

## ПРОЯВЛЕНИЕ ЯЧЕЙСТОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ НЕРАВНОВЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ВАСИЛЬЕВСКОГО ОСТРОВА

Конструктивная часть экологического мониторинга, предполагающая комбинацию инструментального и модельного, преимущественно численного подходов, касается в основном оценки распространения загрязнений и расчета параметров очистных сооружений. Оценка состояния экосистемы в целом до сих пор опирается на образные представления и эмпирическую точку зрения, требующие развития. В частности, в данной статье обоснован тезис, что всякая неравновесная экосистема, имеющая набор потенциальных барьеров, обладает ячейистой структурой, проявленной в пространственном распределении значений ее характеристических параметров на всех масштабных уровнях. Корректность аналогий с диссипативными лабораторными системами допускает волновую интерпретацию этого ячейистого структурирования. Учитывая апробированные гармонические аппроксимации и аналитическую модель, эта волновая интерпретация делает возможной экспертную систему, ориентированную на прогноз динамики характеристических параметров экосистемы.

The constructive part of ecological monitoring including the combination of instrumental and numerical model approaches basically concerns the estimation of pollution propagation and computing treatment facilities. The estimation of whole ecosystem state still depends on the figurative representations and empirical point of view which require the development. In particular, this paper proves the thesis that any nonequilibrium ecosystem with the set of potential barriers has the cellular structure in the spatial distribution of its characteristic parameter values on all scale levels. The correctness of analogies with the dissipative laboratory systems admits the wave interpretation of this cellular structuring. Seeing the approved harmonic approximations and analytical model, this wave interpretation makes possible the expert system focused on the prediction of dynamics of ecosystem characteristic parameters.

### Постановка задачи

По аналогии с термодинамической системой любую природную систему, в том числе экологическую или природно-техническую геосистему, структурно можно разделить на макро- и микроскопические уровни. В результате их взаимодействия, а также взаимодействия с внешними факторами, определяющими неравновесное состояние системы и ее структурную целостность, динамика экосистем включает две компоненты, периодическую и аperiodическую, или соответственно циклическую (суточную, сезонную, многолетнюю) и поступательную (сукцессию). Поиск закономерностей в каждой из указанных компонент возможно основывать на выявлении скрытой периодичности, экспоненциальных законах затухания движений, резонансных эффектах, отталкиваясь опять-таки от термодинамики. Указанные эффекты, как правило, проявлены в природных системах латент-

но и для описания требуют корректных аналогий. Например, количественная характеристика взаимодействия двух популяций-антагонистов гетеротрофа базируется на модели Вольтерра, рассматривающей изменение численности каждой из популяций на основе гармонических функций, применимых при описании колебаний математического маятника. Очевидно, что искусственное уменьшение численности одной из популяций, регулярно приходящееся на ее максимум, приведет к выживанию наиболее конкурентоспособных и менее уязвимых особей и в результате — к быстрейшему вымиранию или уничтожению второй популяции с распадом всей экосистемы. Такой процесс эквивалентен резонансному при совпадении частоты внешних воздействий с собственной частотой колебаний системы.

Наличие в динамике любой неравновесной природной системы закономерностей в виде периодичностей и резонанса позволяет предполо-

жить развитие в объемах таких систем при их не точечных размерах волновых процессов, играющих доминирующую роль в формировании их макроскопической структуры. Данный тезис базируется на трех тривиальных положениях и одном экспериментальном факте. Во-первых, отмеченные периодические изменения отражают прежде всего колебания характеристического параметра или физического объема системы относительно равновесного значения или состояния соответственно. Во-вторых, если линейные размеры неравновесной системы отличаются от точечных, то указанные колебания распространяются в объеме системы, способствуя волнообразованию. В-третьих, при ограниченных размерах системы бегущие волны отражаются от ее границ и в результате когерентного наложения на волны падающие образуют стоячие волны. В-четвертых, согласно ряду экспериментов, выполненных по разнородным неравновесным системам, преимущественно гидродинамическим, химическим и биологическим, а также натурным наблюдениям структуры и динамики неравновесной геологической среды, пространственно упорядоченные структуры указанных систем генетически связаны со структурой стоячих волн — с их пространственно упорядоченными пучностями и узлами.

Детерминизм в смысле природы самоорганизации неравновесных экосистем допускает аналитическое решение задачи прогноза динамики ряда агрессивных природных и техногенных факторов — одной из основных задач инженерной экологии. В настоящей статье данная проблема ставится применительно к условиям мегаполиса, а именно — к ограниченной территории Санкт-Петербурга, обладающей системой потенциальных барьеров, препятствующих распространению того или иного вида загрязнений или физических воздействий за ее пределы.

В условиях плотной застройки, ремонтных работ, изменения размеров озелененных территорий наблюдается конкуренция ряда сопряженных факторов, например, смога, общей запыленности нижних слоев атмосферы, интенсивных ветровых потоков, связанной с турбулентными потоками вторичной запыленностью, обусловленных сменой аэродинамических режимов локальных перепадов атмосферного давления. Их взаимодействие может допускать волновые аналогии и обладать некоторыми другими закономерностями, регистрация которых составляет задачу инструментального мониторинга. Элементарное отображение его результатов в картографической форме способно выявить факт временной нестационарности измеренного характеристического параметра, но ее количественное описание требует параметризации указанных карт, что составляет задачу аналитической поддержки инструментального мониторинга. Возможность определения доминирующего физического процесса в пространственном распределении и временной динамике измеренного параметра делает актуальной проблему моделирования в

классическом представлении математической физики: определение геометрии и параметризация вещественного состава системы; выбор основных дифференциальных уравнений; подбор начальных и граничных условий; подтверждение результатов численного моделирования моделированием физическим.

### **Актуальность и новизна задачи**

В последнее десятилетие в естественных науках произошло смещение акцентов с инструментальных методов регистрации наблюдаемых эффектов к аналитическому описанию измеренных сигналов. Последнее в общей формулировке подразумевает их интерпретацию с количественной характеристикой параметров источников природных или антропогенных аномалий, определяющих основные особенности структуры этих сигналов. Вместе с тем, до сих пор существует невосполнимая пропасть между представителями естественных наук, способных поставить задачу применительно к конкретным природным объектам, и представителями точных наук, которые способны обобщить эту задачу в форме, допускающей аналитические или численные модельные представления. Методика, элементы которой служат основой для формального описания структуры натурных наблюдений и, как следствие, корректных физических аналогий, призвана решить данную проблему.

Представление о моделировании в современной инженерной экологии является многоплановым. С одной стороны, существует задача оценки распространения загрязняющих веществ в водотоках и приземных слоях атмосферы, с другой — оценка эффективности работы очистных сооружений, расчет их параметров с обоснованием последующей замены или модернизации. В этой части моделирования существуют относительно детерминированные расчетные схемы, допускающие тем не менее эмпирические оценки, например, при рассмотрении загрязнений подземных вод. В другой части моделирования речь идет об общей динамике природных систем или природно-технических геосистем, где присутствуют попытки найти фундаментальные законы, следуя аналогиям с неравновесной термодинамикой, привлечь к структурным характеристикам теорию фракталов, описать временную нестационарность, используя фазовые портреты и теорию катастроф. Последнее время стала модной апелляция к синергетике, исследующей природу процессов самоорганизации. Указанные подходы характеризуются доминантой образных представлений и отсутствием строгой инженерной методологии. На этом фоне выделяется методика, рассмотренная в настоящей статье и предлагающая строгий процедурный подход, захватывающий все стадии геофизического мониторинга: натурные измерения, создание картографической базы данных, аналитические аппроксимации, физическую верификацию аналогий, математическое моделирование процесса.

