерений скорости вращения Земли, проводимые со второй половины 19 века, показывают имеющие место нерегулярные флуктуации угловой скорости вращения с различными характерными временами (рис. 2).

Для оценок влияния вариаций угловой скорости вращения на период собственных колебаний однородного океана можно использовать решение приливного уравнения Лапласа на сфере [2]. В пренебрежении сжимаемостью период колебаний уровня океана определяются формулой :

$$2sT_n^s = n(n+1) + \frac{(n^2-1)^2(n^2-s^2)}{(4n^2-1)[(n-1)^2n^2/\gamma + 2s^2/n(n+1)]^2} + \frac{n^2(n+2)^2(n-s+1)(n+s+1)}{(2n+1)(2n+3)[(n+1)^2(n+2)^2/\gamma - 2s^2/n^2(n+1)]} \quad (1)$$

Здесь,  $T_n^s$  - период колебания уровня океана с азимутальным числом  $s$  и меридиональным числом  $n$ ,  $a$  – радиус планеты,  $\gamma = 4a^2\omega^2/gh$ ,  $h$  – глубина однородного океана,  $\omega$  – угловая скорость вращения планеты.

Рис. 4. 1 - среднегодовая температура воздуха Северного полушария Земли, 2 – среднегодовой период собственных колебаний однородного океана при  $n=1, s=2$  (по [2]).

Для оценок периода колебаний уровня океана был выбран интервал возможных изменений угловой скорости Земли по отношению к эталонному значению  $\omega = \frac{2\pi}{T_0} = 7,2722052166430399038487115353692 \cdot 10^{-5} \text{ 1/s}$ . В соответствии с данными наблюдений (1650 - 2000 гг.) [3] среднее сезонное значение угловой ско-

рости вращения Земли достигало величины  $7.272205132 \cdot 10^{-5} 1/c$ , а минимальное –  $7.272204711 \cdot 10^{-5} 1/c$ . Поэтому расчеты зависимости периода собственных колебаний  $T_2^1$  однородного океана от угловой скорости вращения Земли по формуле (1) (выполнялись для интервала изменения  $\omega$  от  $7.2722047 \cdot 10^{-5} 1/c$  до  $7.2722052 \cdot 10^{-5} 1/c$  с шагом  $0,0000001 \cdot 10^{-5} 1/c$ . Средний радиус Земли – 6371032 м, средняя глубина Мирового океана – 3700 м.

Из представленных результатов расчетов следует, что период собственных колебаний однородного океана уменьшается пропорционально снижению угловой скорости вращения Земли на (Рис.3). На вращении Земли сказывается влияние различных факторов, изменяющих планетарный момент инерции планеты. В течение года массы воздуха и влаги (воды, снега и льда) перераспределяются между материками и океанами, а также между Северным и Южным полушариями. Так, в январе масса воздуха над континентом Евразия на  $6 \cdot 10^{15}$  кг больше, чем в июле. От января к июлю из Северного полушария в Южное переносится  $4 \cdot 10^{15}$  кг воздуха. В течение всей зимы происходит накопление снега в северных районах Евразии и Северной Америки. Весной же снег тает, и влага возвращается в Мировой океан. Момент импульса воздушных и водных масс растет и в соответствии с законом сохранения момента импульса угловая скорость вращения Земли уменьшается.

Взаимосвязь вращения Земли и колебаний уровня океана коррелирует с климатическими изменениями (Рис. 4).

Известно, что в XX столетии Земля стала вращаться медленнее [4]. И это привело к ослаблению пассатов и усилению западного переноса в умеренной зоне. Для умеренной зоны усиление западного переноса означает теплые зимы, повышенную повторяемость наводнений, рост уровня внутренних водоемов и т.д. В тропической зоне ослабление пассатов приводит к постепенному прогреву водных масс. В результате общая циклоническая деятельность на земном шаре усиливается, увеличивается число штормов и экстремальных погодных явлений. В атмосферу поступает дополнительно огромное количество водяного пара, и в случае прихода тропического воздуха в умеренную зону обычный циклон дает необычные экстремальные осадки и соответствующие изменения массы воды в океане.

#### Литература

- Монин А.С. Океанология. Гидрофизика океана. Т.2, Гидродинамика океана. М.:Наука 1978. 912 с.
- Монин А.С. Вращение Земли и климат Л.: Гидрометеоздат, 1972. 112 с.,
- Hough S. S. On the application of harmonic analysis to the dynamical theory of tides, pt. II. On the general integration of Laplace's dynamical equation // Phil. Trans. Roy. Soc. AMI. 1898. a 189,pp 201-257
- Lambeck K. The Earth's Variable Rotation: Geophysical Causes and Consequences. Cambridge: Cambridge University Press. 1980.
- Thomson Sir W., 1882. Collected Works, vol. 3, p.337.

#### СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ, ТОЧЕЧНАЯ ИНДИКАЦИЯ, АНАЛИЗ ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ

Терентьев Е.Н., Терентьев Н.Е.

Московский Государственный Университет им. М.В.Ломносова,

Физический факультет

The University of Queensland, Australia

Предлагаются методы сверхразрешения, точечной индикации объектов в пространстве. Для оценивания характерных размеров вихрей предлагается использовать полосные корреляционные функции с их относительными дисперсионными вкладами. Цель данной работы: демонстрация новых современных методов моделирования и анализа сложных явлений, связанных с фокусировкой излучений в турбулентных средах.

#### Введение

В последние несколько лет объектом особого внимания исследователей в дистанционных исследованиях стала проблема фокусировки излучений в турбулентной среде. Это связано со строительством больших телескопов, компенсацией искажений вызываемых турбулентной атмосферой и созданием мощных лазеров в военных целях. Обозначились характерные специфические трудности: существующие методы (морфологические, корреляционные и другие) оказались не применимы в системах индикации из-за низкой пространственной точности.

Существующие классические методы математического моделирования, основанные на конечно - разностных схемах не применимы при моделировании искажения лазерного излучения (параболический подход) проходящего через турбулентную среду (решения системы уравнений Навье-Стокса). Как выяснилось, мы даже не можем удовлетворительно в конечных разностях промоделировать основные операции теории поля типа rot, grad, div,... (см. Рис. 3.).

Парадоксальная ситуация сложилась с анализом турбулентных, вихревых течений. Такой анализ до сих пор связывают с формулированием известных гипотез вместо проведения расчетов. Можно показать, однако, что устройство корреляционной (структурной) функции вихря в области сильных корреляций определяется его мелкими деталями. И то, что мы могли бы отнести к размеру вихря, не является факторным параметром его корреляционной (структурной) функции. Советуем внимательно изучить картинку, связанные с векторными полосными корреляционными функциями для Rot от вихря Хилла (Рис. 4,5).

Последнее замечание касается проблеме подачи, освещения новых материалов большого объема. Операция rot в математическом анализе расписывается кратко в виде детерминанта от специальной матрицы 3x3. Функция Rot на языке ML {с применением вложенных функций (и защищенным режимом), массовых операций, селей (массива массивов) с применением аналога теоремы Винера – Котельникова и векторных преобразований Фурье (для вычисления частных производных от 3D числовых массивов)} со всеми вложенными функциями выписыва-

ется ~ на 20 страницах текстов ML функций без комментариев! Аналогичная ситуация с длиной текстов ML функций точного вычисления интегралов высокой кратности с переменными верхними пределами от функций Винера – Котельникова.

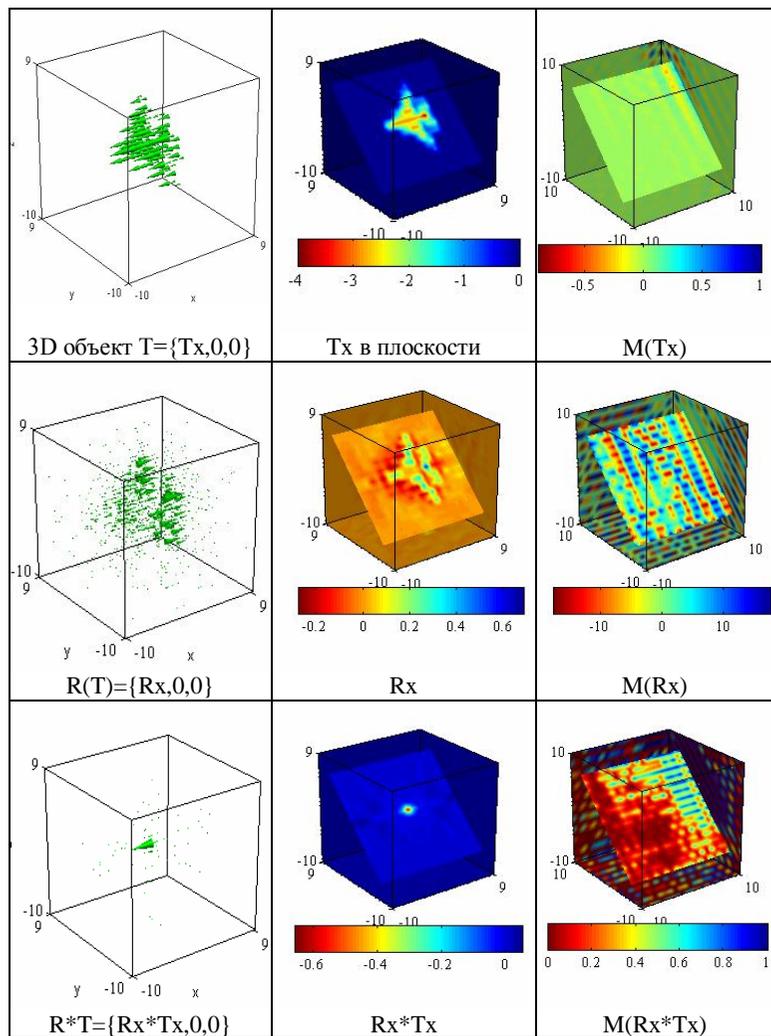


Рис. 1. 3D разрешающая функция  $R(T)$  объекта  $T$ , индикаторная функция  $R^*T$ , соответствующие передаточные функции в правом столбце.

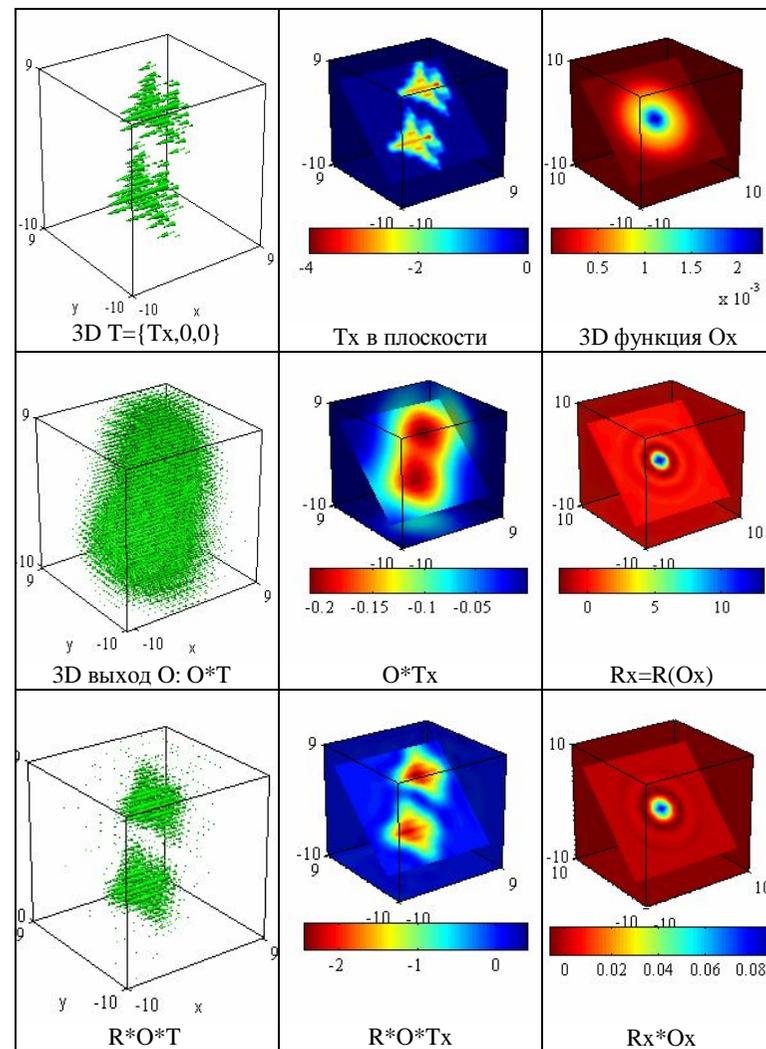


Рис. 2. 3D аппаратная функция  $O$  пространственной системы наблюдения, ее выход  $O^*T$  и разрешенный объект  $R^*O^*T$ .

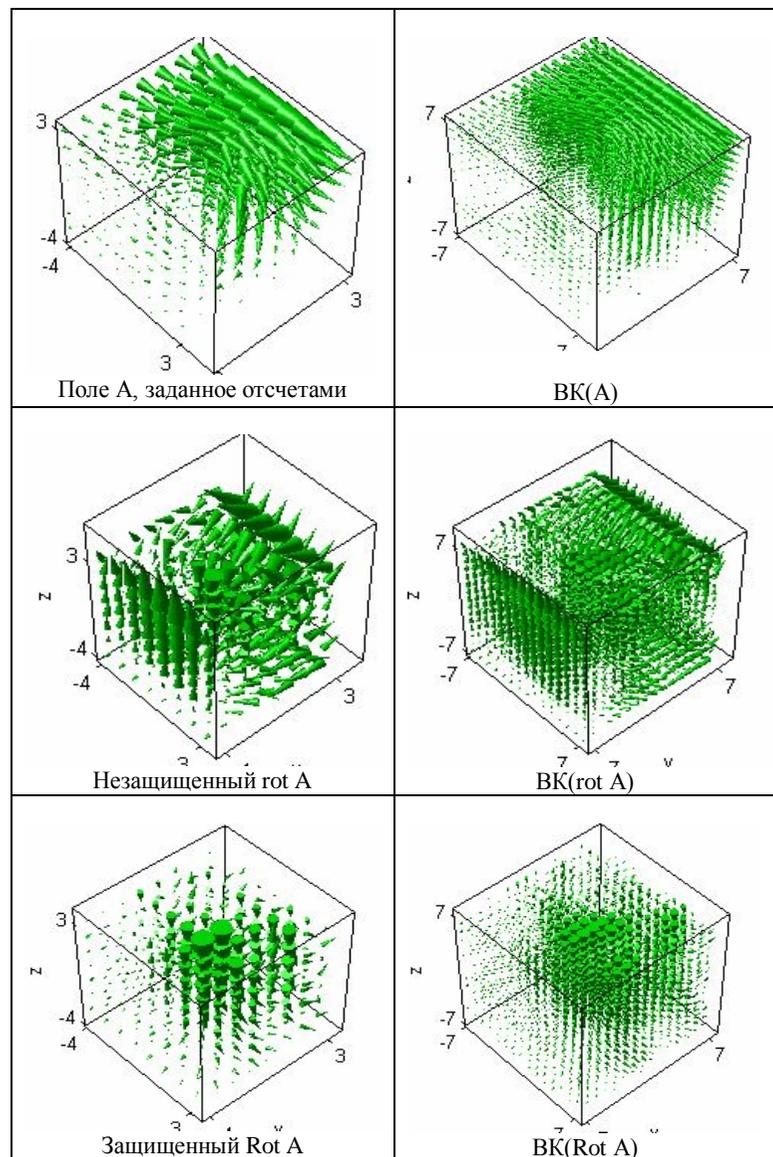


Рис. 3. Незащищенные и защищенные операции на примере  $\text{rot}$ ,  $\text{Rot}$  и их функции Винера – Котельникова справа. Точность:  $\text{div rot } A \sim e^{-14}$  в точках отсчетов.

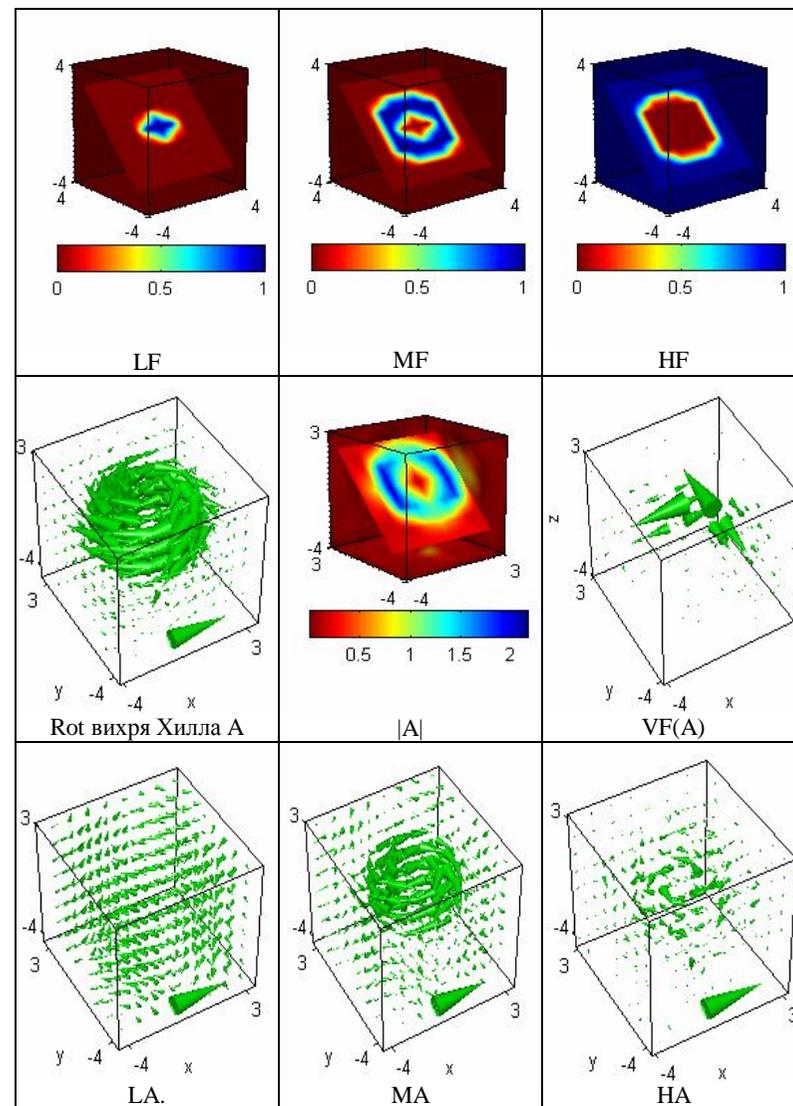


Рис. 4. Пространственные скалярные полосы пропускания LF – низкочастотная, MF – среднечастотная и HF – высокочастотная. A – Rot вихря Хилла, векторное Фурье –  $\text{VF}(A)$ .  $A = \text{LA} + \text{MA} + \text{HA}$  – разложение вихря A по полосам частот LF, MF, HF.

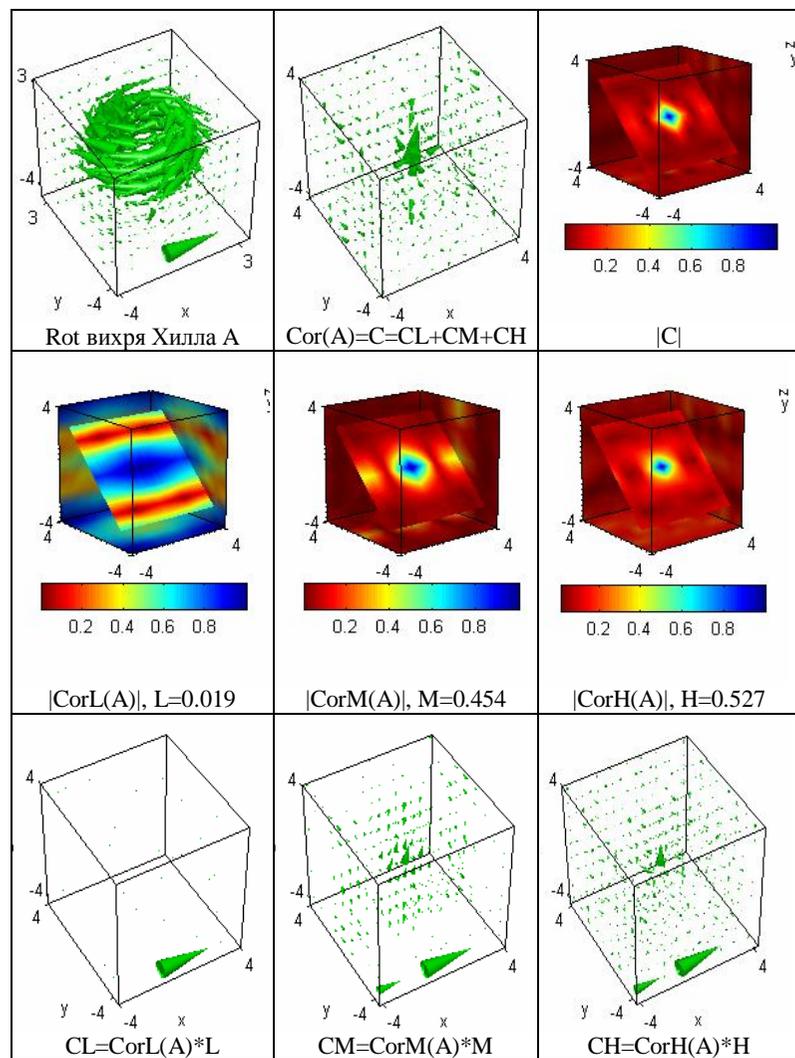


Рис. 5. Всесоставная векторная корреляционная функция  $\text{Cor}(A)=C$ , полные скалярные корреляционные функции  $|\text{CorL}(A)|$ ,  $|\text{CorM}(A)|$ ,  $|\text{CorH}(A)|$  с относительными дисперсионными вкладами  $L$ ,  $M$ ,  $H$ ,  $L+M+H=1$ .