## Мониторинг и его первичные результаты

Инструментальные замеры реализованы в пределах ограниченной территории г. С.-Петербург, представленной Васильевским островом. В условиях интенсивного транспортного потока, модернизации старого жилищного фонда, уплотнительной застройки и расширения насыпной части острова основным вредным для населения фактором стала запыленность нижних слоев атмосферы. Учитывая специфику данного загрязнения, можно говорить об ограниченных латеральных размерах исследуемой природно-технической геосистемы благодаря естественным потенциальным барьерам: пылевая взвесь за ее пределами либо сдувается интенсивными ветровыми потоками, либо осаждается за счет повышенной влажности в пределах Финского залива, русла р. Невы и ее притоков, ограничивающих полигон работ.

Площадное измерение запыленности воздуха возможно либо с использованием стационарных постов, реализующих близкий к единовременному воздухозабор, либо на основании косвенных признаков, допускающих более мобильные замеры. Учитывая наличие гранитного материала в основании асфальтового покрытия и в облицовке набережных, повышенный радиационный фон в окрестностях некоторых участков с песчаной засыпкой, а также в области водостоков, можно допустить, что пылевая взвесь обладает радиоактивной компонентой. В данном случае опасность представляет не средняя активность пыли, взятой на единицу объема, а суммарный накапливающийся эффект, получаемый человеком, регулярно вдыхающим эту пыль. С учетом этого реализация площадного мониторинга требует относительно равномерного размещения по исследуемой площа-

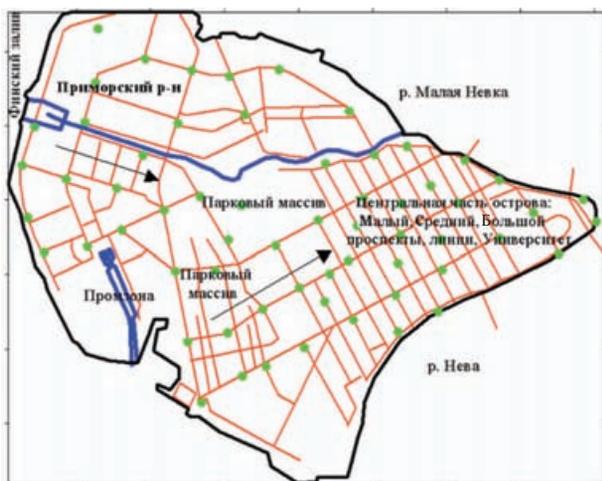


Рис. 1. Схема полигона работ

Красными линиями отмечены улицы, зелеными точками — измерительные пикеты, синими линиями — каналы, стрелками — доминирующие направления ветрового потока с побережья

ди сорбирующих фильтров (на высоте человеческого роста) с последующим замером их радиоактивности. Однако такая методика наталкивается на ряд технических проблем, связанных со значительным числом измерительных пикетов, периодической сменой фильтров, конструированием самого фильтра, учитывающим его равномерное продувание при любом направлении воздушного потока. Решение найдено в использовании природного сорбента — древесной коры. Исходный материал неактивен, обладает высокой пористостью и может характеризоваться ненулевым радиационным фоном только в силу сорбции по поверхности и объему примесей в воздухе. Как показали пробные дозиметрические измерения, радиация, измеренная на коре живого дерева в течение сезона, отличается выраженной нестационарностью, что косвенно подтверждает априорные суждения. Обновление фильтра в данном варианте заменяет удаление поверхностного слоя древесной коры.

Схема измерений включает 60 пикетов, равномерно распределенных по полигону (рис. 1), с выполнением на каждом из них нескольких замеров для определения абсолютной погрешности, временного хода радиационного фона и, как следствие, кондиционности итоговой карты наивероятнейших (средних) значений радиационного фона. Указанное число пикетов по отношению к территории Васильевского острова предполагает достоверную оценку гладкой (региональной) компоненты пространственного распределения радиоактивности. Комплект полученных карт не относится к закрытым материалам, поскольку основан на измерениях бытовым дозиметром КВАРТЕКС РД 8901, не затрагивающим территорий промышленных предприятий, а также районов поликлиник с рентгеновскими установками.

Основные технические характеристики прибора:

— чувствительным элементом служит газоразрядный счетчик Гейгера—Мюллера с диапазоном от 0 до 1000 мкР/ч;

— регистрируемый сигнал порождается ионизацией камеры счетчика частицами с энергией МэВ;

— один цикл измерений с выдачей одного показания радиационного фона на цифровой индикатор составляет 3,21 с. При повторении измерений на каждом пикете временной интервал составлял несколько минут;

— относительная погрешность измерений составляет менее 15% на тестовом изотопе;

— температурный диапазон, в пределах которого можно пренебречь уходом отсчетного уровня показаний дозиметра, составляет от  $-45$  до  $+50$  °С. Кроме того, по данным наших измерений в малоактивных полостях температурный ход показаний прибора в интервале от  $-15$  °С до  $+10$  °С незначителен.

С помощью этого прибора измерения в пределах Васильевского острова выполнялись один раз в месяц и захватывали интервал от сентября 2005

до апреля 2006 г. Абсолютная погрешность определения экспозиционной дозы составляла от 10 до 40% относительно среднего значения и оценивалась по стандартному алгоритму для прямых наблюдений: вычислялось среднее значение, затем — среднеквадратическое отклонение; после — определялся коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 95% и окончательно — коэффициент Стьюдента умножался на дисперсию.

В пространственном распределении значений экспозиционной дозы (рис. 2) отчетливо выделяются четыре области, отличающиеся друг от друга максимальным и минимальным значением фона, простираением аномалий и степенью их изометричности. Одна область приходится на цент-

ральный район Васильевского острова, другая область пространственно отвечает промышленной зоне на юго-западе Васильевского острова, третья область совпадает с Приморским районом, четвертая — с парковыми массивами (рис. 1).

Сопоставление пяти представленных карт показывает, что независимо от временного хода радиационного фона границы указанных областей практически не меняются. Согласно изложенным выше представлениям, Васильевский остров обладает стационарной пространственной структурой в распределении активной пылевой компоненты, что связано с наличием потенциальных барьеров, ограничивающих распространение пылевой взвеси. Переход от осеннего к зимнему

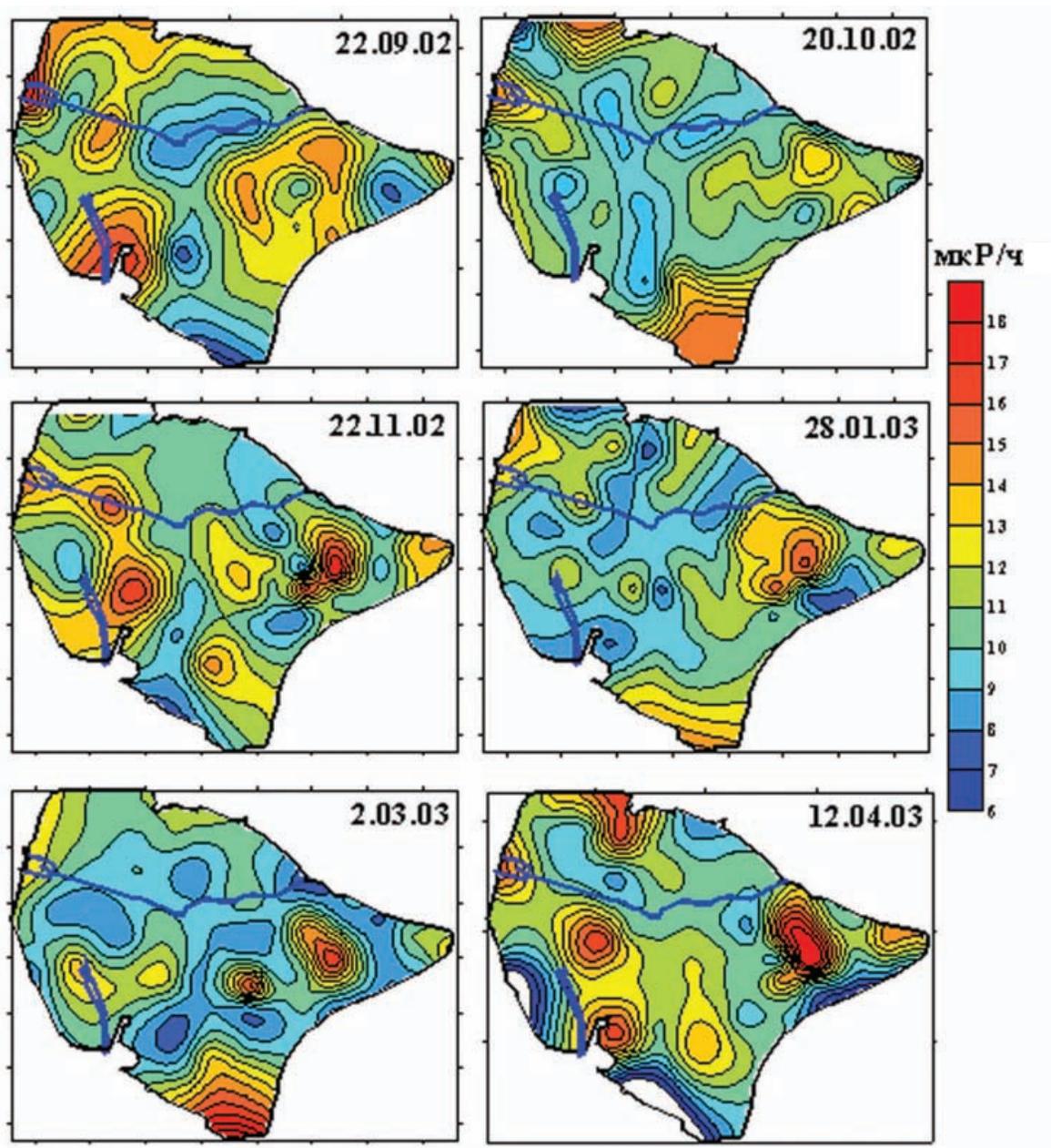


Рис. 2. Временная динамика активной пылевой компоненты по площади полигона (восстановлено по измеренной экспозиционной дозе)

сезону отмечается уменьшением степени дифференцированности пространственной структуры радиационного фона. Характер изолиний и четкая их корреляция с планировкой Васильевского острова указывают на доминирующее влияние антропогенного фактора и локальных возмущений воздушного потока в окрестности побережья Финского залива на радиационный фон в каждой из выделенных зон. Анализ временной стационарности показывает, что радиационный фон наименее устойчив во времени в центральной части Васильевского острова (стройки, интенсивное движение), в окрестности побережья Финского залива (песчаный пляж+интенсивный воздушный поток) и в промышленной зоне.

Дальнейшая оценка структурных закономерностей выполнена на основе тренд-аппроксимации радиационного фона  $z(x, y)$ :

$$z(x, y) = \sum_{j=0}^5 \sum_{k=0}^5 a_{jk} x^j y^k,$$

где  $a_{jk}$  — подбираемые численные коэффициенты,  $x$  и  $y$  — условные прямоугольные координаты. Для определения оптимальной степени полинома мы применяли  $\chi^2$  — критериальный подход и, независимо, путем подбора с выделением таких степеней многочлена, при которых полиномиальная поверхность меняется слабо. Результат полиномиальной аппроксимации экспозиционной дозы

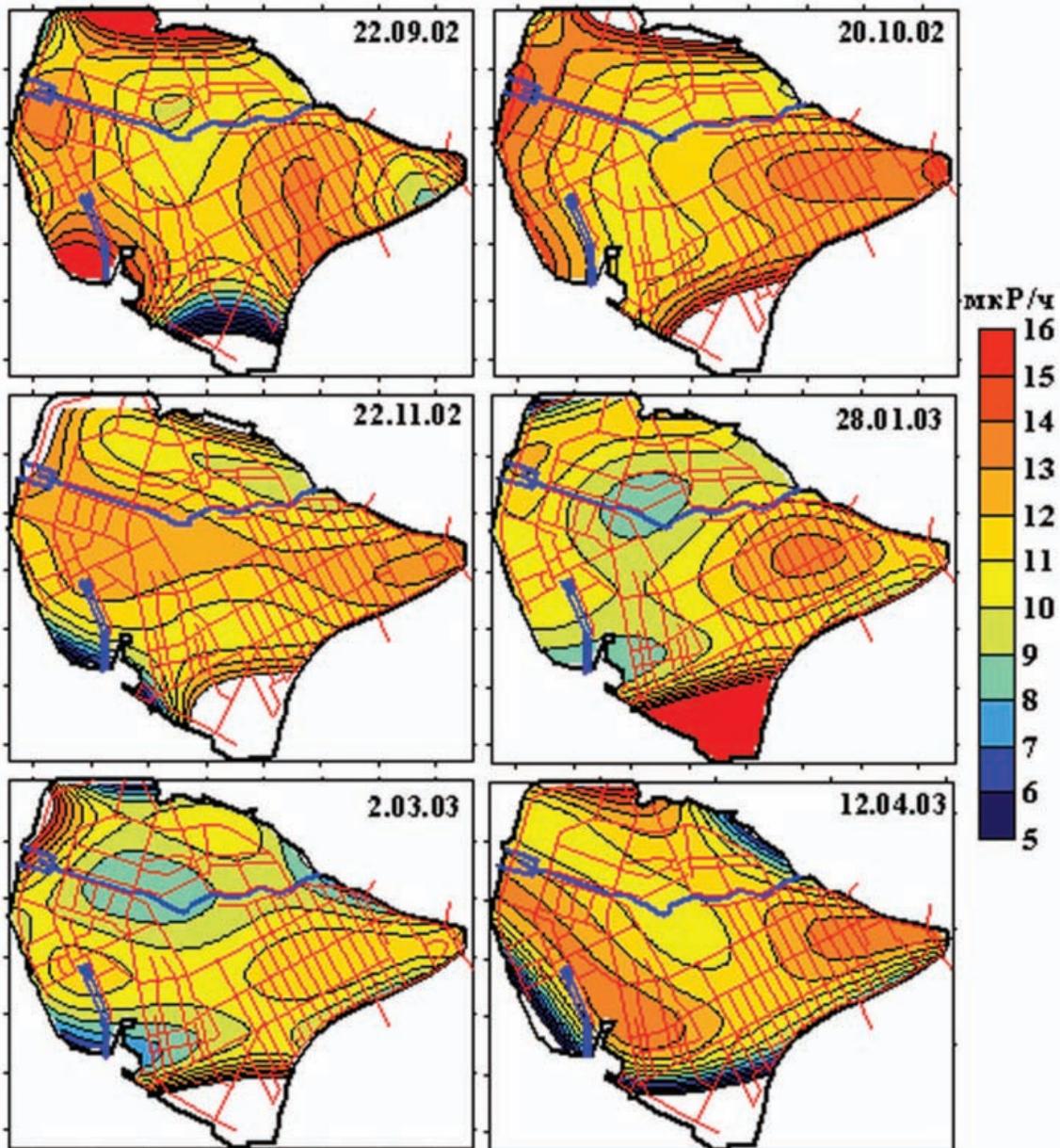


Рис. 3. Основные тенденции временной динамики экспозиционной дозы, проявленные при ее аппроксимации полиномом пятой степени