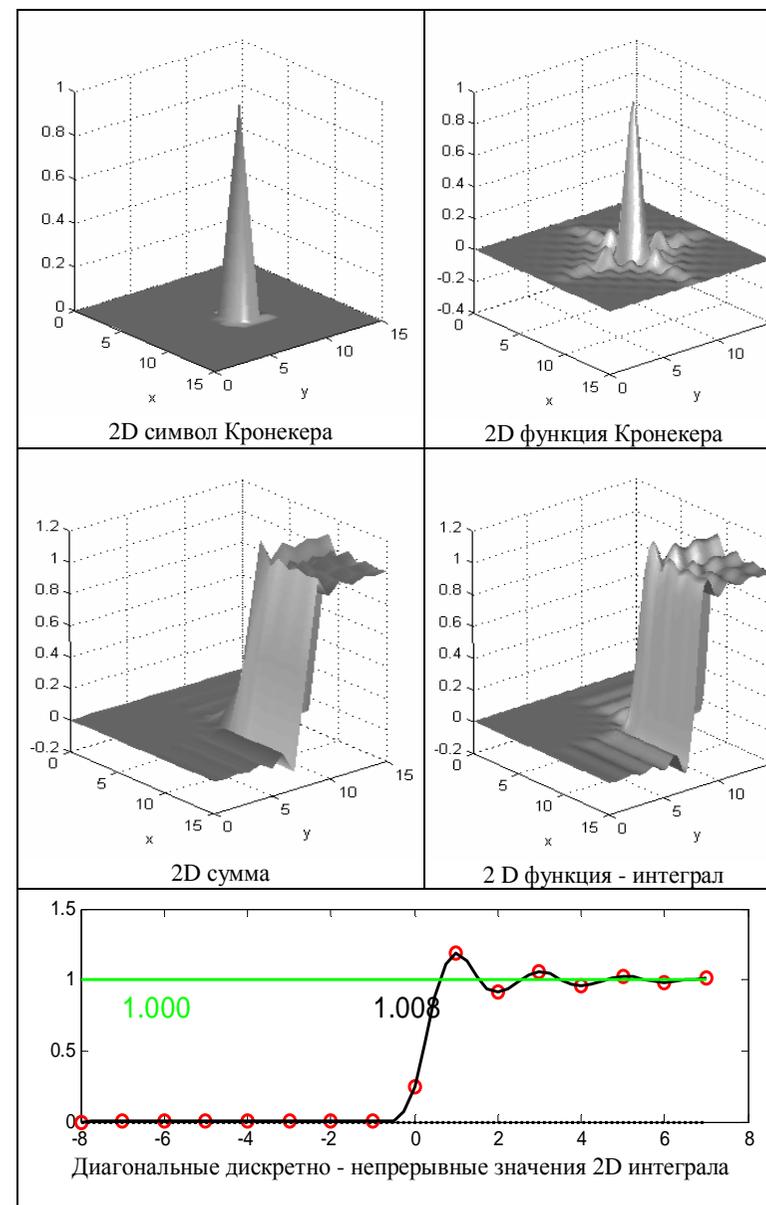


Рис. 6. Точность установившегося значения интеграла  $\sim$  доли процента

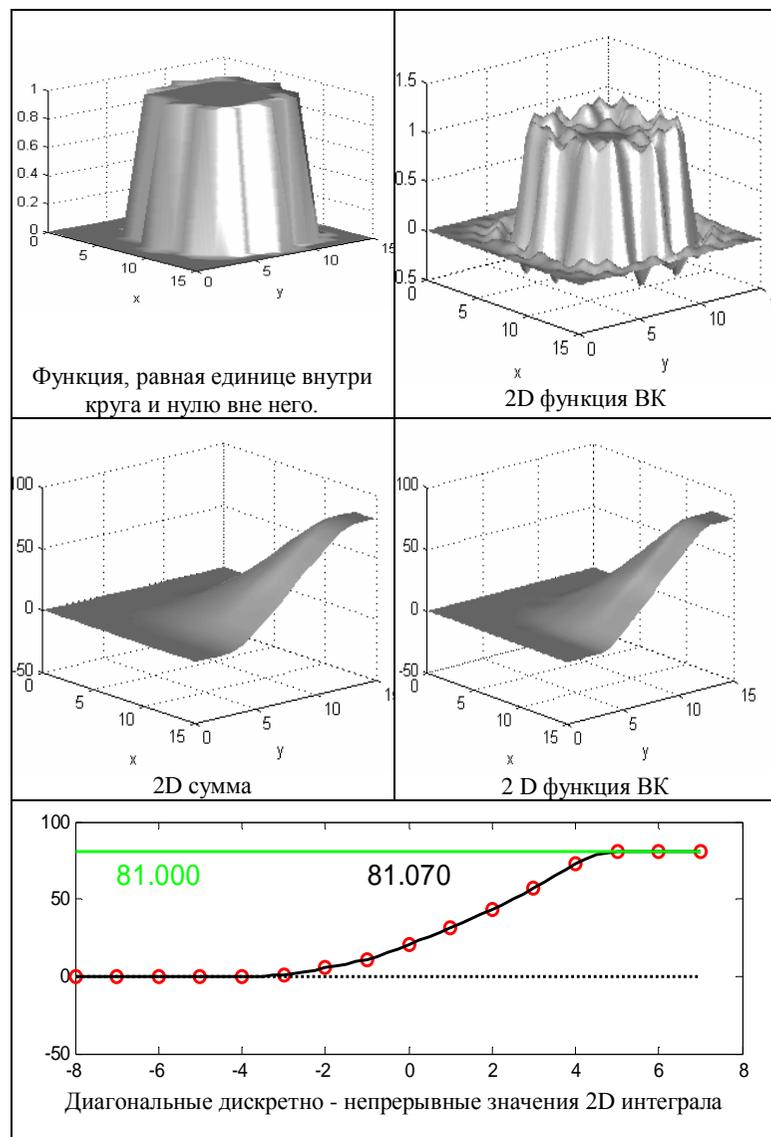


Рис. 7. Точность значения интеграла ~ доли процента

### 1. Сверхразрешение, точечная индикация

Разрешающее скалярное поле  $R$  для 3D ФРТ  $O=Ox$  в  $\square \subset OH$  - Область Наблюдения, определяется из задачи

$$\inf_R \{ \|R * O - \delta\|_{\square}^2 \mid \|R\|_{\square}^2 \leq \varepsilon \},$$

решение, которой  $R(O) = (O * O + \omega \delta)^{-1} * O$ . Аналогично мы имеем раз-

решающую 3D функцию для объекта  $T$ :  $R(T) = (T * T + \omega \delta)^{-1} * T$ . Точеч-

ная индикация объекта  $T$  реализуется индикаторной функцией  $IF = R(T) * T$ . Понятно, что если объект  $T$  векторный, то  $R$ ,  $IF$  и соответствующие преобразования Фурье - векторные. Операция  $*$  - защищенная свертка.

### 2. Полосные корреляционные функции, кратные интегралы

В нашем примере область сильных корреляций  $Rot$  вихря Хилла  $|C|$  определяется толщиной его стенок и совпадает с высокочастотной корреляционной функцией  $|CorH(A)|$ , относительный дисперсионный вклад которой ~ 53%.

О размере вихря можно судить по размеру области сильных корреляций его низкочастотной корреляционной функции  $|CorL(A)|$  с дисперсионным вкладом ~2%. Векторная всесоставная корреляционная функция

$$Cor(A) = CorL(A) * L + CorM(A) * M + CorH(A) * H$$

представляется в виде суммы условных полосных корреляционных функций с их относительными дисперсионными вкладами  $L, M, H, L+M+H=1$  в виде формулы "полной вероятности".

Отсюда следует, что мы можем с такими полями производить манипуляции типа байесовского пересчета, рассчитывать взаимную информацию в полях, течениях, вихрях и т.п. Такого рода конструкции анализа 3D полей в своей основе исходят из того, что векторное поле  $Cor(A)$  есть по сути "эмпирическая вероятность". Заметим, что в теории нечетких множеств Заде функции принадлежности, как правило, берутся без обоснований. Функции "эмпирической вероятности"  $Cor(A)$  вычисляются и имеют существенно более глубокое содержание, чем функции принадлежности Заде.

Идея вычисления первообразных через ряд Фурье, возможно, новая. Со всем просто выписывается результат для первообразной через ряд Фурье. Однако, эта же идея на классе функций Винера - Котельникова очень громоздкая. Практический смысл в том, что все интегралы, включая многократные, на классе функций Винера - Котельникова считаются точно без квадратурных формул. Область интегрирования для финитных функций надо слегка увеличивать для учета релаксаций интеграла.

### Заключение

Иллюстративный материал является продолжением текста, снабжен подробными комментариями. Обратим внимание на то, что все операции реализованы в защищенном режиме, без краевых эффектов (см. Рис. 3.) без применения конечно - разностных схем и квадратурных формул. Существующими методами подобные результаты получить невозможно. Аналогов нет. В работах [10,11] предлагается реализовать всю эту инновационную математическую технику в виде Математического Процессора, в “железе” аналогичном графическим процессорам.

### Литература

1. E.N. Terentiev, N.E. Terentiev, Applications of pointed ultra-resolution method in microwave imaging, Proc. SPIE Vol. 5789, 167-177(2005).
2. E.N. Terentiev, N.E. Terentiev, Applications of pointed ultra-resolution method in colour imaging, Proc. SPIE Vol. 5817, 321-328(2005).
3. E.N. Terentiev, F.V. Shugaev, L. Shtemenko, O. Dokukina, O. Ignateva, Modeling of laser beam propagation through turbulent medium, Proc. SPIE Vol. 5793,56-67(2005).
4. Е.Н. Терентьев, Ф.В. Шугаев, Л.С. Штеменко, О.И. Докукина, О.А. Игнатьева, Моделирование прохождения лазерного излучения через турбулентную среду, Известия Академии Наук, Серия физическая, том 69, N12, с. 1721-1723, 2005 г.
5. F.V. Shugaev, E.N. Terentiev, L. Shtemenko, O. Dokukina, O. Ignateva, Characterization of laser beam in turbulent atmosphere, Proc. SPIE Vol. 5981, 127-138 (2005).
6. E.N. Terentiev, N.E. Terentiev, Ultra-resolution and indication of objects, Proc. SPIE Vol. 6211, 135-144 (2006).
7. E.N. Terentiev, N.E. Terentiev, Characterization of ultra-resolution method, Proc. SPIE Vol. 6246, 263-269 (2006).
8. E.N. Terentiev, F.V. Shugaev, L. Shtemenko, O. Dokukina, O. Ignateva, Modeling of laser beam propagation through the whirlwind, Proc. SPIE Vol. 6215, 86-97 (2006).
9. F.V. Shugaev, E. Terentiev, L. Shtemenko, O. Ignateva, Characterization of compensation for non-uniform image distortions due to atmospheric turbulence, Proc. SPIE Vol. 6364, (2006).
10. Терентьев Е.Н., Терентьев Н.Е., Шугаев Ф.В. Математический процессор и проблемы фокусировки излучений в турбулентной среде, Сборник инновационных проектов физического факультета МГУ, 114-117, 2009 г.
11. Терентьев Е.Н., Терентьев Н.Е. Математика вихря, Сборник инновационных проектов физического факультета МГУ, 118-121, 2009 г.

В.И. Трухин, В.И. Максимочкин, В.А. Жилиева, Ю.А. Минина

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

### Введение

Геомагнитное поле (ГМП) играет огромную роль в жизни нашей планеты. Навигация, открытие Америки и вся эпоха великих географических открытий обязаны во многом ГМП, которое указывало направление движения кораблям. И в наше время в водной, подводной, воздушной и космической навигации продолжают использовать приборы для ориентации по силовым линиям ГМП [8].

Только в 1600 г. У.Гильберт [4] доказал, что земной магнетизм не космического происхождения, а сама Земля создает собственное ГМП. Каким образом оно создается, неясно до сих пор. Согласиться можно только с тем, что оно генерируется в ядре Земли. Механизм генерации до сих пор точно не определен [20].

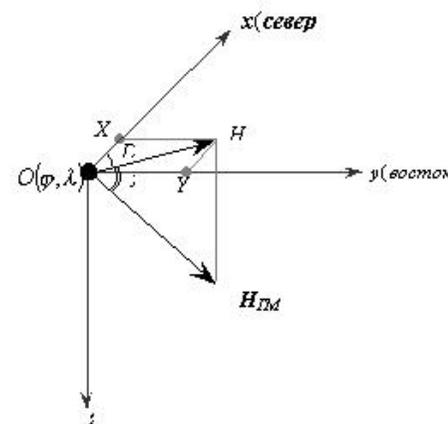


Рис.1. Элементы геомагнитного поля:  $x, y, z, H, D, J$ .  $O(\varphi, \lambda)$  - точка, в которой измеряется геомагнитное поле  $\vec{H}_{GM}$  и его элементы.

В точке измерения ГМП  $O(\varphi, \lambda)$  на поверхности Земли полный вектор поля  $H_{GM}$  можно описать составляющими (или элементами) геомагнитного поля (рис.1). Составляющие  $X, Y, Z$  направлены на север, восток и вертикально вниз по осям координат  $(x, y, z)$  и называются, соответственно, северной, восточной и вертикальной составляющими,  $H$  – горизонтальная составляющая. Угловые элементы поля:  $D$  – угол магнитного склонения,  $J$  – угол магнитного наклона. Линия  $Ox$  - касательная к линии географического меридиана; линия  $OH$  – касательная к линии геомагнитного меридиана.

Большое внимание уделяется изучению свойств и структуры существующего ГМП. В 1838 г. К.Гаусс создал общую теорию ГМП, которая успешно используется до сих пор. В теории Гаусса получено выражение для магнитного

потенциала для расчета главного геомагнитного поля (ГГМП), которое генерируется во внешнем ядре Земли [21].

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{R^{n+2}}{r^{n+1}} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta), \quad (1)$$

где  $r$  - расстояние точки измерения ГГМП от центра Земли,  $R$  - радиус Земли,  $g_n^m$ ,  $h_n^m$  - коэффициенты Гаусса, которые определяются путем измерений компонент ГГМП ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) в различных точках земного шара,  $\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$  - дополнение

до географической широты точки измерения ГМП,  $\lambda$  - географическая долгота точки,  $P_n^m(\cos \theta)$  - присоединенная функция Лежандра.

Составляющие ГМП – северная ( $X$ ), восточная ( $Y$ ) и вертикальная ( $Z$ ) определяются путем дифференцирования  $U$  в сферической системе координат по соответствующим направлениям:

$$X = -\frac{\partial U}{r \partial \theta}; \quad Y = -\frac{\partial U}{r \cos \theta \partial \lambda}; \quad Z = -\frac{\partial U}{\partial r}. \quad (2)$$

Для достаточно точного описания реального ГГМП бесконечный ряд для потенциала  $U$  можно ограничить до  $n=10$ . Это будет потенциал международного эталонного геомагнитного поля.

$$U = \sum_{n=1}^{10} \sum_{m=0}^n \frac{R^{n+2}}{r^{n+1}} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) \quad (3)$$

Помимо ГГМП существует еще аномальное (локальное геомагнитное) поле (АГМП), вызванное намагниченными горными породами. Аномальное поле является объектом исследования методами геомагнитной разведки с целью разведки и поиска полезных ископаемых, а также изучения строения земной коры. Аномальные поля могут быть как положительными (направленными по ГМП), так и отрицательными, направленными против ГМП:

$$\overline{ГМП} = \overline{ГГМП} \pm \overline{АГМП} \quad (4)$$

При магнитных съемках измеряется полное поле (ГМП) или его модуль. Зная аналитическое выражение для ГГМП (уравнения (2), (3)) можно определить АГМП (ур. 4), которое несет информацию о строении земной коры и природных ресурсах [21].

ГМП подвержено медленным (вековым) и быстрым изменениям (вариациям). Источники вековых вариаций находятся во внешнем, жидком ядре Земли, источники быстротечных вариаций – в верхних слоях атмосферы (магнитосфера, ионосфера).

Таким образом, наблюдаемое на поверхности Земли ГМП является суммой трех полей, источники которых имеют различные физические механизмы происхождения и различное месторасположение:

1. Главное геомагнитное поле (ГГМП) и его вековые вариации генерируются во внешнем (жидком) ядре Земли. Иногда главное поле называется нормальным.
2. Аномальное геомагнитное поле (АГМП) создается намагниченными горными породами земной коры.
3. Поле быстротечных вариаций (электромагнитное поле) создается источниками, находящимся в околоземном пространстве.

### Структура и основные характеристики ГГМП.

Выражения для  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  в соответствии с уравнениями (1), (2) являются бесконечными рядами. При  $n=1$  потенциал  $U$  из ур.(1) и выражения для  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  определяют поле магнитного диполя. Член ряда Гаусса с  $n=2$  соответствует полю квадруполь (два диполя) и так далее: член с любым  $n$  описывает поле мультиполя соответствующего порядка. Сферический гармонический анализ показал, что главное поле состоит из дипольной части (более 80%) и недипольной.

Для выделения аномального поля из наблюдаемого  $H_{гм} = H_n + H_a$  ( $H_n$  = ГГМП) используются методы, основанные на том, что источники  $H_a$  и  $H_n$  находятся на существенно разных глубинах [21]. Простейшим является очевидный метод:  $H_a = H_{гм} - H_n$ . Аномальное магнитное поле континентов имеет сложный характер, представляя во многих случаях сумму нескольких составляющих, имеющих различное геологическое происхождение.

Принципиальным открытием было обнаружение отрицательных магнитных аномалий, т.е. таких, силовые линии которых направлены антипараллельно силовым линиям главного магнитного поля, которое намагничивает горные породы, создающие аномалии.

Наша планета Земля находится под действием различных излучений космического происхождения.

Установлено, что Солнце с огромной скоростью испускает во все стороны заряженные частицы, называемые солнечным ветром. Солнечный ветер (СВ) – это постоянный радиальный поток, исходящий из плазмы солнечной короны в межпланетное пространство. Поток энергии, идущий из недр Солнца, нагревает плазму короны до 1,5-2 млн.К. На излучение короны затрачивается энергии значительно меньше, чем приходит в корону из недр Солнца. Избыточная энергия ( $10^{27} - 10^{29}$  эрг/сек) уносится частицами СВ, который содержит протоны, электроны, ядра гелия, ионы кислорода, кремния, серы, железа [29].

Скорость частиц СВ нарастает по мере его удаления от короны (несколько сотен м/с). У Земли скорость протонов составляет 300-750 км/с, а их пространственная концентрация возрастает от нескольких частиц до нескольких десятков частиц в  $1 \text{ см}^3$ . СВ, благодаря его высокой электропроводности, захватывает силовые линии магнитного поля, которые образуют линии межпланетного магнитного поля. Сочетание радиальной скорости частиц со скоростью вращения Солнца придает этим линиям форму спиралей. Крупномасштабная структура магнитного поля в окрестностях Солнца имеет вид секторов, в которых поле направлено от Солнца или к нему. Размер сектора, занятого СВ, составляет не менее 100 А.Е. (1 А.Е. –  $1,5 \cdot 10^8$  км) (АЕ – астрономическая единица).

У границ этого сектора динамическое давление СВ должно уравновеситься давлением межзвездного газа, галактического магнитного поля и космических частиц.