представлен на рис. 3, где на карту изолиний наложена сеть улиц (красные линии) и каналов (синие трассы). Низкочастотная составляющая экспозиционной дозы отражает взаимодействие системы улиц с интенсивным ветровым потоком, в результате которого застроенная часть полигона становится подобием аэродинамической трубы. Ее формирование приводит к выдуванию в осенне-зимний период активной пылевой компоненты из заселенной части полигона на территорию парковых массивов и каналов. В итоге структура карты изолиний полиномиального тренда делится на узкие направленные зоны, ориентация осей которых меняется в период наших измерений, т. е. имеет место ротационная составляющая в динамике пространственной структуры экспозиционной дозы.

Анализ фактической и аппроксимационной карт распределения значений радиационного фона демонстрирует их общность, состоящую в существовании регулярных (пространственно периодичных) структур, границы которых со временем изменяются мало, а знаки экстремумов оказываются нестационарными (в отдельных элементах структуры наблюдаются колебания). Как отмечалось выше, это напоминает стоячую волну, возникновение которой в системе ограниченных размеров (с жесткими границами) определяет эффект самоорганизации — образование устойчивых форм в нестационарной пространственной картине характеристического параметра системы. Указанные структуры в нашем случае реализованы относительно уровня средних значений измеренного характеристического параметра. Физически это эквивалентно возникновению стоячей волны в плоском слое.

### Физическая аналогия

Проведение аналогий между колебаниями значений характеристического параметра экосистемы с формированием волноподобных форм в структуре карт изолиний этого параметра, с одной стороны, и, с другой стороны, волнообразованием в веществе, например, в неразрывной жидкости может быть корректным, если данный характеристический параметр прямо или косвенно отражает динамику неразрывной физической среды. В нашем случае измеренная радиоактивность связывается с динамикой пылевой взвеси, которая в свою очередь определяется перемещениями воздушных масс, ограниченных наземными инженерными сооружениями и турбулентными потоками над водными бассейнами. Система не является изолированной в смысле притока и оттока вещества (воздушных масс и пыли), но в силу указанных выше факторов — ограниченной пространственно. Неравновесное состояние системы и возможность упрощения ее геометрии до плоского неравновесного слоя, расположенного горизонтально и ограниченного по латерали, допускает сопоставления с опытом Бенара и его модификациями.

В эксперименте А. Бенара (1901) фигурирует плоский слой жидкости, заключенный между двумя изотермическими горизонтальными стенками, из которых нижняя поддерживается при повышенной температуре. Плотность вещества слоя формально задается как функция его коэффициента теплопроводности и отклонения значений температуры относительно фоновой величины. Граничные условия на нижней и верхней поверхностях подразумевают отсутствие скольжения жидкости и постоянство температуры. Полученные физическим и на сегодняшний день аналитическим путями решения утверждают, что при достижении числом Рэлея  $Ra$  (определяет отношение сил плавучести к силам диссипации) критического значения  $Ra_k$  в слое, выведенном из плотностного равновесия нагревом, возникает конвекция. При незначительном превышении  $Ra$  критического значения основная форма конвективного движения представлена валами, а при дальнейшем росте числа Рэлея на поверхности неравновесного слоя возникают гексагональные ячейки, устойчивость которых обусловлена зависимостью вязкости вещества слоя от температуры (Graham, 1933; Palm, 1960; Segel, Stuart, 1962; Busse, 1978).

Развитие ячеистого структурирования (диссипативного структурирования) наглядно представляется на основе сравнения линий тока и линий смещения в плоском неравновесном слое. Первые отражают траектории частиц возмущенной перемешиваемой среды, вторые — колебания элементарных объемов неравновесного слоя относительно положения равновесия под действием этого перемешивания. На рис. 4, а отображен случай, когда центру гексагональной ячейки на верхней поверхности слоя соответствуют всплывающие потоки вещества, а центру гексагональной ячейки, расположенной на поверхности раздела 1–1', отвечают погружающиеся потоки. Условие неразрывности потока жидкости заставляет в пределах одной конвективной ячейки рисовать две циркуляции в противоположных направлениях (линии С и С'). На границе конвективных ячеек формируется особая точка S, в которой одновременно наблюдается конвергенция одной пары потоков (1–1') и дивергенция ортогональных к этой паре двух других потоков (2–2'). В терминах Т. Томсона и И. Стюарта (1980) данная особая точка определена как «седло» и, применительно к гидродинамике, характеризуется как область неустойчивого течения.

Длительные исследования динамики природных диссипативных систем, частным случаем которых является неравновесный в плотностном отношении слой в опыте Бенара, показывают существование в их структуре автоколебательных процессов. В их условиях неустойчивые течения вещества в гидродинамических системах вырождаются в некоторые предельные циклы, которые в нашем случае представлены устойчивыми конвективными циркуляциями частиц жидкости. Такие циклы, притягивающие к себе все возможные

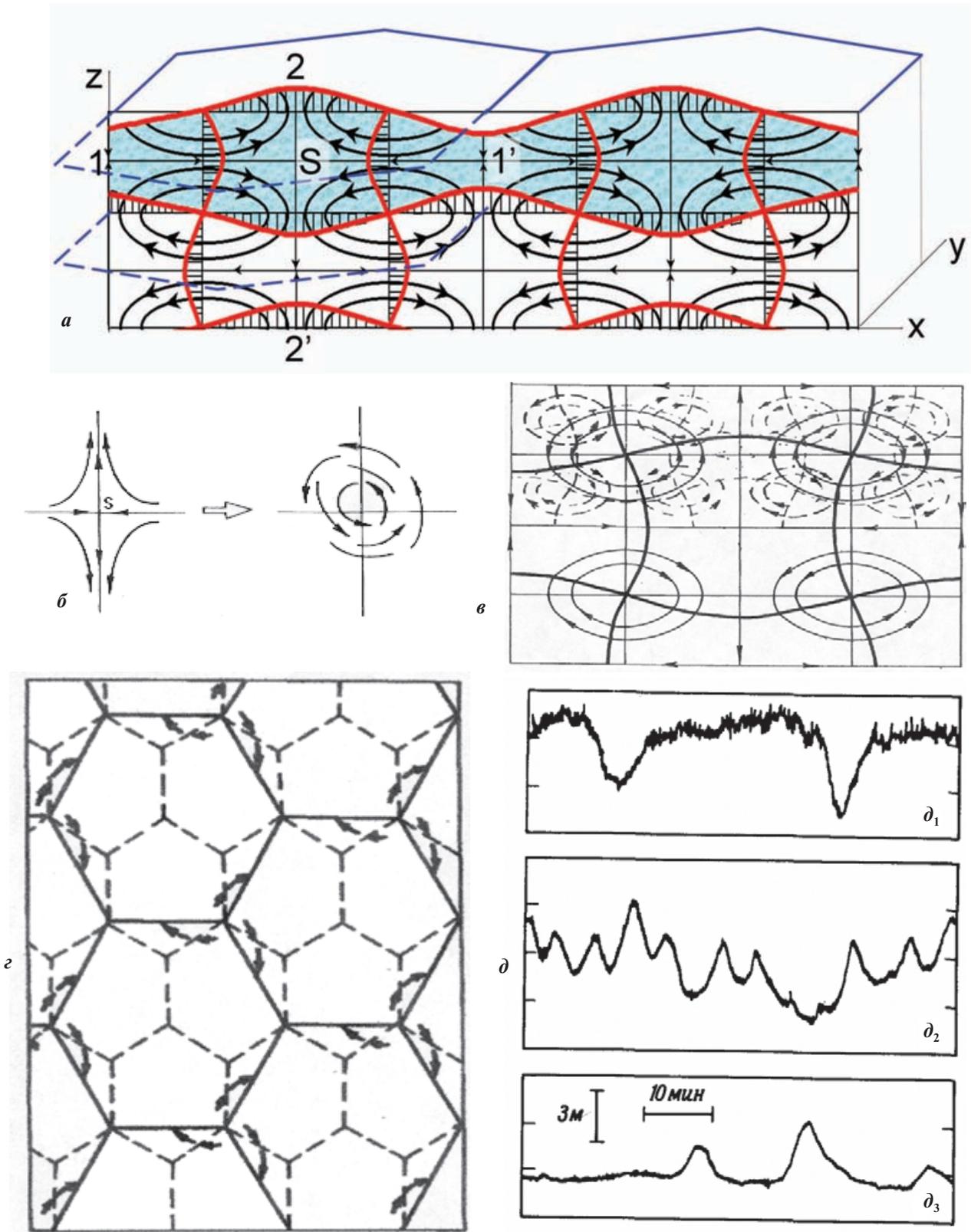


Рис. 4. Диссипативное структурирование неравновесной системы, представленной в опыте Бенара неравновесным слоем жидкости

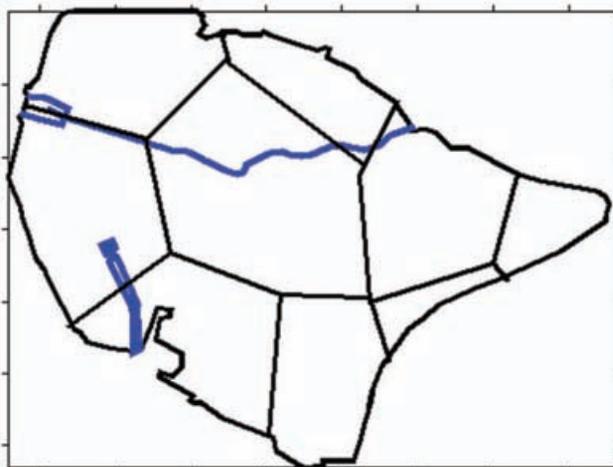
*a* — взаимосвязь линий тока и линий смещения и обусловленность гексагональных диссипативных структур волновыми явлениями; *b* — фазовый портрет преобразования течения с особой точкой в устойчивое течение (бифуркация Хопфа); *c* — проявление бифуркации Хопфа при диссипативном структурировании разреза неравновесного слоя; *d* ( $d_1$ – $d_3$ ) — экспериментальное подтверждение бифуркации Хопфа в разрезе неравновесного слоя жидкости (по Тернеру, 1988)

неустойчивые течения, названы в синергетике «аттракторами». Процесс перехода течения от особой точки  $S$  к предельному циклу (рис. 4, б) носит в общем случае вероятностный характер и известен как «бифуркация Хопфа» (Т. С. Ахромеева и др., 1988), следствием которой будет распад одной крупной конвективной ячейки на несколько меньших (рис. 4, в) с последующим дроблением ячеек диссипативной структуры (рис. 4, г).

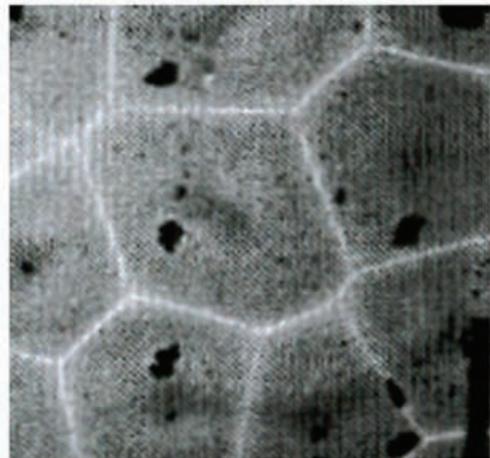
Явление дробления диссипативной структуры тесно связано с изменением энергии колебательного и волнового процесса в неравновесном слое. Величина этой энергии зависит в том числе от параметров, определяющих реологию вещества слоя и необратимое рассеяние (диссипацию) энергии упорядоченного движения в энергию тепловую: при нагреве среды ее вязкость уменьшается по мере приближения к источнику тепла и, как следствие, уменьшаются квазиупругие силы  $\tilde{F}_{упр}$ , возвращающие колеблющиеся частицы нагреваемой среды в равновесное состояние. Рассматривая движение отдельной частицы по аналогии с маятником, обозначим  $\tilde{F}_{упр} = -kx$  ( $x$  — смещение частицы относительно равновесной позиции) и предположим, что уменьшение  $\tilde{F}_{упр}$  связано с уменьшением коэффициента упругости  $k$ . Тогда, если собственная частота колебаний частицы  $\omega \sim \sqrt{k/m}$  ( $m$  — масса частицы), то по мере движения к источнику тепла длина волн  $\lambda \sim 1/\omega$ , представленных линиями смещений (рис. 4), увеличивается. В гидродинамике такие волны, возникшие в жидкости при ее возмущении в условиях внешнего гравитационного поля (гравитационного поля Земли), называются внутренними гравитационными волнами. Изменение их длины по мере движения от охлаждаемой поверхности неравновесного слоя в опыте Бенара к его нагреваемой поверхности есть одно из следствий бифуркации Хопфа.

Сопряженность диссипативного структурирования поверхности неравновесного слоя с диссипативным структурированием его разреза доказана экспериментально. В частности, в трудах Кутателадзе (1965) приведены результаты натуральных наблюдений, из которых следует, что на фоне крупномасштабных конвективных течений, захватывающих весь разрез неравновесного слоя жидкости, вблизи его поверхности развиваются мелкомасштабные конвективные ячейки. Другой пример относится к работам Тернера (1988), где экспериментально показано увеличение длины внутренних гравитационных волн по мере погружения в неравновесный жидкий слой из-за роста давления с глубиной и, следовательно, увеличения вязкости жидкости (рис. 4, д).

Обобщая, можно предположить, что диссипативное ячеистое структурирование неравновесной в плотностном отношении гидродинамической системы захватывает не только ее поверхности, но является объемным процессом. Проводя аналогию с ячеистым структурированием карт изолиний измеренного характеристического параметра, допускаем, что оно указывает не только на диссипативное ячеистое структурирование неравновесного объема воздушных масс, но и на диссипативное ячеистое структурирование всех макро- и микроскопических элементов данной природно-технической геосистемы. Развивая эту аналогию и анализируя разные температурные режимы в опыте Бенара, нами выявлена последовательность в эволюции пространственных форм ячеек диссипативных структур, один из этапов которой оказывается геометрически подобен ячеистому структурированию, зафиксированному в карте изолиний измеренного радиационного фона (рис. 5).