В окрестностях Земли столкновение потока СВ с геомагнитным полем порождает стационарную ударную волну перед земной магнитосферой. СВ обтекает магнитосферу (рис 2), ограничивая ее протяженность в пространстве.

Магнитосфера (М) – область околоземного пространства, она несферична и сильно вытянута в сторону, противоположную направлению на Солнце [29]. С дневной стороны поток плазмы СВ сжимает ГМП, искажая его дипольный характер. На ночной стороне силовые линии ГМП вытягиваются в протяженный магнитный хвост (рис.2). Диаметр хвоста М составляет (40 – 50) R (земных радиусов). Поля противоположных направлений в магнитном хвосте разделяет токовый слой. Внутри токового слоя напряженность ГМП близка к нулю, здесь давление полей различных направлений уравнивается давлением горячей плазмы. Противоположно направленные силовые линии ГМП в магнитном хвосте разделены нейтральным слоем. Границу М приближенно можно считать непрозрачной для СВ. На дневной стороне граница М – магнитопауза – проходит от Земли на расстоянии 10R. Напряженность ГМП на границе зависит от параметров СВ и обычно составляет несколько десятков нТл.

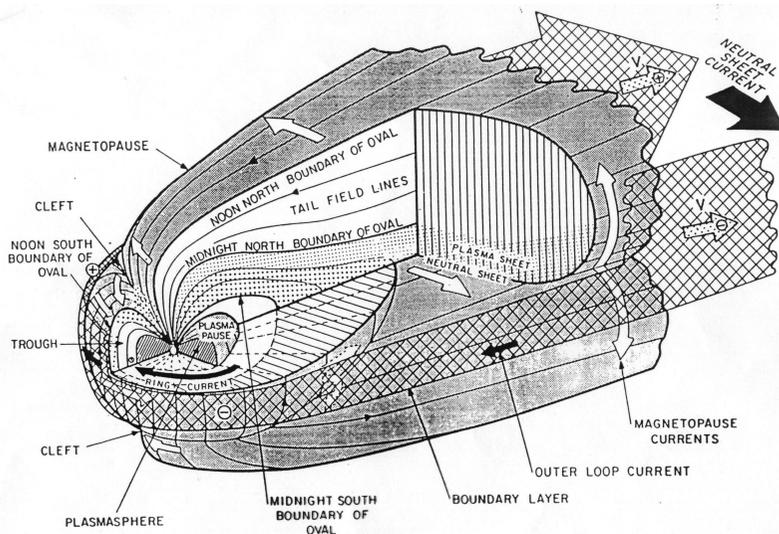


Рис.2. Современная модель поля магнитосферы, искривленного действием солнечного ветра. Предоставлено Центром Мировых данных – А.

Все линии ГМП в М можно разделить на два класса: линии, близкие к дипольным, и линии, уходящие в хвост М. Во внутренних областях М магнитное поле удерживает, как в магнитной ловушке, потоки быстрых частиц с энергией в сотни и более кэВ. Быстрые частицы в ловушках образуют радиационные пояса

Земли (Рис.3). Резкое возрастание плотности энергии в СВ приводит к магнитосферным бурям: усилению полярных сияний, возрастанию потоков частиц в радиационных поясах, искажению силовых линий ГМП.

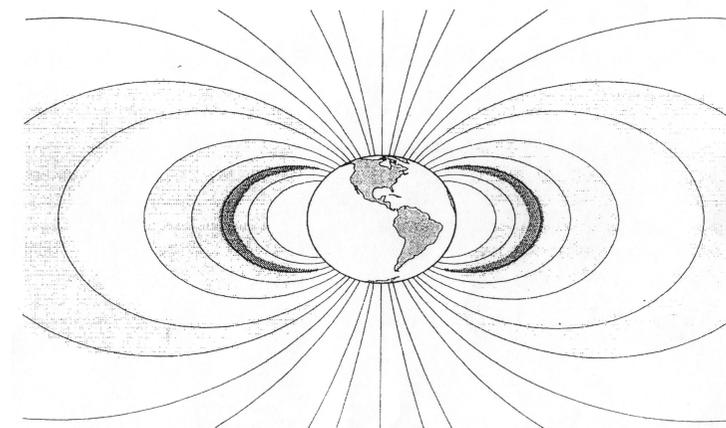


Рис.3. Радиационные пояса Земли (затемненные области).

Известно [26], что магнитосфера существует и у других планет. У Меркурия М значительно слабее, чем у Земли. У Юпитера – самая мощная М среди планет. Она простирается до 100 радиусов Юпитера. На границе магнитосферы напряженность поля 6 нТл. Обширной магнитосферой окружен Сатурн.

Верхние слои атмосферы содержат большое количество ионизированных частиц, как за счет частиц, приходящих из Космоса и от Солнца, так и за счет частиц верхней атмосферы, которые ионизируются под действием ультрафиолетового излучения Солнца и из-за взаимодействия с частицами СВ. Вполне возможно, что частично ионизированные слои верхней атмосферы, а также ионосфера из-за взаимодействия с силовыми линиями ГМП затрудняют диссипацию атмосферных молекул в космическое пространство, что помогает удержанию атмосферы у поверхности Земли. Магнитосфера и атмосфера защищают поверхность Земли от солнечных и космических частиц высоких энергий. Возможно, что в отсутствие магнитосферы и радиационных поясов поверхность Земли была бы подвержена повышенному воздействию космической радиоактивности.

Защита поверхности Земли от мощного радиоактивного космического излучения является одной из основных глобальных экологических функций ГМП.

#### Палеомагнитные исследования

Как отмечалось ранее, наряду с положительными имеются и отрицательные аномалии. Наличие отрицательных геомагнитных аномалий связано с существованием обратно (антипараллельно современному ГМП) намагниченных горных пород. Наличие горных пород, намагниченных антипараллельно и в других направлениях, отличающихся от направления современного ГМП, привело ученых к

выводу, что по направлению естественной остаточной намагниченности (NRM) горных пород различного геологического возраста можно изучать эволюцию ГМП. С середины прошлого века на всех континентах и в Океане проводились интенсивные палеомагнитные исследования, которые привели к неожиданным, имеющим очень большое значение для геофизики, результатам. Основными результатами являются следующие [27]:

1. За последние 400-600 млн лет палеомагнитные полюсы, определенные по направлению NRM древних горных пород, перемещались на различных континентах по разным траекториям от экваториальной зоны на север и на юг к современному положению магнитных и геомагнитных (дипольных) полюсов (рис.4).



Рис.4. Траектории северного палеомагнитного полюса по данным, относящимся к разным материкам и их частям.

1 – к Европе; 2 – к Северной Америке; 3 – к Австралии; 4 – к Индии; 5 – к Африке; D – девон; P – Пермь; T – триас; S – силур; J – юра; K – мел; E – эоцен; M – миоцен.

2. Направление NRM горных пород неоднократно в течение 400-600 млн лет изменяло полярность на противоположную и, согласно палеомагнитной концепции, ГМП также в те же периоды времени меняло свою полярность, происходили инверсии ГМП. Именно инверсии ГМП, в результате которых ГМП изменяло полярность, по мнению палеомагнитологов, приводили к появлению время от времени NRM горных пород, направление которых на  $180^\circ$  отличалось от направления современного ГМП. [29]:

Интерпретировать первый результат очень сложно. Надо представить, что ГМП было мультипольным, и полюсы мультиполей, двигаясь к географическим полюсам, образовали современное поле, состоящее из сильномагнитного диполя и слабомагнитных мультиполей.

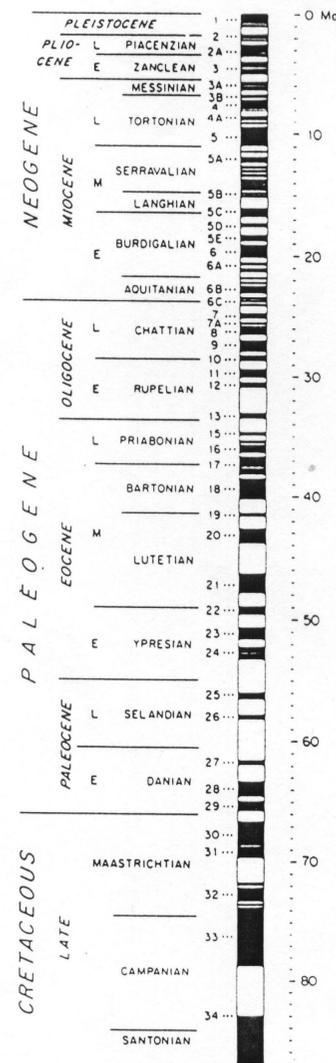


Рис.5. Магнитохронологическая шкала периодов прямого (черные отрезки) и обратного (светлые отрезки) направлений NRM или инверсий ГМП в последние 80 млн лет [23]

В настоящее время общепринятой является следующая интерпретация первого результата [26]. То движение полюсов, которое наблюдается при палеомагнитных исследованиях, - это виртуальное движение. В действительности, магнитный полюс в среднем за миллионы лет совпадает с географическим и он практически неподвижен. Такой подход позволил определить не движение полюсов ГМП, а относительное движение различных участков литосферы (литосферных плит), где производились измерения ГМП и NRM горных пород.

Второй результат был интерпретирован как реальные смены полярности ГМП. Однако при такой интерпретации приходится допускать движение магнитных полюсов до  $180^\circ$  несмотря на то, что положение магнитного полюса совпадало с географическим, и поэтому не должно изменяться в течение миллионов лет. Геологическая хронология смен знака NRM горных пород была одинаковой на разных континентах и на подводных океанских горных породах. Это подтверждало существование инверсий ГМП. По результатам ПМ исследований была построена единая мировая магнитохронологическая шкала смен знака NRM (или инверсий ГМП) (рис.5).

При любой интерпретации палеомагнитных результатов эволюция ГМП тесно связана с эволюцией Земли - было или не было движения литосферных плит, и были или не были инверсии ГМП, во время которых из-за отсутствия магнитосферы поверхность Земли могла подвер-

гаться мощному космическому радиоактивному облучению. Однако в любом случае должен быть глобальный механизм, управляющий намагничиванием горных пород или переполусовками ГМП и связанный с эволюцией Земли. Поэтому необходимо определить, и это чрезвычайно важно – по какой траектории происходила эволюция ГМП и какое взаимодействие было у эволюции Земли и ГМП, а это в значительной степени зависит от того, происходили ли в реальности инверсии ГМП.

В случае, если инверсии ГМП реально происходили, то это должно было сильно влиять на экологию и эволюцию Земли. Во время инверсий ГМП близко к нулю и магнитосфера, защищающая поверхность Земли от мощной радиоактивности, практически исчезает. Эволюция Земли в такой ситуации должна быть не непрерывной, а прерывающейся.

В 1953г. Т. Нагата при лабораторном намагничивании горных пород получил TRM, ориентированную антипараллельно намагничивающему полю [7]. Это привело к альтернативной интерпретации появления обратно намагниченных горных пород: обратное намагничивание пород могло произойти либо в результате переполусовки (инверсии) ГМП, либо в результате особых свойств магнитных минералов, способных намагничиваться антипараллельно намагничивающему полю (такой процесс называется «самообращением намагниченности» [7]).

В настоящее время нет достаточных оснований полагать, что палеомагнитный полюс можно считать неподвижным, совмещенным с географическим. Одним из свидетельств возможного перемещения древних геомагнитных полюсов является движение современных магнитных полюсов. Северный магнитный полюс в 2000 г. находился на расстоянии примерно 1000 км от северного географического, а южный – на расстоянии примерно 2800 км от южного географического; в 2009 г. северный магнитный полюс находился на расстоянии примерно 560 км от северного географического, а южный – на расстоянии примерно 2840 км. [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/].

Очевидно, что движение геомагнитных полюсов, связанное с перемещением источников ГМП в жидком ядре Земли, более возможно, чем перемещения на огромные расстояния жестких литосферных плит и пород, составляющих дно океана.

Еще более серьезную проблему представляет палеомагнитная интерпретация образования обратной намагниченности горных пород в ГМП обратного направления. Обратное древнее геомагнитное поле, по предположению, может возникнуть в результате переполусовок (инверсий) ГМП. В принципе в жидком ядре Земли возможна такая перестройка источников ГМП, которая приведет к инверсии ГМП. Однако, как уже отмечалось существуют альтернативные переполусовкам ГМП механизмы образования обратной NRM горных пород.

Необходимо решить, какие механизмы обратного намагничивания в природе преобладают: намагничивание в антипараллельном поле, образующемся в результате инверсий ГМП, или самопроизвольное образование NRM, антипараллельной ГМП, за счет процессов самообращения NRM. Ответ на этот вопрос имеет значение не только для познания эволюции ГМП и проблем геофизики и геодинамики, но и для установления особенностей эволюции и экологии Земли.

Непосредственное изучение инверсий невозможно – их продолжительность около 5000 лет. Тем не менее есть направление исследований инверсий – это изучение механизмов самообращения NRM и определение вероятности обратного намагничивания горных пород в результате процессов самообращения. Тем самым мы определим и вероятность существования инверсий [13].

Весомым аргументом в пользу существования инверсий является то, что временные последовательности прямо и обратно намагниченных горных пород одинаковы в глобальном масштабе: на изверженных, осадочных горных породах, на континентах и дне океана [27]. Для того, чтобы альтернативный механизм образования обратной NRM был конкурентоспособным с возможными инверсиями, необходимо, чтобы имелся глобальный механизм управления самообращением NRM. Одним из таких механизмов, по нашему мнению, может быть глобальное изменение напряженности ГМП с течением геологического времени (Рис.6).

#### Физический механизм самообращения на-

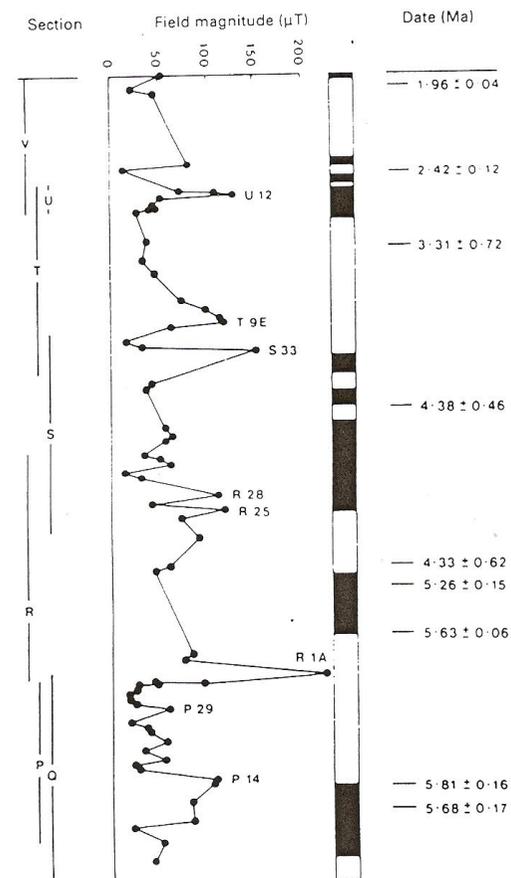


Рис.6. Изменения полярности и напряженности ГМП в интервале от 2 млн лет до 5 млн лет.

#### магнитности.

Эффект самообращения намагниченности очень интересен с точки зрения физики, но также интересен и с точки зрения геофизики, так как он является альтернативным по отношению к инверсиям ГМП механизмом образования обратной намагниченности горных пород. Поэтому после обнаружения этого эффекта Т.Нагатой в 1953 г., предсказанного теоретически Л.Неелем в 1948 г., ученые раз-

ных стран начали интенсивно изучать физический механизм эффекта самообращения в ферромагнитных минералах горных пород.

Ферримагнетики отличаются от ферромагнетиков тем, что они имеют две или более магнитных подрешеток.

На рис 7 представлены основные типы зависимостей  $I_s(T)$  ферримагнетиков, рассчитанные Л.Неелем [30]. Эти зависимости имеют очень сложный характер. Например, при росте  $T$  намагниченность  $I_s(T)$  не уменьшается, происходит в ферромагнетиках, а растет (зависимость типа М и Р на рис 8а, б). У зависимостей  $I_s(T)$  на температурной оси могут быть точки компенсации  $T_k$ , когда при  $T=T_k$  намагниченности подрешеток равны  $I_{AS}=I_{BS}$ ,  $I_s(T_k)=0$ . Более того, по расчетам Л.Нееля, при температурах выше или ниже  $T_k$  намагниченность  $I_s$  может быть направлена антипараллельно намагничивающему полю (зависимости типа V и N на рис 7 и 8б).

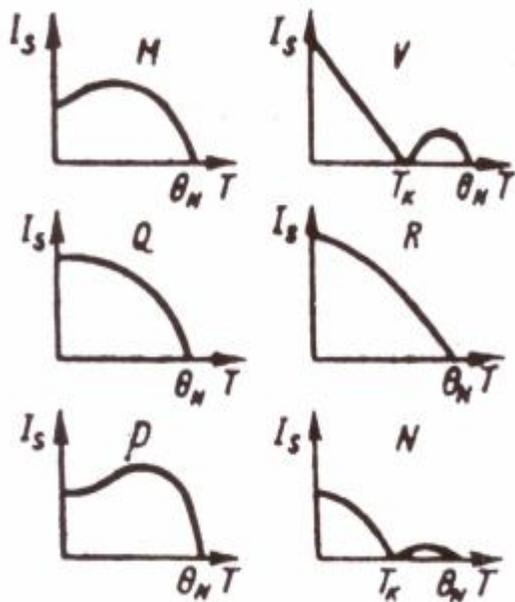


Рис 7. Основные типы температурной зависимости спонтанной намагниченности ферритов

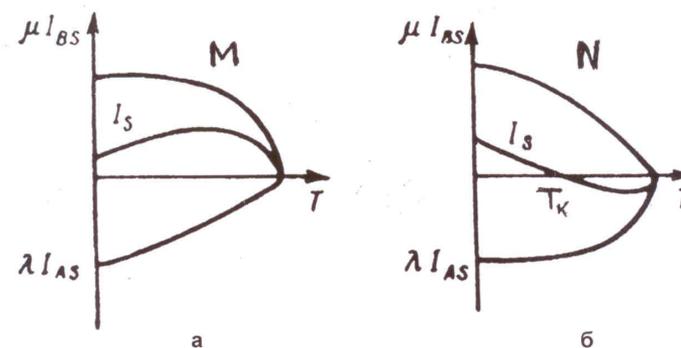


Рис 8. Возможные зависимости  $I_s(T)$  при различном температурном ходе  $I_{AS}$  и  $I_{BS}$

Схематически процесс самообращения намагниченности при охлаждении образца от  $T \approx T_C$  до комнатной температуры можно представить следующим образом.

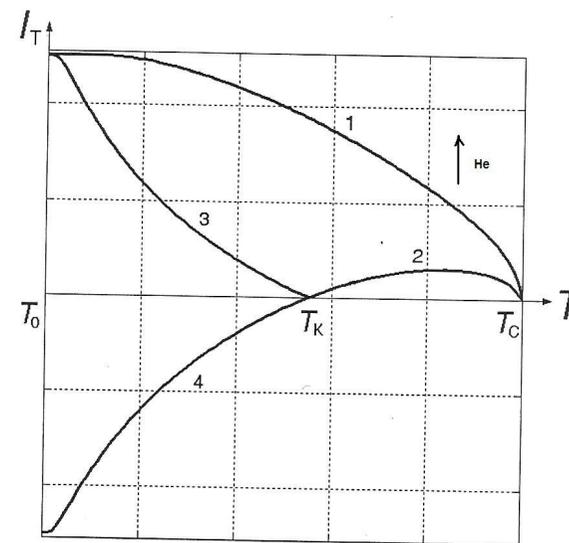


Рис.9. Схема процессов термонамагничивания без самообращения (кривая 1) и с самообращением (кривая 2+4).

На рис.9 приведена температурная зависимость термонамагниченности  $I_T(T)$  для разных случаев намагничивания. Кривая 1 – это ход  $I_T(T)$  при термонамагничивании в поле  $\vec{H}_e$  образца, не обладающего свойством самообращения; кривая 2 – термонамагничивание образца в  $\vec{H}_e$  со свойствами самообращения от  $T=T_C$  до  $T=T_K$ . Если при  $T=T_K$  коэрцитивная сила образца  $H_C < H$ , то дальнейшее намагничивание пойдет по кривой 3. Магнитные моменты будут ориентироваться по  $\vec{H}_e$  и изменения знака ТМ не произойдет. И, наконец, если  $H_C > H$ , то намагничивание пойдет по кривой 4 и в результате процесса самообращения (кривая 2 + кривая 4) возникнет антипараллельная  $H$  термонамагниченность ( $I_T(T)$ ) и при отключении поля – отрицательная TRM.