а



б

Рис. 5. Спонтанное ячеистое структурирование замкнутой экосистемы, проявленное в площадном распределении экспозиционной дозы, отражающей распределение активной пылевой компоненты

а — схема ячеистого структурирования карт изолиний экспозиционной дозы; б — фотография подобной ячеистой структуры на поверхности неравновесного плоского слоя жидкости

## Аппроксимации и моделирование

Согласно волновым аналогиям, динамика значений радиационного фона на каждом пикете аппроксимируется гармонической функцией, на наличие которой в структуре первичных измерений косвенно указывает полиномиальный тренд третьего порядка (рис. 6, а):

$$z(t) = \sum_{j=0}^3 a_j t^j,$$

где  $t$  — время,  $a$  — подобранные численные коэффициенты; подбор степени полинома выполнялся на основании критерия  $\chi^2$ . На рис. 6 приведен пример временного хода измеренного радиационного фона в течение сентября—апреля вблизи прибрежной зоны. Подбор гармонической функции (рис. 6, б) дает соотношение вида

$$z(t) = c_0 + c_1 \exp(c_2 t) \sin(c_3 t + c_4),$$

что по структуре напоминает решение дифференциального уравнения, описывающего свободные затухающие или возрастающие по амплитуде колебания неравновесной физической системы, например, механической или электромагнитной природы. В частности, для прибрежной зоны

$$z(t) = 11,00 + 0,50 \cdot \exp(0,32 \cdot t) \cdot \cos(\pi \cdot t/80 + 1,59\pi).$$

Колебания идут на фоне постоянного ненулевого фона (11 мкР/ч), что может быть обусловлено наличием гранитного материала в засыпке пляжа и облицовке набережной. Амплитуда колебаний изменяется во времени по экспоненциальному закону, что является показательным для перехода от осени к зимнему и весеннему сезонам. Причиной экспоненциального роста могут быть как увеличение интенсивности застройки в прибрежной полосе, так и сильный воздушный поток, влияние которых нарастает в период отсутствия вегетации. Периодичность колебаний экс-

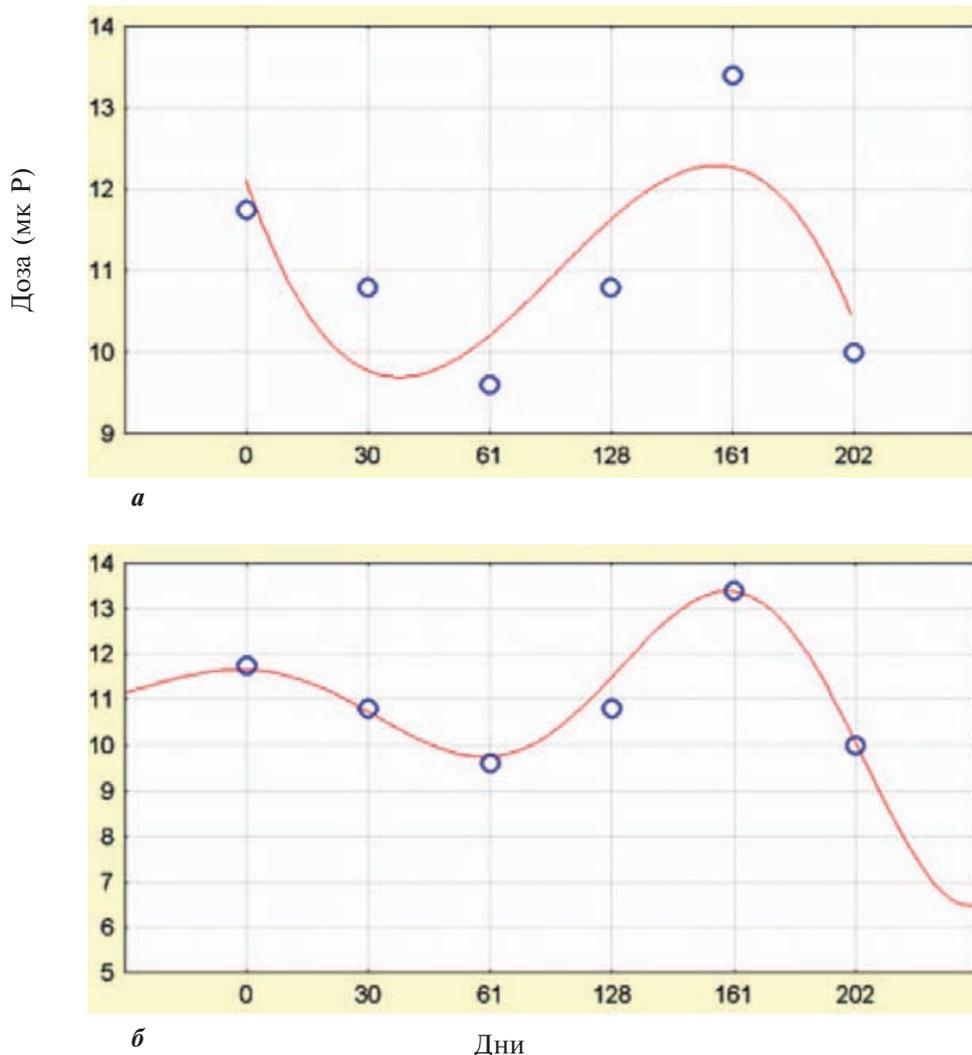


Рис. 6. Временная динамика экспозиционной дозы на побережье Финского залива

а — полиномиальная аппроксимация; б — подбор гармонической функции (указана в верхней части графика)

позиционной дозы составляет в данном случае около 160 дней или около трех месяцев. Это же значение с отклонениями до 10% мы получаем для периода колебаний экспозиционной дозы на остальных 59 пикетах.

Удовлетворительный характер аналитической аппроксимации натуральных наблюдений позволяет предположить возможность подобного описания коэффициентов, например, и многочлена пятой степени, использованного для первичного анализа закономерностей временной динамики измеренного радиационного фона (рис. 7). Подбор показывает подчинение усредненной по площади экспозиционной дозы гармоническому закону без увеличения во времени амплитуды колебаний (рис. 7, а), что отмечает стабильность всей рассматриваемой экосистемы в отношении влияния антропогенного фактора. Как следует из рис. 7, б–в, пространственная скорость изменчивости экспозиционной дозы также меняется во времени периодически и гармонически, но уменьшая амплитуду своих колебаний по мере приближения к весеннему сезону по экспоненциальному закону, что свидетельствует об уменьшении пространственных градиентов экспозиционной дозы. Отрицательные значения коэффициентов полинома определяют участие в аппроксимации, приведенной на рис. 3, значений условных координат позиций измерительных пикетов и не отражают ошибок в оценке радиационного фона.