Итак, мы считаем, что механизм N-типа Нееля – это наиболее оптимальный физический механизм самообращения намагниченности, действующий в природе, и, с точки зрения физики магнетизма, этот механизм является естественным следствием основных свойств ферромагнетиков. Возможно, что в природе существуют и другие механизмы самообращения, имеющие особый, специальный характер, реализуемый в конкретных условиях двух- или многофазных ферромагнитных систем.

К сожалению, никто из известных ученых-магнитологов не разрабатывал теории этих возможных в природе механизмов самообращения намагниченности.

Мы полагаем, что в научной работе надо идти, по крайней мере, пытаться идти теми путями, которые намечили наши великие предшественники. В магнетизме – это П.Ланжевэн – автор теории диа- и парамагнетизма, П.Э.Вейс – создатель теории ферромагнетизма, Л.Неель – создатель теорий антиферромагнетизма и ферримагнетизма, получивший Нобелевскую премию за работы в области магнетизма.

Наиболее детальные исследования процессов самообращения намагниченности нами были проведены на образцах алмазоносных кимберлитов Якутии [17].

Было проведено экспериментальное исследование 34 образцов кимберлитов. Более половины из них обладали свойствами самообращения TRM. Исследования состава ферримагнитной фракции кимберлитов, выполненные на кафедре минералогии МГУ, показали, что самообращающиеся ферримагнетики были пикроильменитами. Пикроильменит – твердый раствор серии  $MgTiO_3 - FeTiO_3 - Fe_2O_3$  является магнезиальным аналогом гемоильменита, на котором впервые в 1953г. наблюдалось самообращение Т.Нагатай [7]. Магнитные свойства пикроильменитов, изученные на синтезированных и природных образцах, указывают на общность основных магнитных свойств гемо- и пикроильменитов. Возможно, что самообращение TRM в обеих системах обусловлено одним механизмом.

В качестве примера протекания процессов самообращения рассмотрим кривые термонамагниченности ТМ (при  $H > 0$ ) и TRM ( $H = 0$ ) образца кимберлита из якутской алмазоносной трубки «Мир», содержащего ферримагнитные пикроильмениты (Рис.10). Кривая 1 показывает зависимость начальной магнитной восприимчивости  $\chi_0$  от  $T$ . Обратим внимание на то, что смена знака ТМ (кривая 2) происходит при  $T$ , при которой  $\chi_0$  достигает максимума. Это указывает на то, что в

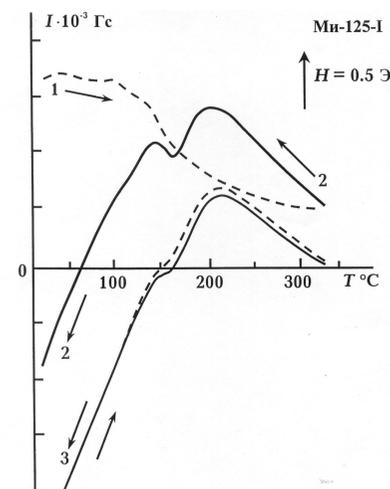


Рис.10. Самообращение полной (ТМ) и остаточной (TRM) термонамагниченности при охлаждении от 350°C.

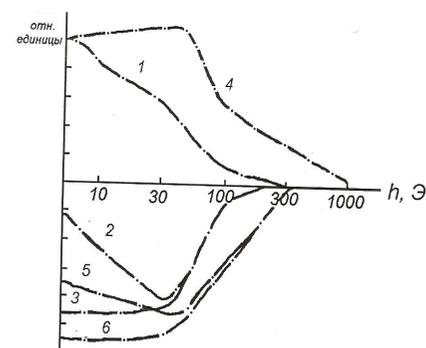


Рис.11. Размагничивание прямо- и обратномагнитных образцов кимберлитов в переменном поле  $h$ .

(размагничивание в переменном магнитном поле) дают также основание считать ферримагнитные пикроильмениты однофазными, так как они приобретают только однокомпонентную намагниченность [17].

Полученные экспериментальные результаты дают основание утверждать, что наблюдаемое нами самообращение ТМ и TRM на пикроильменитовой ферримагнитной фракции образцов якутских кимберлитов осуществляется в соответст-

составе ТМ находится большая по величине индуцированная компонента  $\chi_0 H$ , что и приводит к сдвигу точки компенсации  $T_K$  в область пониженных  $T$ . Кривая 3 – кривая температурной зависимости TRM. Кривая ТМ ( $T$ ) проходит выше кривой TRM( $T$ ) в связи с тем, как уже отмечалось, что  $TМ = TRM + \chi_0 H$ . На рис.11 представлены кривые размагничивания положительных и отрицательных TRM в переменном магнитном поле  $h$  частотой 50 Гц. Видно, что все исходные намагниченности однокомпонентны, а, следовательно, носители намагниченности – пикроильмениты однофазны.

На рис.12 показаны кривые образования TRM( $T$ ) в различных полях. По мере увеличения напряженности намагничивающего поля от 0,2 до 1,6 Гс происходит сдвиг кривых TRM( $T$ ) и точек компенсации влево по температурной оси. При  $H=0,2$  и 0,4 Гс  $T_K = 180^\circ C$ , при  $H=1,6$  Гс  $T_K = 40^\circ C$ . При этом максимальная величина отрицательной TRM достигается в поле  $H=0,8$  Гс. Поле  $H=4$  Гс гасит эффект самообращения.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что смена знака ТМ и TRM происходит при малых величинах  $H$ . Это указывает на то, что при  $T$  смены знака ТМ и TRM выполняется условие  $H < H_C$ , которое, как будет показано ниже, необходимо для прохождения процесса самообращения по механизму N-типа Л.Нееля. Результаты исследований

вии с теорией Л.Нееля [30] температурной зависимости  $I_S(T)$  ферримангнетиков, имеющих точку компенсации при  $T=T_K$ .

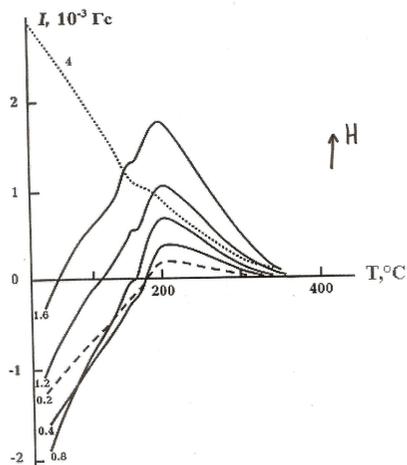


Рис. 12. Ход кривых  $I_T(T)=TM(T)$  при охлаждении в полях  $H$  напряженностью от 0,2 Э до 4 Э.

Чем более простым и не требующим большого количества энергии является механизм самообращения, тем более вероятна его большая распространенность в природе. Происходили ли на самом деле инверсии ГМП и как они влияли на эволюцию Земли. Для ответов на эти вопросы очень важно совершенствовать методы палеомагнитных исследований и интерпретаций. Ранее уже отмечалось, что единственный путь для решения этих вопросов – это очень детальное изучение проблем магнетизма горных пород в земной коре континентов и океана, установление физических механизмов намагничивания различных горных пород, взаимосвязи магнитных свойств горных пород с геотектоническими и древними термодинамическими процессами.

Правильная интерпретация палеомагнитных результатов важна не только для того, чтобы понять, были или не были инверсии ГМП и двигались ли геомагнитные полюса или литосферные плиты. Все эти проблемы связаны с эволюцией Земли, с глобальной экологией, с эволюцией биосферы, с образованием горных массивов и океанов, со строением и свойствами глубоких земных недр, со строением и эволюцией внутреннего и внешнего ядер Земли.

В статье [16] изучались подводные базальты разлома Романш, и было установлено, что механизмом самообращения намагниченности на подводных базальтах является механизм N типа Л.Нееля.

Фактически Л.Неель [30] разделил по характеру зависимостей  $I_S(T)$  ферриты на две группы. В первой из них  $I_S(T)$  имеет такую же зависимость от  $T$  (типы Q и R на рис 7), как и зависимости  $I_S(T)$  у ферромагнетиков. Ко второй группе относятся ферриты, имеющие зависимости  $I_S(T)$  типа N и V. На ферритах второй группы может наблюдаться самообращение намагниченности. В монографии С.В. Вонсовского [3] обсуждаются и другие, достаточно сложные аномальные эффекты зависимостей  $I_S(T)$  у ферримангнетиков.

#### Косвенное обменное взаимодействие

Как известно, в подрешетках ферритов действует обменная энергия  $W$ , которая упорядочивает магнитные моменты в подрешетках. Обменная энергия действует и между подрешетками. Между спинами соседних ионов металлов энергия  $W$  отрицательна, и это приводит к антипараллельному расположению спинов.

В ферримангнетиках ионы металлов (катионы) отделены в различной степени друг от друга отрицательно заряженными анионами ( $O^{2-}$ ). Расстояние между ионами металлов обычно слишком велико для прямого обменного взаимодействия, которое обычно проявляется на расстоянии  $\sim 10^{-8}$  см. Поэтому в веществах типа ферритов существенную роль в обменных взаимодействиях играют промежуточные анионы (сверхобмен, косвенный обмен).

Это приводит к тому, что в ферримангнетиках могут возникать очень сложные взаимодействия между ионами в подрешетках. В работе К.П. Белова [1] выдвигается предположение, что величины обменных взаимодействий в подрешетках ферритов могут быть существенно различными. В связи с этим К.П.Белов вводит понятие о «слабоупорядоченной» или «слабой» магнитной подрешетке.

По мнению автора [1], основываясь на понятии «слабой» подрешетки, можно объяснить аномальные зависимости  $I_S(T)$  типа N, M, P по Неелю, в том числе наличие точки компенсации  $T_K$ , когда  $I_{AS}=I_{BS}$ ; и другие аномальные зависимости  $I_S(T)$  ферритов. Успешная интерпретация аномальных эффектов с использованием представлений о «слабой» магнитной подрешетке при исследовании ферритов проведена в работе [19].

#### Диффузионная анизотропия

Изучаемые нами континентальные и подводные океанские горные породы содержат природные ферриты (магнетит, титаномангнетит) в виде мелких зерен, хаотически внедренных в базальтовую матрицу. Однако при исследовании свойств образцов горных пород, содержащих природные ферриты, мы рассматриваем их, не как отдельные частицы, рассеянные в базальтовом образце, а как единый массивный феррит.

Такая возможность объясняется тем, что базальты и содержащиеся в них частицы ферритов при своём естественном намагничивании подвергаются отжигу в геомагнитном поле. А известно [10], что при таком отжиге появляется диффузионная одноосная магнитная анизотропия в ферримангнитных частицах. Такая же анизотропия появляется и при лабораторном термонамагничивании образцов горных пород. Энергия одноосной анизотропии может значительно превосходить энергию кристаллографической анизотропии, и направление магнитного поля становится единственным направлением легкого намагничивания во всех ферримангнитных частицах. И это дает нам право рассматривать образец горной породы с частицами феррита как единый образец феррита.

Теория одноосной диффузионной анизотропии впервые создана Тикадзуми [9]. Своё развитие она получила в работе Нееля [30]. В геомагнитной лаборатории кафедры физики Земли были получены различные виды самообращения  $I_T$  при нагревах образцов горных пород континентов и дна океана. Однако при исследовании коллекций образцов горных пород в каждой коллекции, как правило, встречаются случаи и наличия и отсутствия самообращения намагни-

ченности у образцов. Это усложняет решение проблемы о существовании инверсии ГМП.

Рассмотрим случаи самообращения намагниченности, которые мы наблюдали в последнее время. В работе [8] экспериментально обнаружены при лабораторном термонамагничивании и размагничивании образцов подводных океанских базальтов новые аномалии поведения ферромагнетиков, зацементированных в базальтах.

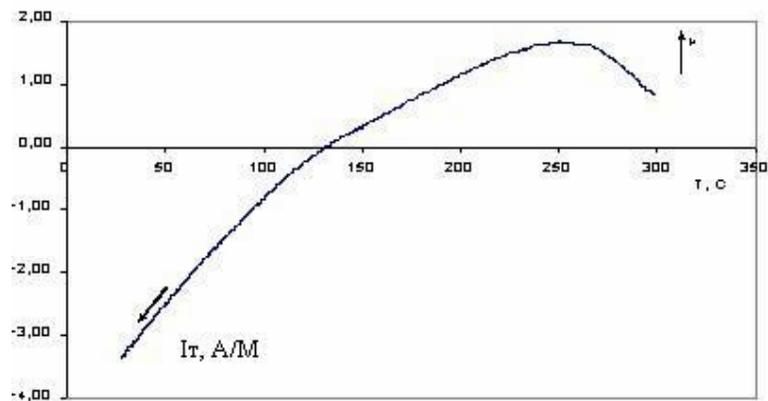


Рис 13. Образование TRM [ $T_{\max}=300^{\circ}\text{C}$ ,  $H=0,1$  мТл] Образец базальта разлома Романш 29-12

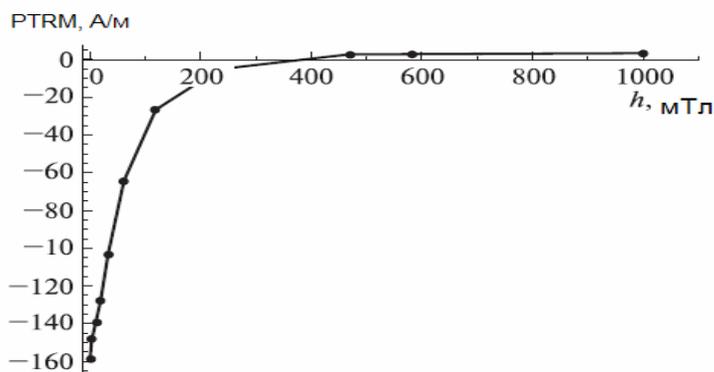


Рис 14а. Размагничивание переменным полем частичной термоостаточной намагниченности образца горной породы вулкана Лако (Чили), полученной в поле  $H = 0,1$  мТл в температурном интервале  $[600-575^{\circ}\text{C}]$  [18]

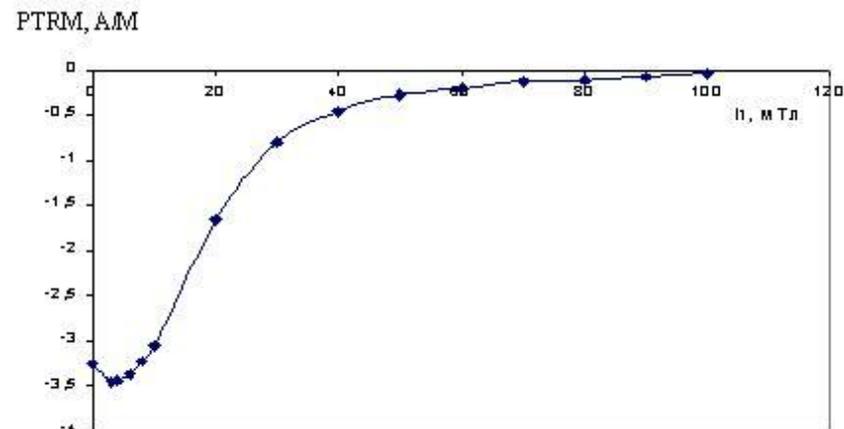


Рис 14б. График размагничивания переменным магнитным полем самообращенной PTRM [ $320-300^{\circ}\text{C}$ ,  $0,1$  мТл] образца базальта разлома Романш (№29-12).

На Рис 13 показано самообращение термоостаточной намагниченности, полученной при охлаждении образца базальта разлома Романш в магнитном поле  $H=0,1$  мТл, ферромагнитные зерна которого представлены титаномагнетитом с содержанием ульвошпинеля  $x=0,6 - 0,66$ .

Согласно данным исследования гистерезисных свойств базальта ферромагнитные зерна находятся в OD и PSD состоянии ( $H_{cr}/H_c=1.6$ ,  $I_r/I_s=0.37$ ).

В однофазных ферромагнетиках, образовавшаяся в результате самообращения антипараллельно намагничивающему полю, TRM должна быть однокомпонентной. Действительно, нами неоднократно было показано (Рис 14а,б),

что размагничивание переменным полем самообращенной частичной термоостаточной намагниченности показывает её однокомпонентный состав, что свидетельствует в пользу механизма самообращения намагниченности Нееля.

В частности, авторами [19] был проведен такой эксперимент: на образце подводного базальта, последовательно были созданы частичные термоостаточные намагниченности (PTRM), образованные в различных температурных интервалах. Затем образец нагревался от  $T$  жидкого азота до  $T \approx 300^{\circ}\text{C}$  в отсутствие магнитного поля (Рис 15). Видно, что при увеличении  $T$  величины намагниченности всех PTRM не уменьшаются, а растут до температур, близких к  $300^{\circ}\text{C}$ . Переход через ноль наблюдался в температурном интервале  $[-20^{\circ}\text{C} - +20^{\circ}\text{C}]$

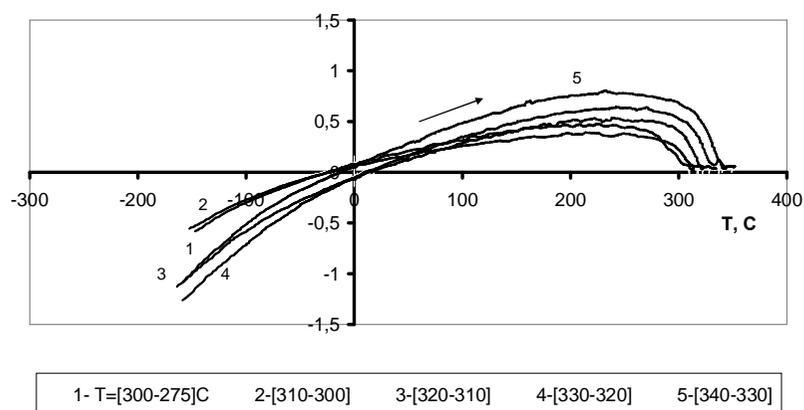


Рис 15. Изменение PTRM, созданных в разных температурных интервалах в  $H=0, 1 \text{ мТл}$ , при нагреве обр 29/1(2) в отсутствие поля [19]

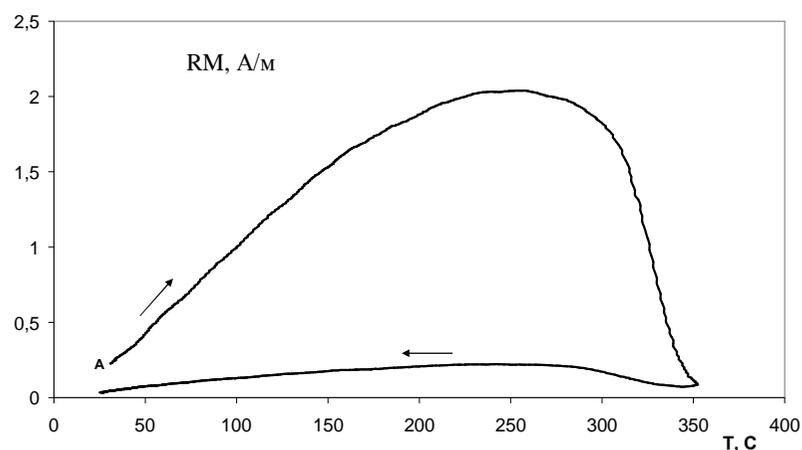


Рис 16. Изменение намагниченности образца 29/1(2) из нулевого состояния А при нагреве и охлаждении в отсутствие поля.

Рост намагниченности при нагреве в отсутствие поля можно объяснить тем, что одна из подрешеток ферримагнетика базальтового образца «слабая», она имеет существенно меньшую, чем другая подрешетка, обменную энергию, упорядочивающую магнитные моменты в подрешетке. При нагреве это упорядочивание разрушается, что приводит к росту суммарной спонтанной намагниченности образца. При температурах около  $300^\circ\text{C}$  разрушается магнитный порядок и у другой

подрешетки, что приводит к уменьшению суммарной намагниченности образца до нуля.

Такой же эффект роста намагниченности при увеличении  $T$  и в отсутствие магнитного поля получен на том же образце, когда его PTRM ( $350^\circ\text{C}-300^\circ\text{C}$ ) была перед нагревом размагничена переменным магнитным полем. (Рис 16). Эффект исчезает только при нагреве выше точки Кюри ферримагнетика ( $\sim h=0,1 \text{ Тл}$ ).

Приведенные данные о различных аномальных процессах намагничивания ферритов, позволяют высказать такое предположение: направление термонамагниченности образцов горной породы, имеющих свойства ферритов, не всегда отражает направление намагничивающего поля. Требуются, как минимум, дополнительные серьёзные физические исследования свойств термонамагниченности конкретного феррита, чтобы определить соответствует ли направление TRM или NRM направлению магнитного или геомагнитного поля, в котором эти намагниченности были созданы.

Одним из способов определения происхождения обратной намагниченности горных пород является сопоставление данных о горных породах разных типов из разных мест и статистический анализ соотношений полярности и других химических и физических свойств образцов исследуемых горных пород.

#### Возрастное изменение состава ферримагнитной фракции вулканитов и самообращение TRM.

После открытия явления самообращения термонамагниченности горных пород [7] возникла дилемма о причине обратной естественной намагниченности  $I_r$ . По мнению С. Уеда, впервые экспериментально обнаружившего эффект самообращения термоостаточной намагниченности TRM под руководством Т. Нагата, его причина скорее всего связана с очень сложным квантово-механическим взаимодействием в минералах, содержащихся в горных породах [22].

Эксперименты по самообращению намагниченности проводились преимущественно на вулканитах. Как известно, ферримагнитная фракция (ф.м.ф.) вулканитов в основном представлена титаномагнетитами и продуктами их окисления и распада твердого раствора магнетит - ульвошпинель [7]. К настоящему времени установлено, что на определенной стадии этих процессов имеет место явление самообращения TRM [13].

Представляет интерес проследить, у вулканитов какого возраста и соответственно при наличии каких особенностей состава и структуры ферримагнитной фракции воспроизводится в лаборатории эффект самообращения TRM или PTRM.

Известно, что с течением времени происходит изменение состава и структуры ферримагнитной фракции горных пород [11]. Известно также, что  $T_c$  является фазочувствительной магнитной характеристикой [14]. Однако, подробного сопоставления величины точки Кюри ( $T_c$ ) с возрастом различных вулканитов нет. К настоящему времени нами собраны обширные экспериментальные данные по исследованию магнитных свойств вулканитов как континентальных, так и подводных. Из рис 17, можно видеть, что разброс  $T_c$  довольно значителен, однако прослеживается тенденция роста  $T_c$  с возрастом породы. Современные океанские базальты (извержение 1993г) имеют только низкие  $T_c$  ( $120-200^\circ\text{C}$ ) [28]. Величины  $T_c < 350^\circ\text{C}$  еще встречаются у вулканитов возраста менее 100-150 млн. лет. По-видимому, в

них еще сохраняются титаномагнетиты и титаномаггемиты – продукты однофазного окисления титаномагнетитов. Вулканиды возраста более 400 млн. лет содержат только магнетит – конечный продукт процесса окисления и распада твердого раствора магнетит – ульвошпинель, т.е. в древних вулканитах такие процессы завершаются.

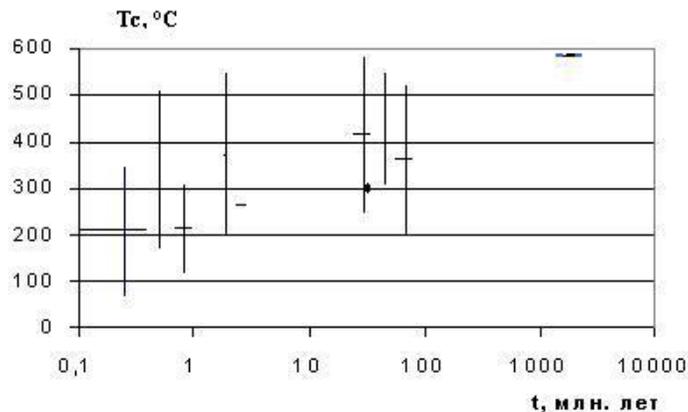


Рис 17. Зависимость точки Кюри  $T_c$  от возраста вулканитов.

Случаи воспроизведения самообращения TRM или PTRM в лаборатории установлены на вулканитах определенного возраста. В основном это вулканиты с возрастом примерно до 100 млн. лет. В титаномагнетитах (ТМ) самообращение TRM ожидается на определенной стадии однофазного окисления ТМ. Такое предположение было высказано ранее при исследовании подводных базальтов хребта Шписс и разлома Романш (Атлантический океан) [12, 16]. Наличие напряжений в окружающей среде усиливает процесс однофазного окисления в вулканитах [6].

Вероятно этим, а так же повышенными окислительными условиями можно объяснить то, что достаточно молодые вулканиты имеют величины точек Кюри, соответствующие более поздней стадии окисления ТМ.

Более древние вулканиты возраста до 250 млн. лет только после термообработки в лаборатории обнаруживали явление самообращения TRM [5, 15]. В магнитных зернах этих вулканитов были обнаружены структуры распада твердого раствора магнетит – ульвошпинель – магнетит в естественном состоянии на конечной стадии [5]. При термообработке до высоких температур (~600°C и временной выдержке) имела место регомогенизация структур распада, и на определенной промежуточной стадии этого процесса было обнаружено частичное самообращение TRM. Следовательно, самообращение NRM могло иметь место в более молодом возрасте этих вулканитов (оливиниты из интрузии).

Особое место занимают древние породы (~360 млн. лет). Их магнитные свойства определяются в частности пикроильменитами – членами серии твердых растворов гематит – ильменит – гейкилит, содержащимся в кимберлитах трубок

взрыва, образовавшихся при высоких РТ-условиях. В них обнаружено более яркое полное самообращение TRM [17] (рис. 10).

Таким образом, при лабораторном моделировании самообращения TRM приходится подбирать среду при термообработке породы, возвращаясь в то состояние твердого раствора ТМ, при котором выполняются необходимые условия для воспроизведения эффекта самообращения TRM. Это вовсе не означает, что на предыдущей стадии процесса или последующей это явление не имело места. Из этого следует, что самообращение намагниченности имеет место на промежуточной стадии процесса окисления или распада твердого раствора магнетит – ульвошпинель. Для того, чтобы наблюдать на природных образцах самообращение в лаборатории, необходимо либо ускорять процесс, либо направлять его в обратную сторону, если это возможно. Примерами могут быть титаномаггемиты подводных базальтов, либо титаномагнетиты интрузий на стадии распада твердого раствора.

На сегодняшний день можно утверждать, что вполне возможно случаев самообращения намагниченности пород в природе гораздо больше, т.к. в лаборатории по отмеченным выше причинам не всегда удается воспроизвести это явление.

В последнее время появились экспериментальные данные о самообращении намагниченности в осадочных горных породах [24]. Было показано, что осадочные горные породы Арктического океана (близ Аляски), содержащие титаномаггемит, обладают частичным самообращением намагниченности в области 100-200°C. Возраст осадков относится к эпохе Брунеса (35-45 тыс. лет). Ранее в вулканитах Франции (эпоха Брунес, экскурс Лашамп-Олби) было также обнаружено частичное самообращение намагниченности в той же области температур [25].

Основываясь на этих данных можно предполагать, что обратная намагниченность пород этого возраста обусловлена не кратковременными изменениями ГМП (экскурсами), а особенностями состава ферритмагнитной фракции, горных пород и связаны с явлением самообращения намагниченности.

Итак, состав ферритмагнитной фракции вулканитов изменяется в РТ-условиях окружающей среды. Процессы окисления и распада твердых растворов в горных породах с возрастом более примерно 200 млн. лет ( $T_c > 500^\circ\text{C}$ ) находятся на завершающей стадии. Явление самообращения TRM преимущественно возникает на промежуточной стадии этих процессов. Оно распространено гораздо шире, чем предполагалось раньше. Обратная намагниченность определенного возраста может быть связана не с экскурсами ГМП, а с явлением самообращения намагниченности.

### Заключение

Магнитное поле Земли благодаря наличию магнитосферы не только защищает нашу планету от сильной радиоактивности солнечного ветра, но и оказывает большое экологическое влияние на биосферу и на жизнь на земле. Известны исследования, когда мыши, находящиеся в экранированном от ГМП пространстве начинали болеть и погибали. Изменения магнитной активности, магнитные бури оказывают существенное влияние на самочувствие и здоровье человека.

По нашему мнению, движения магнитных полюсов на тысячи км от географических также оказывают большое влияние на погоду и климат Земли. Перемещения ГМП полюсов приводят к изменению распределения силовых линий

ГМП над поверхностью Земли. Это влияет на перемещения частично ионизированных огромных воздушных масс. По нашему мнению, именно изменения погоды наблюдаются в настоящее время на Земле, а не глобальное потепление, как предполагают некоторые ученые.

Необходимо проводить более глубокие научные исследования влияния ГМП на экологическую обстановку на нашей планете. Требуется серьезных исследований перемещение магнитных полюсов на тысячи км от географических. Необходимо определить, есть ли ограничение на отклонения геомагнитных полюсов от географических? Если таких ограничений нет, то можно предположить, что перемещения магнитных полюсов на 2-3 тысячи км. – это начало грядущих инверсий ГМП. И наоборот, если ограничения отклонений ГМ полюсов есть, то необходимо определить причины этих ограничений.

ГМП – это сложная система, оказывающая большое позитивное влияние на жизнь на Земле. И живые существа приспособились к существованию ГМП: птицы ориентируются по ГМП при длительных перелетах. Вариации ГМП связаны с солнечной и земной магнитной активностью и оказывают существенное влияние на жизнь и здоровье человека, а возможно и на такие стихийные явления, как землетрясения и цунами.

С древнейших времен люди приписывали магниту чудодейственное положительное влияние на здоровье человека [2].

В наше время проводится огромное число опытов по лечению различных болезней с помощью магнитного поля. Проводятся наблюдения по влиянию слабого геомагнитного поля на поведение птиц, животных и растений.

Во всяком живом организме имеются атомы с нескомпенсированными магнитными моментами. В организме человека и животных имеется значительное количество железа. Оно содержится в гемоглобине, в дыхательных ферментах. Его недостаток ухудшает самочувствие человека. У взрослого человека в организме должно быть 4-5 г. железа.

Собственные магнитные поля живого организма могут возникнуть в результате движения ионов и радикалов (биотоки), а также от случайного попадания в организм мельчайших ферромагнитных частиц.

По геологическим и биологическим данным жизнь на Земле возникла приблизительно одновременно с появлением геомагнитного поля. Следовательно, все живые существа и человек, а также их предки и пращуры живут и жили в геомагнитном поле. Поэтому и с позиций повседневной жизни человека и живой и неживой природы геомагнитное поле всегда было и есть одним из важнейших факторов.

Существенным экологическим фактором является магнитная активность, которая связана с солнечной активностью. Выше уже отмечалась роль магнитосферы при взаимодействии с солнечным ветром. Однако наиболее активными процессами в солнечной атмосфере являются хромосферные вспышки. Их возникновение является следствием магнетизма Солнца. Вспышка начинается с быстрого выделения энергии в верхней хромосфере или короне. За несколько минут освобождается энергия от  $10^{31}$  до  $10^{25}$  Дж. Вспышки порождают потоки быстрых заряженных частиц и излучение в рентгеновском диапазоне волн.

Вывравшиеся за пределы солнечной короны корпускулярные потоки заряженных частиц могут достигать магнитосферы Земли, повышая существенно земную магнитную активность.

Экологические аспекты геомагнетизма находятся в самом начале своего изучения. Влияние геомагнитного, межпланетного и галактического магнитных полей приводит к очень серьезным процессам с огромной энергией, которые могут как положительно, так и отрицательно воздействовать на нашу планету и окружающее планету космическое пространство.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Грант №08-05-00623

#### Литература

1. Белов К.П. //УФН, 1996, т.166, №6, с. 669-681
2. Белов К.П., Бочкарев Н.Г. Магнетизм на Земле и в космосе. 1985, 206 с
3. Вонсовский С.В. Магнетизм. Изд. «Наука» Москва, 1971.
4. Гильберт У. О магните, магнитных телах и большом магните – Земле. М. 1956, 411 с
5. Жилиева В.А., Колесников Л.В., Петрова Г.Н. //Физика Земли, 1970, №10, с. 50-70
6. Максимочкин В.И., Якупова А.М.//Физика Земли, 2003, №5, с.60-64
7. Нагата Т.. Магнетизм горных пород. Изд. «Мир», Москва, 1965, 346 с.
8. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М. «Мир» 1986, 527 с.
9. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества. Москва «Мир», 1983, 302 с.
10. Трухин В.И. Введение в магнетизм горных пород. Изд. МГУ, 1973, 275 с.
11. Трухин В.И.. Взаимодействие в системе литосфера-гидросфера-атмосфера. //М.Недра, 1996, Раздел 1 с. 47-85
12. Трухин В.И., Багин В.И., Булычев Н.А. и др. //Физика Земли, 2000, №2, с.68-82
13. Трухин В.И., Безаева Н.С.//УФН, 2006, т.176, №5, с.507-536
14. Трухин В.И., Гаранин В.К., Жилиева В.А., Кудрявцева Г.П. Ферримагнетизм минералов//Изд. Московского университета, 1983, 96 с
15. Трухин В.И., Жилиева В.А., Зинчук Н.Н. и др. Магнетизм кимберлитов и траппов. Изд. Московского Университета, 1989, 165 с.
16. Трухин В.И., Жилиева В.А., Курочкина Е.С. Физика Земли, , 2004, №6 , с.42-53
17. Трухин В.И., Караевский С.Х. Самообращение намагниченности природных пикроильменитов. М., Изд.МГУ, 1996, 56 с.
18. Трухин В.И., Максимочкин В.И., Елесин Ю.А. и др. Самообращение намагниченности природного феррита. Вестник Московского университета, серия 3, 2007, Т.62, №1, с.51-58.
19. Трухин В.И. , Максимочкин В.И., Минина Ю.А.//Вестник Московского Университета, сер.3, 2009, №3, с.103-107
20. Трухин В.И., Показеев К.В.. Куницын В.Е. Общая и экологическая геофизика. М. ФИЗМАТЛИТ 2005, 576 с.
21. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Изд.Л.ЛГУ., 1978, 592 с
22. Уеда С.Новый взгляд на Землю//М.Мир, 1980, 214 с.
23. Cande S, Kent D.V. //J. Geophys. Res.,1992, v. 97, p. 13917-13951
24. Channell J.E.T, Xuan C.// Earth Planet Sci Letters, 2009, v. 284, p. 124-131

25. Heller, Petersen//Phys. Earth Planet Int., 1982, v.30, p.358-372
26. Jacobs J.A. //Geomagnetism, V.2. Academic Press, 1987, 579 p.
27. Jacobs J.A. //Reversal of the Earth's Magnetic Field. Second edition. Cambridge University Press, 1994, 346 p.,
28. Kent D.V., Gee J.// Geology, 1996, v.24, №8, p.703-706
29. Merrill R.T., McElhinny M.W., McFadden Ph.L.// The magnetic Field, of the Earth, Academic Press, 1998, 531 p.
30. Neel L.// Ann. Phys., 1948, v.3, №2, p.137-198.

## К МЕХАНИЗМУ ФОРМИРОВАНИЯ ГИГАНТСКИХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В ОКЕАНЕ.

Шелковников Н.К.

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

На основании проведенных экспериментов в лабораторных условиях предложен один из возможных механизмов формирования гигантских ветровых волн в океане. Показано, что при лобовом столкновении двух солитонов в каналах при отсутствии течения возникает импульс(взрыв) пиковая высота которого превышает сумму двух взаимодействующих солитонов. Время формирования импульса составляет доли секунды.

Несмотря на длительную историю исследования волн, когда, казалось бы, что основные задачи в этой области в большей или меньшей степени осознаны и решены, появились новые проблемы, связанные с выявлением необычных волн в морях и океанах (и даже в крупных озерах)[1,2,3,4]. Названий этим волнам дано много, в том числе «Волны-убийцы»(ВУ), «Гигантские волны» (ГВ), которыми мы будем в дальнейшем пользоваться. В мировой практике накоплено большое количество свидетельств о встрече судов с необычными волнами, обладающими большой высотой, неожиданностью их появления и исчезновения. Такие волны наблюдались в различных частях мирового океана. Необычным оказалось то, что ВУ существенно выше окружающих волн. По данным опубликованных работ ВУ наиболее часто возникают при штормовых условиях. Они могут быть как в открытом океане, так и в шельфовой зоне. Учитывая, что поле ветра оказывает существенное влияние на генерацию ВУ, более подробно остановимся на этом вопросе.

Согласно Попявину[5], волны цунами, наряду с сейсмическими, могут иметь метеорологическое происхождение, так называемые, метеоцунами. Как в том, так и в другом случаях при определенных условиях они могут описываться теорией уединенных волн. Так же как и цунами сейсмического происхождения, эти волны, при подходе к берегу резко увеличивают свою высоту и могут причинять ущерб не меньший, чем цунами сейсмического происхождения. Следует отметить, что в данном случае речь идет о длинных и уединенных волнах, возникающих при перемещениях циклонов умеренных широт и тайфунов. Возникновение метеоцунами связано прежде всего со статическим эффектом неравномерности распределения давления в циклонах. Известно, что понижение атмосферного давления на 1 мм ртутного столба вызывает повышение уровня моря на 13,6 мм и, наоборот, повышение давления на 1 мм приводит к понижению уровня на 13,6 мм.

Если циклон длительное время остается более или менее стационарным, то в его центре, где давление минимальное, создается подъем уровня в виде холма, чему способствует и система ветров, сгоняющих воду к центру циклона. При резком смещении или заполнении циклона холм под действием силы тяжести начинает оседать, возбуждая свободные волны, длина которых соизмерима с размерами циклона. При благоприятных условиях возникший холм может смещаться в виде уединенной волны, постепенно оседая без образования обычных поперечных волн. Наиболее часто метеоцунами имеют характер вынужденной барической волны с длиной, равной удвоенному диаметру вызвавшего ее циклона, и скоростью перемещения, соответствующей скорости перемещения циклона. Наблюдается различие между волнами цунами и метеоцунами. Так, цунами, вызванные землетрясением, имеют относительно правильную синусоидальную форму, в то время как метеоцунами представляют обычно волну довольно сложной формы, в виде деформированного купола.

Исследование влияния поля ветра на процесс развития метеоцунами рассмотрено в работе Пелиновского [6]. Для описания данного механизма он использовал уравнение Рейнольдса. Кроме обычных граничных условий на дне и свободной поверхности для вязкой жидкости использовалось условие непрерывности тангенциальных напряжений. Поверхностное напряжение обусловлено полем ветра, а придонное обеспечивает диссипацию энергии волн. Замыкание уравнения производилось с учетом уравнения неразрывности. Данная модель часто используется для решения многих задач динамики прибрежной зоны. Пелиновский считает, что метеоцунами могут генерироваться неоднородностями поля ветра, причём с усилением скорости ветра генерация цунами усиливается. Прохождение тайфуна всегда сопровождается колебаниями уровня океана. В отдельных случаях резонансно-го движения тайфуна, когда его скорость близка к скорости движения в океане, генерация метеоцунами может быть особенно эффективной. Самые огромные метеоцунами и представляют собой гигантские волны, или ВУ.

В работе[2] приведен пример регистрации аномально высокой ветровой волны в районе Гелинджика(Черное море). Выполнен анализ этих регистраций, проведено численное моделирование. На основании этого авторы пришли к выводу о пространственной динамике волн и сделали попытку определить механизм формирования аномальных волн. Измерения были проведены на глубине 85м с помощью волноизмерительного буйа. Этот буй был установлен в 1996г и предназначался для измерения параметров волнения, в том числе и для определения направления распространения волн. На нем проводилась первичная обработка данных измерений и передача их на приемное устройство, расположенное в лаборатории южного отделения института океанологии РАН.(г.Геленджик) Было выявлено наличие в волнограммах аномально высокой волны, ее высота составляла 10,32м. В дальнейшем для анализа данных было использовано упрощенное дисперсионное соотношение (как авторы отмечают "для предела бесконечно глубокого моря"). На основе этого упрощения были определены фазовая и групповая скорости волн. Авторы отмечают, что зарегистрированной волне соответствует смещение водной поверхности на 8,87м, а высота пиковой волны составляла 10,3м. Указывается, что эта волна выросла на фоне интенсивных волн, амплитуда которых была больше характерной амплитуды окружающих волн, район появления аномально высокой волны был ограничен 20м, а ее появление формировалось за 4,3с. В числе возмож-

ных механизмов формирования ВУ авторы считают следующие: линейная (или с учетом нелинейных поправок) фокусировка волновых групп в результате действия дисперсии, изменчивых условий распространения волн (переменная батиметрия, изменение направления и захват течениями), действие переменных атмосферных явлений, нелинейная модуляционная неустойчивость, взаимодействие солитоноподобных волновых групп. По мнению авторов существенным ограничением проведенного ими исследования является пренебрежение поперечной волновой динамикой, которая может играть важную роль. Учет неоднородности волны в поперечном направлении не может быть выполнен на основе регистрации в одной точке. К сожалению, в статье не указано: направление распространения волн, наличие течений, направление скорости ветра и других метеопараметров. Так же не приведены данные батиметрии в районе буя, хотя рельеф дна имеет большее значение в формировании уединенных волн. Об этом писал еще Крылов[7]. В своих воспоминаниях он отмечал, что в 1912г. миноносец «Новик» проходил 20узловым ходом на расстоянии 6 миль мимо маяка, был мертвый штиль. Вдруг от корабля оторвалась высокая волна. Она «вкатилась» на пристань и смыла все, что там было, в том числе ребенка. Оказалось, что на открытом плесе на пути «Новика» была короткая банка с глубиной в 35 футов. Эта глубина оказалась критической для скорости 20 узлов, на ней и образовалась громадная волна, которая и натворила много бед.