Обоснованный выше автоволновой характер распределения активной пылевой компоненты в пределах замкнутой экосистемы открывает воз-

можность математического моделирования временной динамики этого распределения с учетом граничных условий. Для рассматриваемого случая нами создана модель миграции активной пылевой взвеси, обусловленной взаимодействием интенсивного ветрового потока со стороны Финского залива и системы улиц нашего полигона, ориентированных в основном субортогонально побережью залива. В модели геометрия границ полигона предельно упрощается (рис. 8, а): Васильевский остров Санкт-Петербурга аппроксимируется половиной эллипса, где линия малой полуоси соответствует берегу Финского залива, а участок эллиптической кривой — набережной Невы и ее рукава Малой Невки. Представление о формировании в совокупности значений экспозиционной дозы структуры, подобной стоячей волне, опирается на два положения:

1. Геометрия жилых и зеленых массивов фиксирована и фиксированы области пространственной стационарности в картах изолиний экспозиционной дозы, т.е. узлы и пучности волны не меняют своего положения в пространстве.

2. Полигон окружен со всех сторон водой, что дает по контуру полигона нулевые значения экспозиционной дозы или отсутствие активной пылевой взвеси. Иными словами, по контуру полигона неизменно расположены только узлы волны.

Вместе с тем, эта модель приближенна: на побережье Финского залива в период измерений шли наиболее интенсивные строительные, дорожно-строительные, оформительские работы, в результате чего возникали дополнительные порции

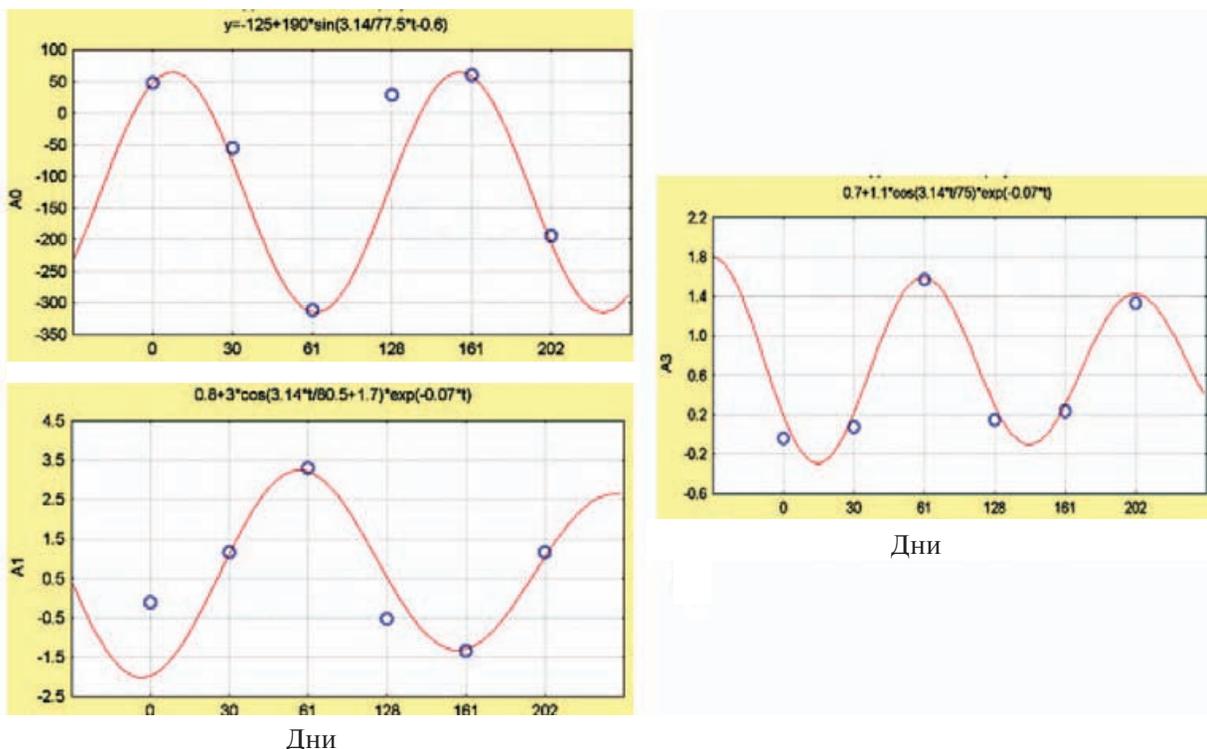
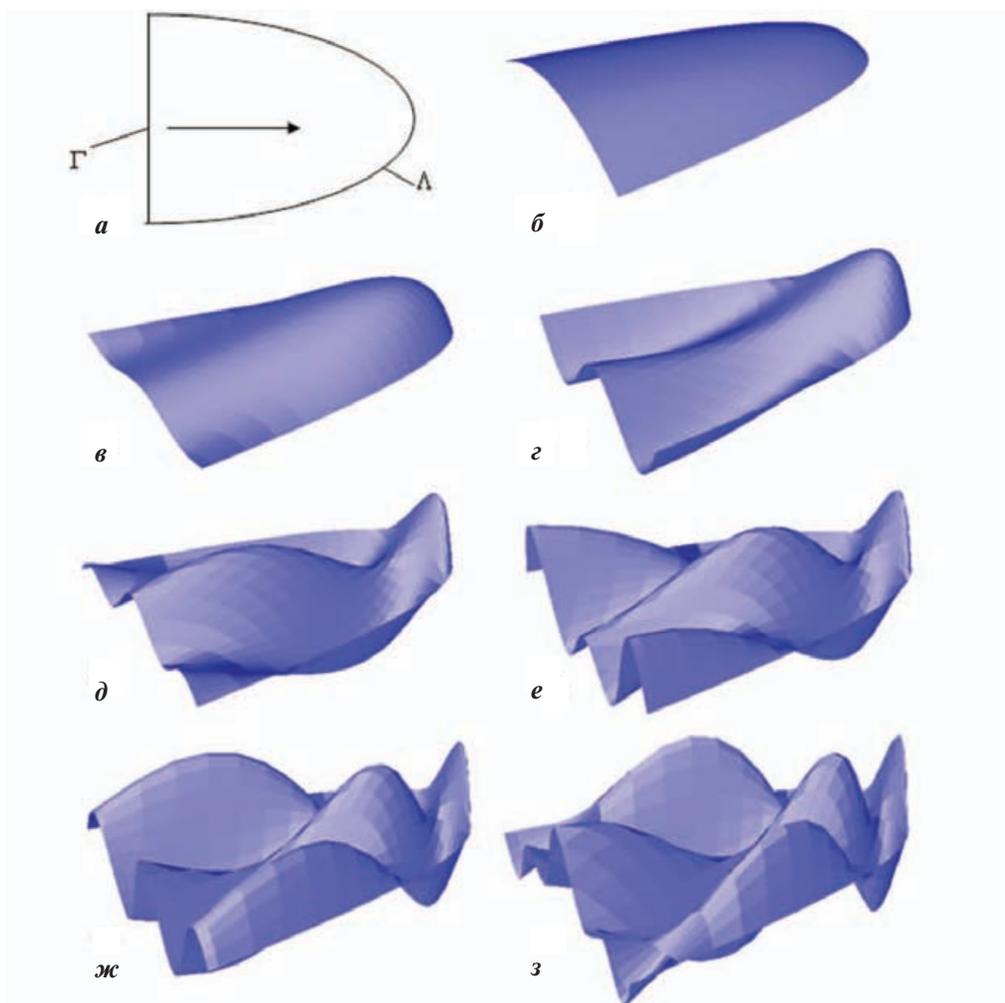


Рис. 7. Подбор гармонических функций, аппроксимирующих временное поведение коэффициентов полинома



**Рис. 8.** Волновая модель в задаче моделирования перераспределения активной пылевой компоненты в замкнутой экологической системе

*a* — упрощенная геометрия модели, стрелкой указано доминирующее направление переноса пыли; *б–з* — изменение экспозиционной дозы с течением времени

измельченного гранитного и изотопного материала, разносимого ветром по полигону. Поэтому наша модель дополнена условием существования ненулевой экспозиционной дозы на линии. Она растет по экспоненте по мере перехода от осени к зиме и подчиняется сезонным, т.е. гармоническим закономерностям.