В последние годы в рамках международной программы MaxWave были проведены наблюдения как с кораблей, так и со спутников. Благодаря этому было подтверждено появление волн высотой до 30м. Кроме того стало ясно, что гигантские волны не редкость. Однако вопрос о механизме зарождения ВУ в большей степени остался открытым, хотя в публикациях обсуждается наиболее вероятные причина этого явления.

На протяжении веков истории о гигантских одиноких волнах, неожиданно вырастающих среди океана, воспринимались обществом и учеными, скорее, как морские легенды. Еще недавно специалисты утверждали, что подобные волны появляются не чаще одного раза в 10 лет. Однако, шведским ученым удалось, наконец, завершить работы по компьютерному прогнозу 30-метровых (и более) волн и, как они считают, найти ключ к ответу на загадку возникновения редкого природного феномена. Теперь очередь за географами, которым предстоит создать карту Мирового океана с указанием наиболее опасных районов, где в то или иное время возможны смертельные атаки волн-убийц. Тем не менее, в настоящее время нет полной ясности о механизмах формирования ВУ и их исчезновения. Делаются попытки теоретического и экспериментального объяснения этого феномена. Наиболее вероятными гипотезами образования ВУ является пространственно-временная фокусировка поверхностных волн, дисперсионное сжатие волновых пакетов.

В данной работе делается попытка выяснить одну из возможных причин возникновения таких волн. Исходя из анализа публикаций и собственных экспериментов в лабораторных условиях, мы пришли к выводу, что самым энергоемким процессом генерации ВУ является столкновение двух уединенных волн на встречных курсах. Для подтверждения этого были проведены специальные эксперименты в прямолинейном канале. Встречные УВ создавались механическим способом в спокойной жидкости. Было показано, что если волны, идущие навстречу друг другу, имеют одинаковые размеры, то в результате их столкновения в доли секунды возникает импульс высотой превышающий сумму высот сталкивающихся волн. (В

работе [2] время формирования гигантской волны составляло 4,3сек.) После столкновения каждая из волн распространялась в противоположном направлении, то есть от центра столкновения (Фото.1).

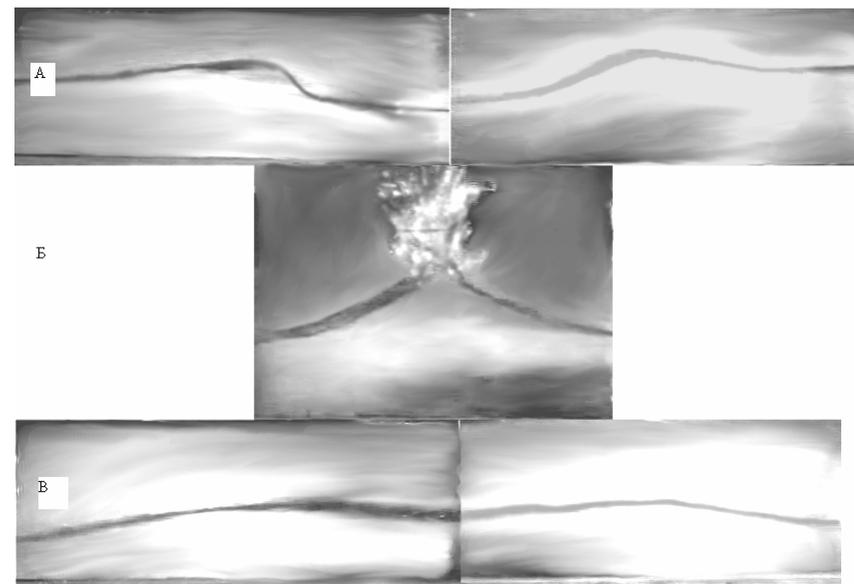


Фото.1 Формирование импульса в результате взаимодействия двух волн в прямолинейном канале.

а) две волны идущие на встречу друг другу.

б) момент лобового столкновения двух уединенных волн(взрыв).

в) волны, расходящиеся после взаимодействия, иллюстрирующие свои частицеподобные свойства.

Если же взаимодействующие волны имели разные размеры, то после их столкновения образовывался импульс с вершиной, наклоненной в сторону меньшей волны, в эту же сторону распространялась волна после столкновения. То есть большая волна проходила через меньшую, которая исчезала(Фото.2). На (Фото3) приведен пример столкновения двух уединенных волн, созданных механическим способом, на встречных курсах в кольцевом аэрогидроканале при отсутствии течения. Из рисунков видно, что при столкновении двух близких по размерам уединенных волн в доли секунды возникает огромный столб воды.

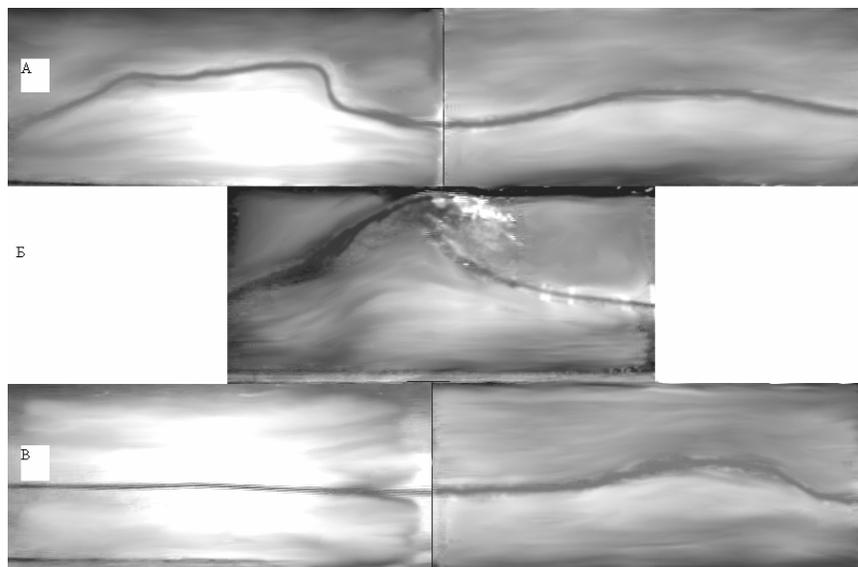


Фото.2 Взаимодействие двух уединенных волн разных размеров в прямоугольном канале.

- а) две волны перед их столкновением. Левая волна больше правой.  
 б) столкновение (взрыв) волн. Виден наклон вершины импульса в сторону меньшей волны.  
 в) после взаимодействия осталась только одна волна, идущая вправо. То есть большая волна прошла через меньшую.

Данные примеры созвучны с высказываниями некоторых ученых о том, что одним из свойств волны-убийцы является неожиданное ее появление и неожиданное исчезновение.

Аналогичный процесс прохождения одного солитона через другой, следующих друг за другом наблюдался нами и в кольцевом аэрогидроканале. Процесс образования солитонов проходил следующие стадии. После включения вентилятора образовывалась рябь, затем появлялись гравитационные волны, близкие к гармоническим. Их амплитуда и длина постепенно увеличивались, а профиль трансформировался. Возникали трохоидальные и кноидальные волны. Далее, через некоторое время образовывался цуг из 3 – 4 солитонов. В результате нелинейного взаимодействия, когда задний солитон догонял впереди идущий и проходил через него, формировался один импульс в виде видимого солитона на поверхности жидкости и антисолитона внутри жидкости.

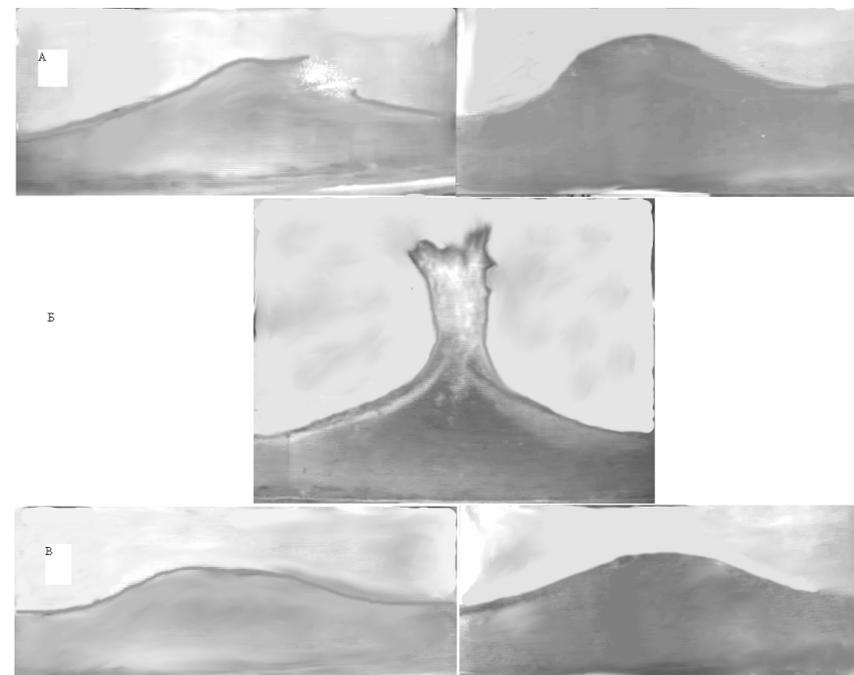


Фото.3 Столкновение двух уединенных волн в кольцевом аэрогидроканале.

- а) две уединенные волны перед их столкновением  
 б) момент взаимодействия двух волн (при малом угле между ними)  
 в) расходящиеся «частицеподобные» волны после столкновения

Под действием ветра профиль солитона деформировался: подветренный склон несколько был укрупнен, а наветренный – растянут. Эта деформация тем сильнее, чем больше значение скорости ветра. После прохождения солитона поверхность жидкости в первый момент оставалась сглаженной. Под действием постоянно дующего ветра, в промежутке времени между последующими прохождениями солитона возникают короткие волны, которые в дальнейшем поглощаются следующим солитоном. И это повторялось многократно.

Наиболее интересным является процесс взаимодействия двух солитонов с близкими амплитудами. В этом случае при сближении солитонов до ~70 см происходило их частицеподобное взаимодействие, в результате которого осуществлялся обмен импульсом между ними, после чего второй солитон отставал на ~150 см, а первый – дополнительно смещался вперед. После этого второй солитон под действием ветра начинал увеличиваться, сближаться с первым и экранировал его. В результате второй солитон догонял первый и их амплитуды оказывались равными, происходило их очередное взаимодействие. Этот процесс продолжался до тех пор пока впереди не оказывался солитон с меньшей амплитудой. В этом случае боль-

ший солитон несколько раз проходил через меньший, в результате оставался единственным солитон, который затухал только после выключения ветра.

Детальное рассмотрение процессов взаимодействия уединенных волн в кольцевом канале показало на качественное совпадение выводов численных экспериментов о частицеподобности солитонов, справедливого только для случая близких значений амплитуд солитонов. При большой же разнице их значений – в нашем случае солитоны проходили друг через друга. При этом явление рекуррентности не наблюдалось, солитон сохранял свои параметры вплоть до выключения ветра.

Возможность лобового столкновения двух ветровых солитонов в океане подтверждается данными, полученными в районе восточного побережья Южной Африки, где, в результате изменения направления действия ветра на противоположное формировались две группы противоположно направленных волн. Взаимодействие которых могло привести к возникновению гигантской волны, высотой 18-25м.

На основании полученных нами экспериментальных данных показано, что при лобовом столкновении двух солитонов возникает импульс, превышающий сумму двух взаимодействующих солитонов. Время формирования импульса составляет доли секунды. При столкновении одинаковых солитонов они проявляют частицеподобные свойства и расходятся в разные стороны. Если размеры солитонов разные, то больший солитон проходит через меньший, который в результате взаимодействия исчезает. На основании выше изложенного делается вывод о том, что одним из возможных механизмов генерации ветровых гигантских волн в океане является лобовое(или под малым углом) столкновение двух ветровых солитонов.

## ЛИТЕРАТУРА

9. Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. «Волны-убийцы: факты, теория и моделирование». –Н. Новгород: Изд-во Нижегород. Гос. Техн. Ун-т 2004-158с.
10. Дивинский С.Ф., Левин Б.В. Лопатухин Л.И., Пелиновский Е.Н., Слюняев А.В. Аномально высокая волна в Черном море: наблюдение и моделирование// Доклад РАН.-2004.-395,№5.-с.948-950.
11. Бабулин С.И., Иванов А.Ю., Островский А.Г. Волны-убийцы и их дистанционное зондирование//Исследование земли из космоса-2006.-№1.-с.77-92.
12. Доценко С.Ф., Иванов В.А. Волны-убийцы, МГИ, НАН Украины, Серия: Современные проблемы океанологии. Выпуск1. 2006г.с.1-42.
13. Понявин И.Д., Волны цунами (разрушительные волны) Л. 1965г.
14. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. Нижний Новгород. Институт прикладной физики РАН., 1996, с.276.
15. Крылов А.Н. «Мои воспоминания». Издательство АН ССР. 1953г.

## ЛАЗЕРНАЯ ФЛУОРИМЕТРИЯ УРАНИЛА И ЕГО КОМПЛЕКСОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Е.А. Ширшин<sup>1</sup>, В.Г. Петров<sup>2</sup>, Г.С. Будилин<sup>1</sup>, Б.Л. Обморошев<sup>1</sup>, С.Н. Калмыков<sup>2</sup>,  
В.В. Фадеев<sup>1</sup>

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

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

## ВВЕДЕНИЕ

В работе приводятся первые результаты исследования, направленного на создание лазерного метода определения парциальных концентраций уранила и его комплексов в водных средах. Хотя разработка этих методов мотивирована задачей оптимизации процесса добычи урана, они могут использоваться и в мониторинге урана в сточных водах, поступающих в природные водоёмы, и, тем самым, для оперативного прогноза экологически опасных явлений, связанных с добычей урана.

Учитывая сложность задачи, можно ожидать успеха в её решении только на основе результатов фундаментальных исследований природы и механизмов формирования сигналов, которые выбраны в качестве источников информации об объекте. В данной работе таковыми являются характеристики флуоресценции при лазерном возбуждении и определяемые по ним молекулярные фотофизические параметры.

Первые результаты лабораторных исследований, выполненных в этом направлении, показали, что специфика флуоресцентных и фотофизических характеристик уранила и его комплексов позволяет развить несколько подходов к решению поставленной задачи.

## ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ХАРАКТЕРИСТИКАХ УРАНИЛА

При постановке и проведении исследований в данной работе были использованы литературные данные, краткое изложение которых даётся в данном разделе статьи.

### Спектральные характеристики уранила при комнатной температуре.

Уранил ( $\text{UO}_2^{2+}$ ) — наиболее устойчивый продукт гидролиза урана U(VI). В растворах (в частности, используемых в технологическом процессе выщелачивания урановых руд) уранил образует комплексы с анионами-лигандами, такими как  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$  и др. [1-5]. В результате присоединения лигандов, спектральные и фотофизические характеристики уранила (положение максимумов и интенсивность полос люминесценции, время жизни в возбужденном состоянии) претерпевают значительные изменения [2]. В литературе существует множество работ (см, например, [5]), ставящих своей целью объяснить и оценить количественно влияние лигандов на фотофизические параметры уранила. Тем не менее, исчерпывающей теории этого процесса не существует.

Уранил представляет собой линейную молекулу  $\text{O}=\text{U}=\text{O}$  с длиной связи 1.7 А.В колебательном спектре этой молекулы наиболее интенсивно симметричное коле-

вание, частота которого равна  $885 \text{ см}^{-1}$ . Структура основного электронного уровня уранила, расщепленного на колебательные подуровни, представлена на рис. 1а (для возбужденного уровня картина та же, но с другими значениями частот). Соответствующий спектр эмиссии флуоресценции представлен на рис. 1б.

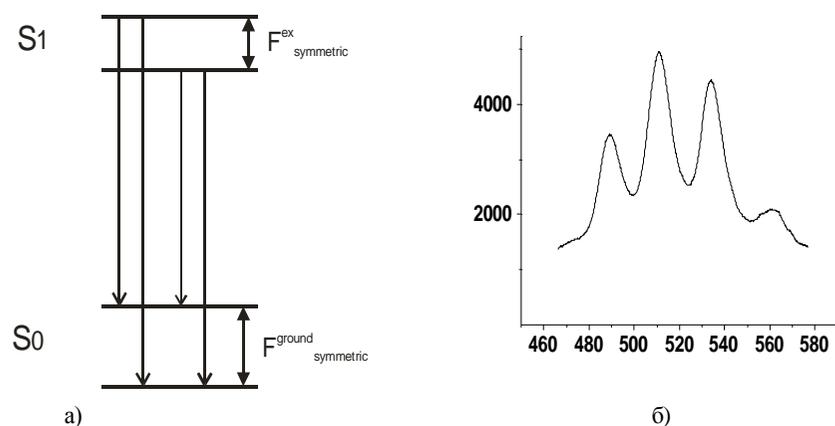


Рис. 1 а) Нижние уровни уранила при комнатной температуре и возможные переходы между ними. б) Спектр эмиссии уранила при комнатной температуре.

В спектрах поглощения и эмиссии флуоресценции присутствуют четыре сильных линии, причем расстояние между линиями одинаково, а сами спектры симметричны относительно 0-0 перехода.

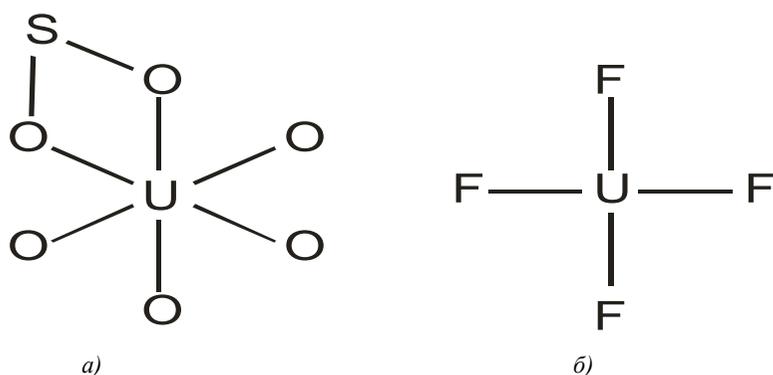


Рис. 2. Геометрия комплексов: (а) с координационным числом 6, лиганд – сульфат-ион (показан один атом S); и (б) с координационным числом 4, лиганд – фтор.

**Комплексообразование. Уранил и лиганды.**

В растворе уранил образует комплексы с лигандами, в частности, с анионами фторидов и сульфатами [1]. Лиганды присоединяются к уранилу в экваториальной плоскости, перпендикулярно оси  $O=U=O$

В зависимости от концентрации анионов в растворе, возможно образование комплексов разной структуры (с разным числом анионов, например,  $UO_2F$ ,  $UO_2F_2$  и т.д.). Ключевым является понятие координационного числа, характеризующего геометрию крепления лигандов к уранилу. В общем случае, для урана оно равно шести — например, в комплексе  $UO_2(SO_4)_2$  три сульфат-аниона крепятся к урану через два кислорода каждый (рис. 2а). Для фторидных комплексов координационное число равно четырем (рис. 2б).

В работе [5] проведено исследование тридцати различных комплексов уранила оптическими методами, выявлена взаимосвязь между геометрией комплекса и его спектральными характеристиками, а именно, показано, что интенсивность определяется группой симметрии комплекса, а тип лиганда влияет лишь на электронную структуру (расщепление уровней). Все исследователи сходятся на том, что локальное поле, создаваемое лигандами, играет роль малого (в сравнении с аксиальным полем, создаваемым кислородом, которое, в свою очередь, мало в сравнении с кулоновским взаимодействием внешнего электрона урана с ядром) возмущения. Это объясняется, в числе прочего, большой длиной связи и подтверждается экспериментально. Ряд работ был посвящен квантовым расчетам структуры уранила в присутствие лигандов, выявлению роли ковалентной связи урана с лигандами и т.д.

#### Флуоресцентные характеристики уранила и его комплексов.

Как было указано выше, полоса эмиссии флуоресценции уранила четко структурирована и состоит из четырех интенсивных полос. Поглощение уранила в видимой области, связанное с переходом 0-1, имеет структурированный спектр, аналогичный спектру эмиссии, и низкое значение коэффициента экстинкции, соответствующее значению сечения поглощения  $10^{-21} \text{ см}^2$ . В УФ-области полоса поглощения становится бесструктурной и более интенсивной.

При возбуждении в видимой области, интенсивность флуоресценции уранила также мала и возрастает при сдвиге возбуждения в УФ. Согласно установленным представлениям, флуоресценция уранила всегда обусловлена переходом 1-0, то есть после перехода в высшие синглетные состояния уранил безызлучательно релаксирует в первое возбужденное (время этой релаксации оценено как 10 нс, что, в частности, дает повод задуматься о необходимости учета вынужденных переходов при возбуждении стандартным лазерным импульсом). Большое время жизни уранила в первом возбужденном состоянии, составляющее около микросекунды, приписывается рядом авторов триплетной природе первого возбужденного состояния. Другие авторы, считают первое возбужденное состояние синглетным, а переход в основное состояние запрещенным по симметрии. Заметим, что произведение сечения поглощения в УФ ( $\sim 10^{-18} \text{ см}^2$ , получено нами методом нелинейной флуориметрии, см. ниже) на время жизни совпадает по порядку величины со значением этого произведения для органических соединений.

При образовании уранилом комплексов обнаруживаются следующие закономерности:

1. сдвиг максимумов полос эмиссии в красную область;

2. увеличение интенсивности люминесценции;
3. увеличение времени жизни в возбужденном состоянии.

На языке фотофизических параметров это означает следующее:

- растет либо квантовый выход флуоресценции уранила, либо сечение поглощения, либо оба эти параметра.
- увеличение времени жизни говорит об уменьшении констант (безизлучательного переноса. Заметим, что это не согласуется с приходящей на ум аналогией с комплексом молекула-наночастица. В последнем случае наблюдается усиление люминесценции за счет роста константы излучательного переноса, а, следовательно, *увеличения* квантового выхода и *уменьшения* времени жизни. В случае комплексов уранила, подобной тенденции нет — меняются обе константы перехода.

Спектрофотометрические измерения для комплексов уранила с ОН-группой показывают увеличение интенсивности поглощения (и в видимой, и в УФ области). Сопоставив это с увеличением времени жизни, получим, что произведение этих двух величин также растет, хотя в простейшей двухуровневой модели должно оставаться константой (соотношение между коэффициентами Эйнштейна).

Все вышеуказанные факты свидетельствуют о запутанности ситуации, разобраться в которой и было целью нашей работы, достижение которой необходимо, в частности, и для создания научного фундамента прикладных методик.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Спектры флуоресценции. Геометрическая модель влияния лигандов на спектральные характеристики уранила.

В качестве объектов исследования нами были выбраны фторидные и сульфатные комплексы уранила — именно они составляют большинство в технологическом процессе выщелачивания урановой руды. Из литературы были получены значения констант равновесия для процесса комплексообразования. Это сделало возможным расчет по трем начальным условиям — рН, ионной силе и концентрации аниона — значений концентраций комплексов с различным числом лигандов одного типа относительно значения концентрации чистого уранила.

### Раствор сульфатных комплексов.

Исходные данные для препаратов приведены в таблице 1.

Далее выполнялась следующая процедура: для каждого спектра рассчитывался парциальный вклад в интенсивности от каждого комплекса и определялась интенсивность, соответствующая такому раствору, в котором находился бы только данный комплекс. Для приведенного ряда эти значения (в отн. ед.) равны (нижний индекс соответствует числу лигандов):

$$I_0 = 1$$

$$I_1 = 6$$

$$I_2 = 10$$

Для положения максимумов полосы флуоресценции был замечен линейный сдвиг с изменением концентрации, впрочем, он не велик по сравнению, например, со сдвигом для комплексов с фтором (см. ниже). К сожалению, комплекс с тремя лигандами в данной серии препаратов отсутствовал.

На рис.3 приведены спектры флуоресценции соответствующих растворов (меньший номер раствора соответствует наименьшей концентрации лигандов).

Таблица 1. Относительная концентрация комплексов урана в смеси в зависимости от концентрации лигандов.

c(Na2SO4), M	lg(c(Na2SO4))	UO2SO4	UO2 2+	UO2(SO4)2 2-
0,01	-2	0,72	0,22	0,06
3,30E-03	-2,48	0,61	0,37	0,02
1,00E-03	-3	0,41	0,58	0,01
3,30E-04	-3,48	0,21	0,79	0
1,00E-04	-4	0,08	0,92	0
3,30E-05	-4,48	0,03	0,97	0
1,00E-05	-5	0,01	0,99	0

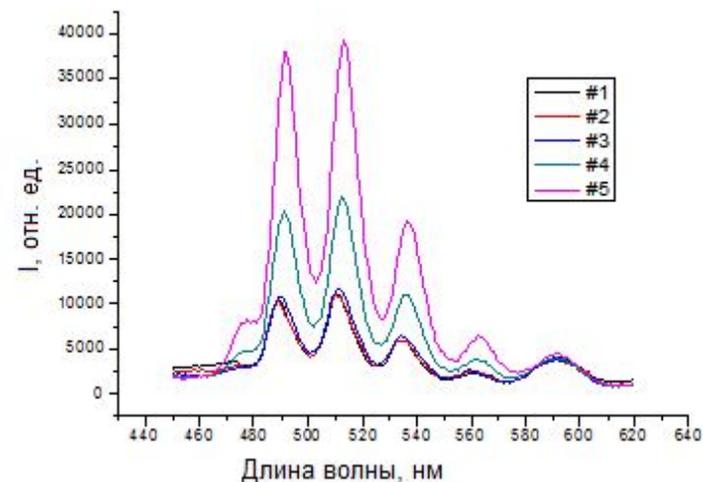


Рис.3. Спектр люминесценции растворов урана с различным содержанием форм.

**Геометрическая модель.**

Из общих соображений была предложена следующая модель описания изменений флуоресцентных характеристик уранила в зависимости от числа лигандов. В её основе – следующие гипотезы.

1. Интенсивность флуоресценции растёт пропорционально некоторой степени напряженности поля, создаваемого лигандами.

2. Если напряженность поля, создаваемого одним лигандом, равна  $E$ , то можно вычислить на основе геометрического фактора (координационного числа  $M$ , числа лигандов  $N$  и числа связей лиганда с ураном  $K$ ) напряженность поля  $E'$ , создаваемого несколькими лигандами. Например, для  $M = 6$ ,  $N = 3$ ,  $K=2$  (сульфат-комплекс с тремя сульфат-анионами)  $E = 0$ , а для  $M = 6$ ,  $N = 2$ ,  $K = 2$  (сульфат-комплекс с двумя сульфат-анионами)  $E' \approx 1.8 E$ .

3. Для некоторых комплексов возможны разные варианты крепления лигандов. Все они считаются равновероятными (возможно, чем более симметричный способ крепления, тем он вероятнее).

Руководствуясь такой моделью, проанализируем приведенные ниже результаты, полученные для ряда фторидов.

**Раствор фторидных комплексов.**

Исходные данные для препаратов приведены на диаграмме (рис. 4), полученной путем термодинамических расчетов с использованием программного обеспечения MEDUSA.

$$[\text{UO}_2^{2+}]_{\text{ТОТ}} = 0.10 \text{ mM}$$

$$\text{pH} = 3.00$$

$$I = 0.100 \text{ M}$$

$$[\text{Na}^+]_{\text{ТОТ}} = 100.00 \text{ mM}$$

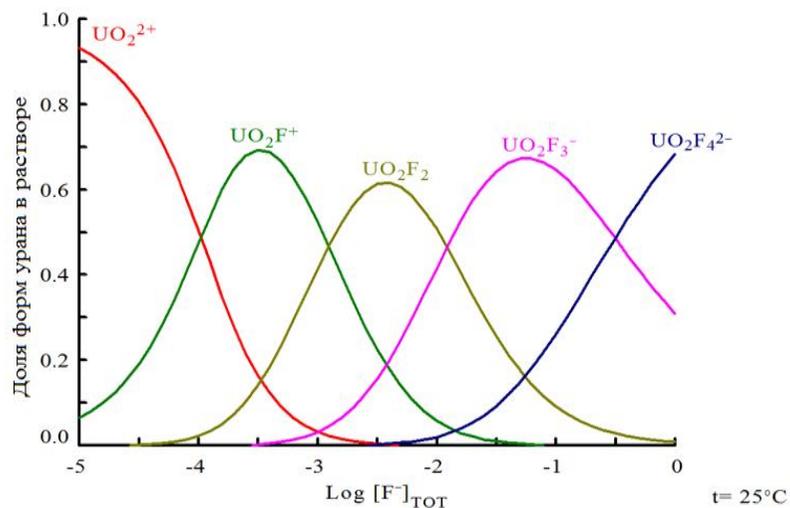


Рис.4. Зависимость доли форм урана в растворе от концентрации лигандов

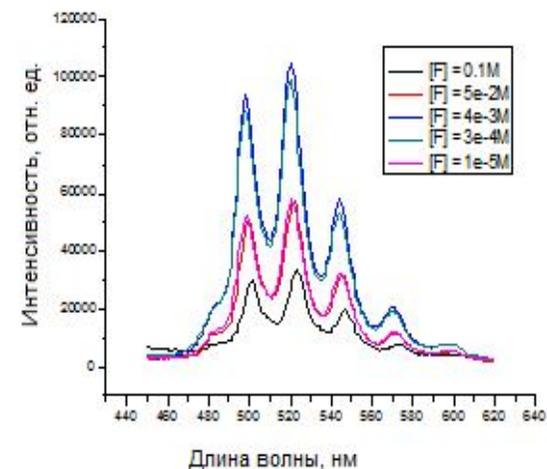


Рис.5. Спектры флуоресценции для пяти препаратов с фторидными комплексами и зависимость интенсивности в максимуме от суммарной концентрации фтора.

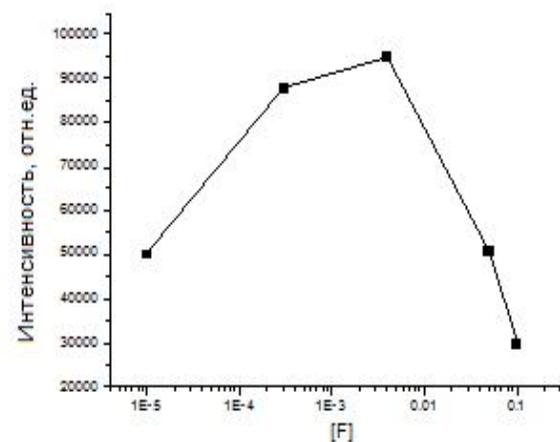


Рис.6. Иллюстрация зависимости напряженности поля от числа лигандов в комплексе.

Рассчитанные значения интенсивностей (в отн. ед.) каждого типа комплексов:

$I_0 = 1$  (взято аналогично данным для сульфатного ряда), тогда

$I_1 = 7$

$I_2 = 10$

$I_3 = 80$

$I_3 = 20$

Таким образом, получаем, что

1. максимальная интенсивность наблюдается для комплекса с двумя фторами;
2. интенсивности для комплексов с 1 и 3 фторами примерно равны;
3. интенсивности для комплексов с 0 и 4 фторами примерно равны.

Эти результаты прекрасно согласуются с геометрической моделью с координационным числом  $M = 4$ :

Эксперимент, выполненный с большим количеством точек по концентрации (рис. 7, 8) подтвердил полученное согласие с теорией.

Небольшой рост флуоресценции в трех крайних точках может быть вызван как образованием комплексов с пятью фторами, так и концентрационным насыщением раствора.

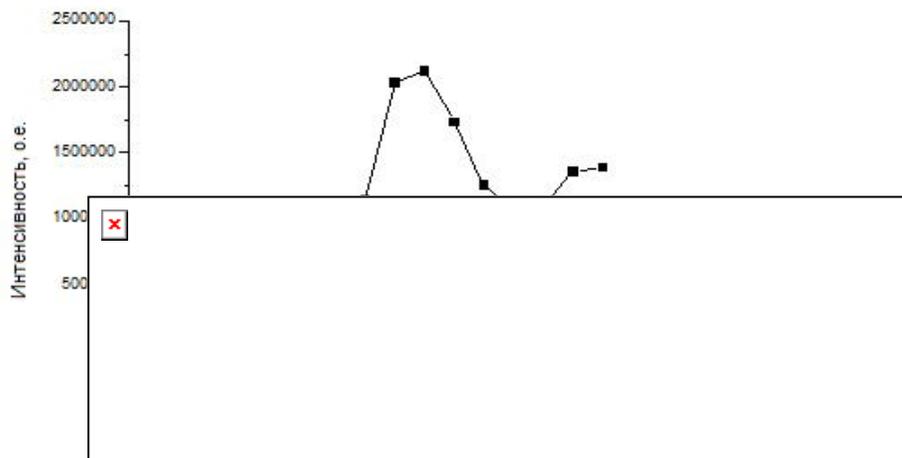


Рис. 7. Зависимость интенсивности сигнала от номера пробы, наименьшему номеру соответствует наименьшая концентрация фтора.

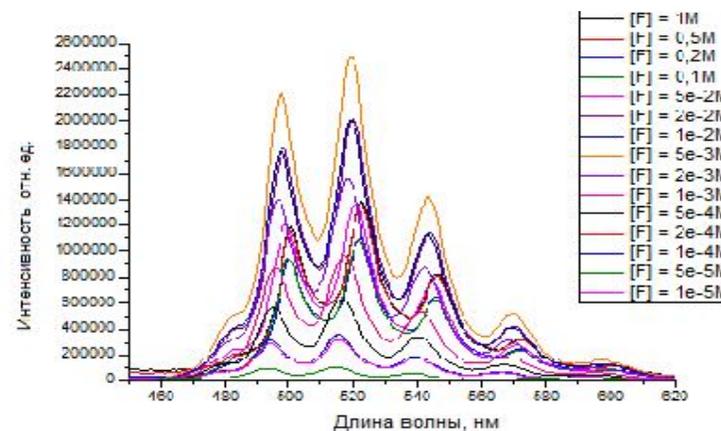


Рис. 8 Спектры флуоресценции растворов с разным содержанием комплексов уранила.

#### Решение задачи разделения спектральных вкладов различных форм уранила в растворе.

Контроль содержания различных форм уранила важно, в первую очередь, для оптимизации технологического процесса, направленного на выделение урана из руды. В то же время, такой контроль должен повысить информативность экологического мониторинга водоёмов в зоне негативного влияния урановых рудников. В данной работе мы предприняли попытку развить флуоресцентный метод такого контроля. В основу нашего подхода положено определение фотофизических параметров уранила, значения которых, как ожидается, различны для разных комплексов.

#### Методы и аппаратура.

Для определения фотофизических параметров нами были использованы методы нелинейной [6] и кинетической флуориметрии. Вкратце, их идея заключается в следующем:

#### Нелинейная флуориметрия.

В случае малых значений интенсивности возбуждающего излучения сигнал флуоресценции образца линейно зависит от интенсивности накачки. При увеличении значений плотности мощности (увеличении числа фотонов, проходящих за единицу времени через единичную площадку) флуоресцентный отклик молекулы становится нелинейным — включаются механизмы насыщения флуоресценции, такие как обеднение основного состояния, синглет-синглетная аннигиляция др. Снимая так называемую кривую насыщения флуоресценции и решая обратную задачу, можно получать фотофизические параметры, которые определяют фотонику молекул.

*Кинетическая флуориметрия.*

Метод заключается в снятии зависимости интенсивности флуоресценции от времени — фактически, измеряется затухание сигнала. В случае нестационарного возбуждения, когда время возбуждающего импульса много меньше времени жизни молекулы в возбужденном состоянии, изменение интенсивности сигнала описывается суммой затухающих экспонент. Но и в случае, когда это условие не выполняется, обратная задача может быть решена.

Данные методы были нами реализованы на лазерном флуориметре с импульсным возбуждением и параллельной регистрацией спектра. Принципиальной особенностью является возможность стробирования системы регистрации — возможность накопления сигнала с фиксированной задержкой относительно прихода лазерного импульса. Модифицированный для анализа комплексов уранила вариант спектрометра представлен на рис. 9.

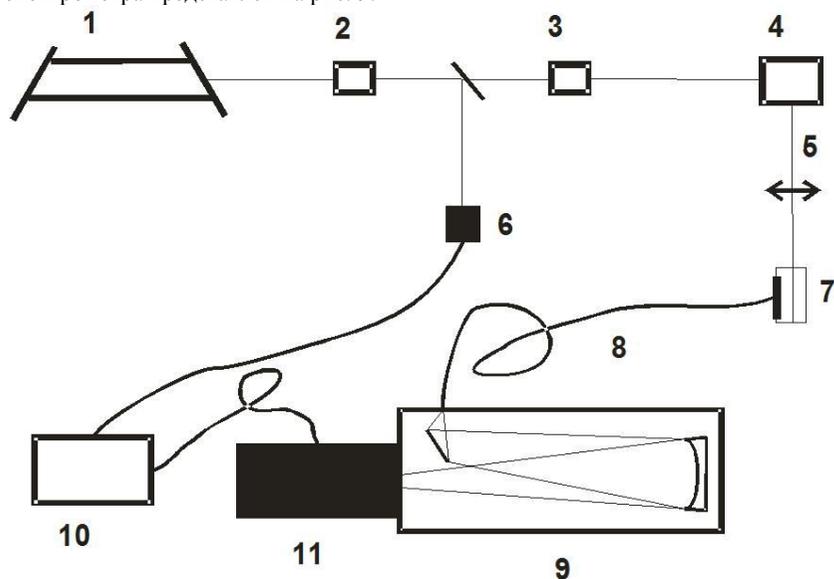


Рис. 9. 1 — импульсный лазер на ИАГ:Nd (длина волны 1064 нм, энергия в импульсе 40 мДж, длительность импульса 10 нс, частота повторения импульсов 10 Гц); 2 — кристалл для удвоения частоты — получения второй гармоники: длина волны 532 нм, энергия в импульсе второй гармоники 13 мДж; 3 — кристалл для повторного удвоения частоты — получения четвертой гармоники: длина волны 266 нм, энергия в импульсе четвертой гармоники 2 мДж; 4 — ячейка Поккельса - элемент, позволяющий плавно менять интенсивность излучения при снятии кривых насыщения; 5 — собирающий объектив; 6 — фотодиод, запускающий стробирование системы регистрации; 7 — образец; 8 — световод; 9 — полихроматор; 10 — система управления задержкой запуска системы регистрации; 11 — стробируемая CCD камера УФ и видимого диапазонов с усилителем яркости, шаг перемещения строба от 2.5 нс, ширина строба от 10 до 2000 нс.

Выбор параметров спектрометра определялся следующими особенностями экспериментальных кривых:

- нестационарный режим возбуждения: время импульса (10 нс) много меньше времени жизни возбужденного состояния (от 1000 нс для уранила) — многоэкспоненциальное затухание сигнала;
- численное моделирование показало, что кривые насыщения уранила и его комплексов не зависят при данных параметрах возбуждения от времени жизни.
- длина волны 266 нм попадает в максимум полосы возбуждения флуоресценции уранила, соответствующей, как было сказано выше, переходу в высшее возбужденное синглетное состояние.

**Результаты, полученные методом кинетической флуориметрии.**

Система регистрации позволяет снимать не только изменение интенсивности на одной длине волны от времени, но и деформацию всего спектра (рис. 10). Было получено, что времена жизни уранила и его комплексов значительно различаются: время жизни составило около 2 мкс для уранила, 15 мкс для его сульфатных комплексов и 80 мкс для фторидных комплексов (рис. 11).

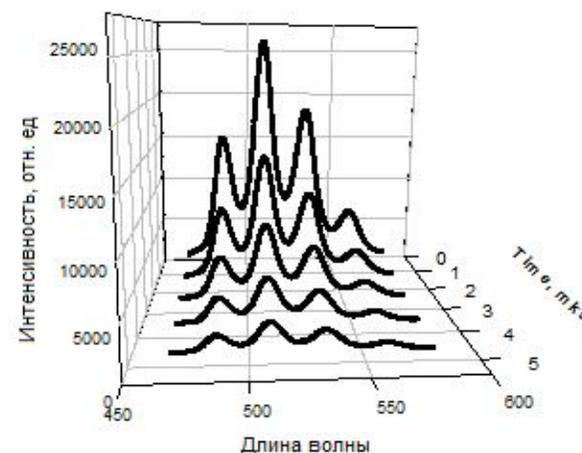


Рис. 10. Деформация спектра флуоресценции уранила во времени.