С учетом приведенных выше качественных обоснований сформулируем граничные и начальные условия:

1.  $z(r, t = 0), \forall r \in S$ , где  $t$  — время,  $r = f(x, y)$  — модуль радиус-вектора, определяющего положение точки в пределах полигона  $S$ ,  $z(r, t)$  — смещения в волне или значения экспозиционной дозы как функция пространственных координат и времени.

2.  $z(r, t) = 0 \forall r \in \Delta$ , где  $\Delta$  — береговая линия рек Невы и Малая Невка.

3.  $z(r(x(\xi, \zeta), y(\xi, \zeta)), t) = \sin(r(\xi, \zeta) \cdot t) \times \exp(a \cdot t), \forall r \in \Gamma, \forall t$ , где  $\xi = f(x, y)$ ,  $a = 0,3$  — ко-

эффициент затухания (усиления) временных колебаний экспозиционной дозы, исходно задаваемой как гармоническая функция. Вид данного граничного условия определяется нашей аппроксимацией экспериментально полученного распределения экспозиционной дозы вдоль береговой линии.

4.  $\frac{\partial z}{\partial t} = 0, \forall r \in S, t = 0$  — в начальный момент

времени любая точка полигона обладает нулевой скоростью изменчивости экспозиционной дозы.

Решение задачи представляется в параметрической форме, где

$$x(\xi, \zeta) = \xi^3 + \zeta^3, \quad y(\xi, \zeta) = \xi - \zeta. \quad (1)$$

Изменение экспозиционной дозы (концентрации активной пылевой компоненты) или смещения в стоячей волне  $z(\xi, \zeta, t)$ , как следует из на-

ших рассуждений, должно удовлетворять волновому уравнению вида

$$\frac{\partial^2 z}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial \zeta^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \Phi, \quad (2)$$

где  $\Phi$  — некоторая функция координат и времени.

Учитывая, общий характер решения уравнения (2) и результаты аппроксимации экспериментальных данных, временную динамику экспозиционной дозы определим в виде волновой функции

$$z(\xi, \zeta, t) = \sin(\xi \cdot t) \sin(\zeta \cdot t) \cdot \exp(0,1 \cdot t), \quad (3)$$

где параметры  $\xi$  и  $\zeta$  меняют свои значения в интервале от 0 до  $2\pi$ , что соответствует нашим экспериментальным оценкам для перехода от осеннего к зимнему сезонам. Решение (3) удовлетворяет сформулированным начальным и граничным условиям, а также волновому уравнению (2), однозначно определяя функцию  $\Phi$ . Динамика модели, отдельные кадры которой даны на рис. 8, б-д, показывает:

1. В начальный момент времени смещения в волне ненулевые только вдоль береговой линии залива. По мере движения от берега в глубь полигона смещения в структуре волны монотонно убывают (задание условного начального импульса, выводящего систему из равновесия).

2. В дальнейшем, по мере нарастания неравновесия, смещения в волне вдоль береговой линии приобретают заметную пространственную периодичность. Максимумы смещений последовательно перемещаются в глубь острова с формированием в волновой структуре узкого канала, отражающего эффект действия «аэродинамической трубы», вдоль которой идет перераспределение пылевой взвеси.

3. На завершающем этапе счета, отвечающем модели динамики активной пылевой взвеси в зимний период, распределение экспозиционной дозы максимально дифференцировано в области, наиболее удаленной от берега Финского залива (соответствует плотно застроенной части Васильевского острова — от 1-й до 23-й линии). По мере движения к побережью волновые структуры становятся более пологими, менее изрезанными и образуют области, отвечающие на наших картах зонам пространственной стационарности в Приморском районе и в пределах промзоны (рис. 1).

### Заключение

Качественный анализ карт изолиний экспозиционной дозы, измеряемой на высоте человеческого роста на коре деревьев, предположительно дает представление о динамике пылевой взвеси: изменении ее концентрации и направлениях миграции. Пылевая взвесь способна обладать ненулевой радиоактивностью, что может быть обусловлено техногенным и эрозионным измельчением гранитного материала в пределах полигона. Монотонное изменение концентраций взвеси определяется исключительно антропогенным фактором. Наличие во временной динамике экспозиционной дозы периодической компоненты вызвано воздействием сезонных факторов: сменой перио-

дов вегетации и покоя, влиянием направленных ветровых потоков. Действие этих двух факторов приводит при неизменных конфигурациях застроенных и парковых массивов к образованию в картах изолиний экспозиционной дозы структуры, подобной стоячей волне. Ее физический образ качественно обоснован: полигон по контуру окружен водой, что дает в точках контура нулевую экспозиционную дозу или узлы в структуре волны. Приуроченность максимумов экспозиционной дозы к жилым массивам и минимумов — к парковым позволяет предположить, что узлы и пучности этой волны не перемещаются в пространстве. Волновая аппроксимация открывает путь к моделированию временной динамики пылевой взвеси, которая подобна временной динамике поверхности колеблющейся мембраны с одной незакрепленной и одной жесткой границей. Структуры, сформированные на поверхности неравновесной мембраны на заключительных этапах ее динамики, коррелируются с элементами ячеистого структурирования в пространственном распределении значений измеренного радиационного фона. Таким образом, в исследуемой неравновесной экосистеме распределение пылевой взвеси, предположительно определяющей этот радиационный фон, подчиняется волновым законам. Волновое структурирование данного распределения осуществляется спонтанно в условиях переменного соотношения между процессами упорядоченной и хаотической миграции пылевой взвеси. Это позволяет ассоциировать замкнутую экосистему с диссипативной физической системой и предполагать, что в ней пространственное распределение любого параметра, связанного с жизнедеятельностью авто- и гетеротроф, также определяется волновыми законами.

Авторы выражают признательность проф. М. А. Спиридонову за его конструктивные замечания, поступившие в период работы над текстом статьи.

1. Красный Л. И. Разномасштабная делимость // Вестник РАН. 2002. Т. 72. № 6. С. 515–519.
2. Петров О. В. Внутренние гравитационные волны Земли и нелинейные палеогеодинамические диссипативные структуры // Докл. РАН. Т. 326. № 2. С. 323–326.
3. Петров О. В. Нелинейные явления термогравитационной неустойчивости и внутренние гравитационные волны Земли // ДАН СССР. Т. 326, № 3. 1992. С. 506–509.
4. Петров О. В., Мовчан И. Б. Аналитическое и экспериментальное исследование конвекции в жидких полостях, цилиндрических и сферических оболочках // Тезисы Межд. геол. конференции «Геология-300». СПб., 2000. С. 190–191.
5. Петров О. В., Мовчан И. Б. Диссипативные структуры земной коры и мантии как отражение волновых процессов // Регион. геология и металлогения. СПб., 2002. № 17. С. 90–105.
6. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. (Пер. с англ.) М., 1960.
7. Пригожин И. Термодинамика необратимых процессов // Лекции в летней Международной школе физики им. Э. Ферми. (Пер. с англ.) М., 1962.
8. Benard H. Ann. Chem. Phys. 1901. Vol. 23. № 62.