Показано также (на примере спектров уранила в присутствии частиц SiO<sub>2</sub>), что применение стробирования позволяет производить диагностику уранила в растворе даже при наличии фоновой флуоресценции, значительно превышающей полезный сигнал. Уже при временах задержки строба приёмника порядка ста нс фон практически пропадает, что свидетельствует о том, что он обусловлен, по-видимому, флуоресценцией сложных органических соединений, характерные значения времени жизни возбужденного состояния которых лежат в области единиц нс.

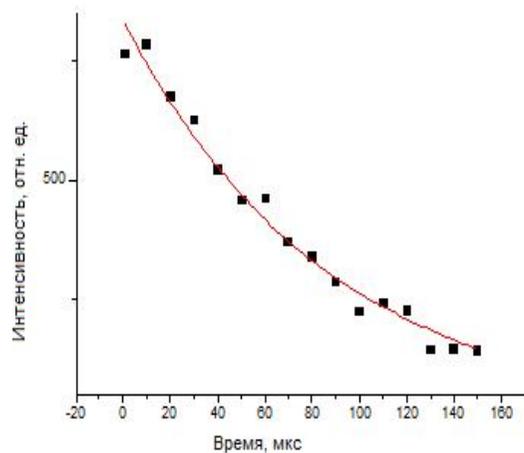


Рис. 11. Кинетическая кривая сульфатных комплексов урана.

Итоговые данные по временам жизни сульфатных комплексов урана приведены в таблице ниже.

Число лигандов в комплексе	Время жизни, микросекунды
0	$1,5 \pm 0,2$
1	$4 \pm 0,5$
2	$8 \pm 1$
3	$14 \pm 1$

### Результаты, полученные методом нелинейная флуориметрии

Были выполнены первые эксперименты по нелинейной флуориметрии уранила и его комплексов. Обработка кривых производилась по однопараметрической модели — восстанавливаемым параметром было сечение поглощения. Порядок значений сечения при возбуждении в УФ области составил от  $10^{-18} \text{ см}^2$  для чистого уранила до  $10^{-16} \text{ см}^2$  для его комплексов. Отметим, что снятие кривых насыщения в режиме стробирования позволяет ввести дополнительный канал получения информации о составе исследуемого образца — возможно определение сечений поглощения отдельно для разных комплексов.

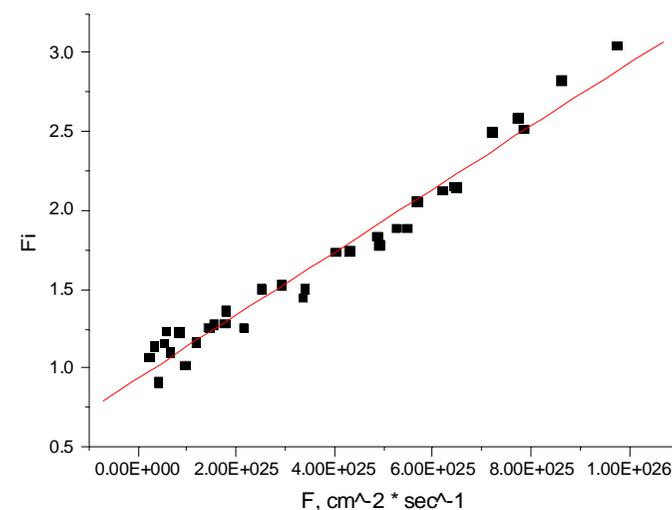


Рис. 12. Типичная кривая насыщения флуоресценции уранила при возбуждении на длине волны 266 нм – зависимость фактора насыщения (отношения сигнала люминесценции к сигналу накачки) от плотности потока фотонов возбуждающего излучения. Определённое из неё значение сечения поглощения составило  $3e-18 \text{ см}^2$

Итоговые данные по сечениям поглощения сульфатных комплексов урана при возбуждении на длине волны 266 нм приведены в таблице ниже.

Число лигандов в комплексе	Сечение поглощения, $1e-18 * \text{см}^2$
0	$3 \pm 0,5$
1	$5 \pm 0,5$
2	$6 \pm 1$
3	$8 \pm 1,5$

### Разделение спектральных вкладов от различных форм уранила в растворе.

Для проведения экспериментов по разделению спектральных вкладов от различных форм уранила методом кинетической флуориметрии были приготовлены образцы с различным содержанием фторидных и сульфатных комплексов. Спектры этих растворов с указанием молярной концентрации лигандов приведены на рисунке ниже.

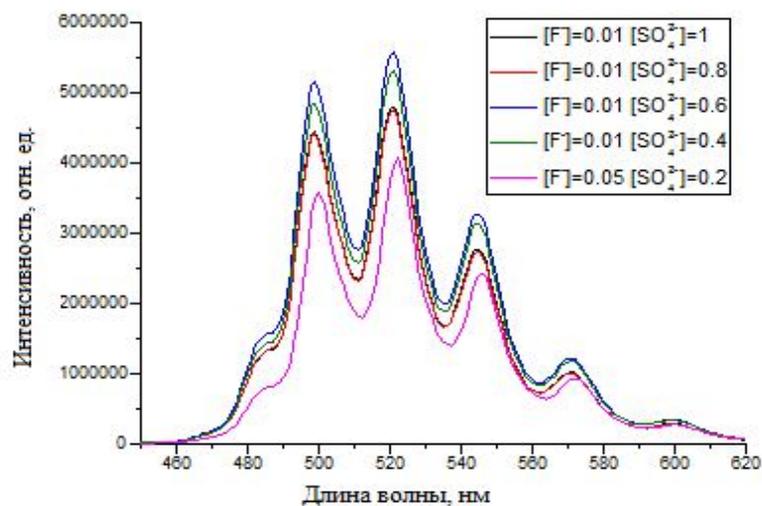


Рис. 13. Спектр люминесценции растворов урана с различным содержанием лигандов разного типа.

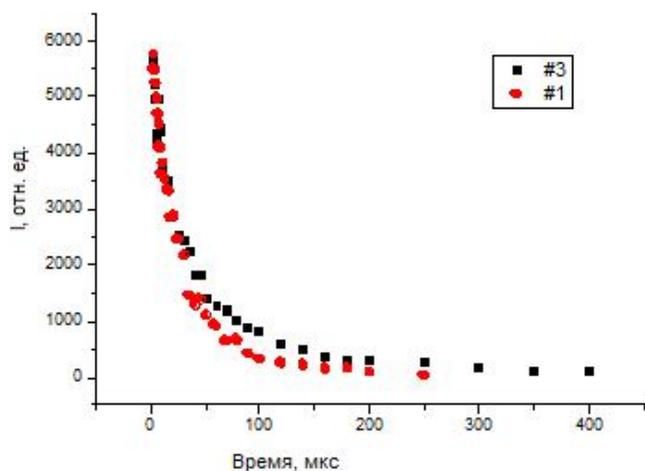


Рис. 14. Кинетические кривые для растворов №1 и №3.

Алгоритм обработки кинетических кривых на данном этапе был взят простейшим из всех возможных — разложение кинетики по двум экспонентам — короткоживущей, соответствующей сульфатным комплексам, и долгоживущей, соответствующей фторидным комплексам. Отношение интегральных вкладов двух экспонент принималось равным отношению концентраций.

Были сделаны следующие предположения:

- неизменность положения максимумов спектра во времени (в реальности это не так)
- равенство параметров различных комплексов уранила с выбранным лигандом

Кинетические кривые для двух растворов с разным содержанием форм урана и результат их обработки с использованием простейшей модели приведены ниже.

	[F], расчет	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ], расчет	[F], эксперимент	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ], эксперимент
Раствор №1	25%	75%	10%	90%
Раствор №3	65%	35%	75%	25%

#### Применение лазерной флуориметрии для детектирования урана в сильнорасеивающей мутной среде.

Образующаяся в результате добычи урана смесь представляет из себя сильнорасеивающую мутную яркоокрашенную среду. Применение стандартной схемы зондирования здесь невозможно. Более того, длина волны 266 нм, использовавшаяся нами для возбуждения люминесценции урана, сквозь такую среду не проходит. Для решения этой проблемы нами был применен алюминат-неодимовый лазер с длиной волны 447 нм (третья гармоника его основной частоты). Данная длина волны попадает в полосу поглощения урана в видимой области и лучше проходит через окрашенную среду. Для оптимального светосбора использовался приемопередающий оптоволоконный зонд. С помощью этой техники удалось зарегистрировать сигналы флуоресценции при разных задержках строба приёмника, соответствующих разным формам.

#### ВЫВОДЫ

- В работе исследованы флуоресцентные характеристики уранила и его комплексов с лигандами (фтором и сульфатом), образующимися в технологическом процессе добычи урана. Методами нелинейной и кинетической лазерной флуориметрии определены значения времени жизни возбуждённого состояния и сечения поглощения на длине волны 266 нм. Измерен фактор увеличения интенсивности флуоресценции в результате образования уранилом комплекса с лигандами. Для объяснения этого явления предложена модель формирования локального поля в комплексах. Экспериментальные результаты, полученные для комплексов уранила с фтором, оказались в хорошем соответствии с теоретически предсказанными по этой модели.

- Предложен и реализован алгоритм определения парциальных вкладов различных форм урана в их смеси в водной среде, что открывает возможность создания флуоресцентного онлайн сенсора для контроля технологического процесса добычи урана и экологического мониторинга водоёмов, подверженных риску загрязнения уран-содержащими примесями.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-05-00892)

### Литература

1. E. H. Frimmel, T. Gremm. The importance of element speciation in water analysis a plea for further investigations. *J Anal. Chem*, 1994, v. 350, pp. 7-13
2. V. Eliet, I. Grenthe, G. Bidoglio. Time-Resolved Laser-Induced Fluorescence of Uranium(VI) Hydroxo-Complexes at Different Temperatures. *Applied Spectroscopy*, 2000 v. 54, no. 1, pp. 54 – 67.
3. G. Bernhard, G. Geipel, V. Brendler, H. Nitsche. Uranium speciation in waters of different uranium mining areas. *Journal of Alloys and Compounds*, 1998, v. 271, pp. 201
4. K. Sanjukta, N. Shenoy, S. Pandey. Direct determination of uranium in seawater by laser fluorimetry. *Talanta*, 2008, v. 77, pp. 422–426
5. G. Geipel. Some aspects of actinide speciation by laser-induced spectroscopy. *Chemistry Reviews*, 2006, v. 250, pp. 844–854
6. В. В. Фадеев. Нелинейная флуориметрия сложных органических соединений. *Соросовский образовательный журнал*, 2000, т. 6, № 12, с. 104~110.

### СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение .....	3
Поздравление декана .....	4
Байдулов В.Г. ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ НЕОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ И ПРИБЛИЖЕНИЕ НЕСЖИМАЕМОСТИ .....	7
Барбин Н.М., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ЦЕЗИЯ, КАЛЬЦИЯ И СТРОНЦИЯ ПРИ ГОРЕНИИ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА .....	25
Белов С.Ю. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРА СИГНАЛ/ШУМ В КОРОТКОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ РАДИОВОЛН .....	31
Блохина Н.С., Орданович А.Е. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОЗАПАСА ВОДОЕМА, ЕГО ЭНЕРГОБМЕН С АТМОСФЕРОЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ВЕСЕННЕГО ТЕРМОБРА В НОЧНОЕ ВРЕМЯ .....	38
Богданова М.С., Литвиненко А.В., Литвинова И.А. ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ .....	47
Богомольный В.М., Родивилов С.Н. БЕЗОПАСНОСТЬ И ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ПРОЧНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ .....	53
Будников А.А., Показеев К.В., Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. ДИНАМИКА ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ БЛИЗКИХ ПЛОТНОСТЕЙ В СОСТАВНОМ ВИХРЕ .....	59
Воронина Е.В. ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОГНОЗА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО ДАННЫМ МЕХАНИЗМА ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ .....	66
Воронина Е.В., Соколова К.А. МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ЗОНАХ ЗАТИШЬЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА .....	76
Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Марापалец Ю.В., Щербина А.О. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В СЕЙСМОАКТИВНОЙ ЗОНЕ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА .....	86

Гордиенко В.А., Старкова М.В. МИРОВОЗРЕНЧЕСКИЕ И ФИЛОСОФСКИЕ АСПЕКТЫ БАЗОВОГО КУРСА ЭКОЛОГИИ ДЛЯ «НЕЭКОЛОГОВ» .....	98
Гостев Т.С., Кузьминов Ф.И., Максимов Е.Г., Пашенко В.З., Фадеев В.В. ФИТОПЛАНКТОН КАК ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ БИОСЕНСОР ЭКОТОК- СИКАНТОВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ .....	111
Долгоносоев Б.М., Губернаторова Т.Н. НЕЛИНЕЙНАЯ КИНЕТИКА ДЕСТРУКЦИИ СТОЙКОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДНОЙ СРЕДЕ .....	117
Есюкова Е. Е., Чубаренко Б. В. ВОДООБМЕН ЧЕРЕЗ ГРАНИЦЫ МЕЖДУ ИСКЛЮЧИТЕЛЬНЫМИ ЭКОНОМИЧЕСКИМИ ЗОНАМИ ГОСУДАРСТВ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ	130
Еремеев В.Н., Крашенинникова М.А., Горячкин Ю.Н., Жуков А.Н., Сизов А.А. ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЧЕРНОГО МОРЯ .....	141
Запечалов А.С., Показеев К.В., Пустовойтенко В.В. ОБНАРУЖЕНИЕ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ РАДИОЛОКАЦИОН- НЫМИ СРЕДСТВАМИ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ. ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ .....	150
Киселева С.В. О ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГИИ .....	167
Кистович А.В. КРИТЕРИИ КОНВЕКТИВНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ЛОКАЛИЗО- ВАННОЙ КОНВЕКЦИИ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ .....	174
Корчагин К.А., Мессинева Е.М. ВЕРОЯТНОСТНАЯ ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЧИСЛЕННОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА В Р. МОСКВЕ .....	181
Кудин В.Н. О СООТВЕТСТВИИ ЧИСЛЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК «ЗОЛОТОГО СЕЧЕНИЯ» И БИФУРКАЦИЙ В ЛОГИСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ .....	190
Кукушкин А.С., Прохоренко Ю.А., Шугаев А.В. ПРОЗРАЧНОСТЬ ВОД В ПРИБРЕЖНЫХ И ГЛУБОКОВОДНЫХ РАЙ- ОНАХ ЧЕРНОГО МОРЯ .....	195
Марголин А.Д., Похил А.Э. ОБ ОБРАЗОВАНИИ ОБЛАКА МАЛЫХ ВИХРЕЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙ- СТВИИ НЕСКОЛЬКИХ БОЛЕЕ КРУПНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВИХ- РЕЙ .....	209
Михневич Г.С., Гриценко В.А. ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИРОДНОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ .....	213
Назарова Л.Е. ОЦЕНКА КЛИМАТА КАРЕЛИИ КАК РЕКРЕАЦИОННОГО РЕСУРСА ...	223
Петрова Г.П., Петрусевич Ю.М., Сергеева И.А., Сергеев С.Е., Федорова К.В., Тихонова Т.Н. МЕХАНИЗМ ТОКСИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ И ИОНОВ КАЛИЯ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА .....	228

Петрунин Г.И., Попов В.Г. ОЦЕНКА МИКРО- И МАКРОПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕ- НОСА В ПРИРОДНЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ АМОРФНО- КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕДАХ В СВЯЗИ С ПРОБЛЕМОЙ ПРОГНОЗИ- РОВАНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ .....	234
Петрусевич Ю.М., Берловская Е.Е., Тульский С.В. ОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	246
Пирогов, Ю.А., Тищенко А.П., Тищенко Д.А. ИЗМЕНЕНИЕ ВОДНЫХ ПОТОКОВ ЛЕСОТАЕЖНОЙ ЗОНЫ В РАЙОНЕ ИСТОКА ВОЛГИ В РЕЗУЛЬТАТЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ...	250
Потапов А.А. СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ЧАСТОТНО- СЕЛЕКТИВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА	259
Похил А.Э., Марголин А.Д. ПОВЕДЕНИЕ АНСАМБЛЕЙ РАЗНОИМЕННЫХ ВИХРЕЙ .....	267
Рыженков А.П. ФИЗИКА В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ – ФРАГМЕНТЫ РАЗ- ВИТИЯ .....	277
Сидорова А.Э., Твердислов В.А. УРБОЭКОСИСТЕМЫ КАК ВЫРАЖЕННЫЙ НЕЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕМЕНТ АНТРОПОСФЕРЫ .....	284
Соловьев А.А., Чекарев К.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ АТМОСФЕРНОЙ ВЛАГИ НА ВОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ .....	297
Соловьев Д.А. РОЛЬ ТЕПЛО - ВЛАГООБМЕНА ВОДОЕМА С АТМОСФЕРОЙ В ТЕП- ЛОВОМ БАЛАНСЕ ВОДОЕМА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГИДРОМЕТЕОРО- ЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЯХ .....	306
Соловьев Д.А., Нигматуллин Р.И. ИЗМЕНЕНИЕ ПЕРИОДА СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОДНОРОДНО- ГО ОКЕАНА В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОГО ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ	310
Терентьев Е.Н., Терентьев Н.Е. СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕ, ТОЧЕЧНАЯ ИНДИКАЦИЯ, АНАЛИЗ ВИХРЕ- ВЫХ ТЕЧЕНИЙ .....	314
Трухин В.И., Максимочкин В.И., Жилыева В.А., Минина Ю.А. ГЕОМАГНЕТИЗМ И ЭКОЛОГИЯ .....	324
Шелковников Н.К. К МЕХАНИЗМУ ФОРМИРОВАНИЯ ГИГАНТСКИХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В ОКЕАНЕ .....	347
Ширишин Е.А., Петров В.Г., Будилин Г.С., Обморощев Б.Л., Калмыков С.Н., Фадеев В.В. ЛАЗЕРНАЯ ФЛУОРИМЕТРИЯ УРАНИЛА И ЕГО КОМПЛЕКСОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ .....	354

**Авторский указатель**

Алексеев С.Г.	25	Орданович А.Е.	38
Байдулов В.Г.	7	Пашенко В.З.	111
Барбин Н.М.	25	Петров В.Г.	354
Белов С.Ю.	31	Петрова Г.П.	228
Берловская Е.Е.	246	Петрунин Г.И.	234
Блохина Н.С.	38	Петрусевич Ю.М.	228, 246
Богданова М.С.	47	Пирогов Ю.А.	250
Богомольный В.М.	53	Показеев К.В.	59, 150
Будилин Г.С.	354	Попов В.Г.	234
Будников А.А.	59	Потапов А.А.	259
Воронина Е.В.	76	Похил А.Э.	209, 267
Гордиенко В.А.	86, 98	Прохоренко Ю.А.	195
Гордиенко Т.В.	86	Пустовойтенко В.В.	150
Горячкин Ю.Н.	141	Родивилов С.Н.	53
Гостев Т.С.	111	Рыженков А.П.	277
Гриценко В.А.	213	Сергеев С.Е.	228
Губернаторова Т.Н.	117	Сергеева И.А.	228
Долгонос Б.М.	117	Сидорова А.Э.	284
Еремеев В.Н.	141	Сизов А.А.	141
Есюкова Е. Е.	130	Соколова К.А.	76
Жиляева В.А.	324	Соловьев А.А.	297
Жуков А.Н.	141	Соловьев Д.А.	306, 310
Запевалов А.С.	150	Старкова М.В.	98
Калмыков С.Н.	354	Степанова Е.В.	59
Киселева С.В.	167	Твердислов В.А.	284
Кистович А.В.	174	Терентьев Д.И.	25
Корчагин К.А.	181	Терентьев Е.Н.	314
Крашенинникова М.А.	141	Терентьев Н.Е.	314
Кудин В.Н.	190	Тихонова Т.Н.	228
Кузьминов Ф.И.	111	Тищенко А.П.	250
Кукушкин А.С.	195	Тищенко Д.А.	250
Литвиненко А.В.	47	Трухин В.И.	324
Литвинова И.А.	47	Тульский С.В.	246
Максимов Е.Г.	111	Фадеев В.В.	111, 354
Максимочкин В.И.	324	Федорова К.В.	228
Марапулец Ю.В.	86	Чаплина Т.О.	59
Марголин А.Д.	209, 267	Чашечкин Ю.Д.	59
Мессинева Е.М.	181	Чекарев К.В.	297
Минина Ю.А.	324	Чубаренко Б. В.	130
Михневич Г.С.	213	Шелковников Н.К.	348
Назарова Л.Е.	223	Ширшин Е.А.	354
Нигматулин Рс.И.	310	Шугаев А.В.	195
Обморошев Б.Л.	354	Щербина А.О.	86