© И.Б. Мовчан, А.А. Яковлева, О.С. Бородина, 2008

УДК 622.27/.001.572

И.Б. Мовчан, А.А. Яковлева, О.С. Бородина

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ПРОГНОЗ В НЕРАВНОВЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Предложена, применительно к неравновесным экологическим системам, физическая модель их кусочно-стационарной аппроксимации семейством стоячих волн, ограниченных потенциальными барьерами.

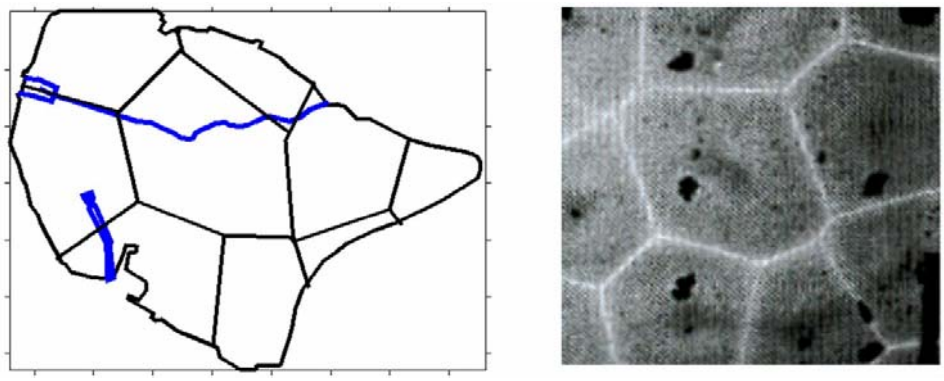
Семинар № 10

1. *Постановка задачи*

При экологическом мониторинге достоверное измерение характеристического параметра природно-технической геосистемы составляет начальный этап описания ее неравновесного состояния. Кроме нормативных расчетов экологического риска и ущерба, нормативного моделирования распространения загрязнений, условность которых является общепризнанной, возникает задача корректной интерпретации измеренного сигнала и, как следствие, прогноза временной или пространственной динамики характеристического параметра. В общем случае она реализуется подбором аналитической функции тренда сигнала, допускающей предсказание тенденции этой динамики, но пренебрегающей локальными вариациями наблюденных значений. Для аналитического описания последних требуется ввести формальную модель природно-техничес-кой геосистемы, во-первых, претендующую на универсальность и, во-вторых, как следствие, допускающую корректную аналитическую аппроксимацию структуры измеренного сигнала с ее последующей экстраполяцией. Заметим, что полиномиальные аппроксимации не рассматриваются в качестве решения, а лишь как начальная итерация подбора (см. ниже).

2. *Модель природно-технической геосистемы*

сформулируем на основе классической аналогии, заимствованной из гидродинамики. Более ста лет назад А. Бенар обнаружил явление спонтанного структурирования плоского слоя жидкости, выводимого из равновесия элементарным нагревом. Специфика эксперимента состоит в том, что плоский слой был ограничен по латерали жесткими стенками (потенциальными барьерами). Особенность спонтанного структурирования заключалась в ее ячеистом проявлении на разных масштабных уровнях и фрактальном самоподобии ячеистых образований разных порядков. Позднее было обнаружено, что последние, традиционно определяемые как ячейки Бенара, свойственны не только гидродинамическим, но также неравновесным системам разного генезиса, что составило основу теории синергетики. В последние годы рядом авторов (И.Р. Пригожин; Н.В. Карлов и М.В. Кириченко и др.) дано строгое обоснование инвариантности ячеистого проявления самоподобных структур относительно генезиса неравновесной системы как следствие влияния латентно



а *б*

Рис. 1. Ячеистая структура карты измеренного фона в пределах Васильевского острова (а) и ее аналог в неравновесном слое жидкости (б)

проявленных универсальных автоволновых процессов. Аналитическая конкретика этого утверждения связана с доказательством, что в системах, ограниченных семейством потенциальных барьеров, указанные процессы представлены набором стоячих волн (О.В. Петров; И.Б. Мовчан). Последние удовлетворительно описывают пространственное распределение любого характеристического параметра таких систем. Применительно к экосистемам сформулированные выше положения в чистом виде не применимы: позиции потенциальных барьеров в них не детерминированы и жестко произвольную экосистему не ограничивают по контуру. Тем не менее, экосистема может быть условно разбита на локальные области, в пределах каждой из которых аппроксимация стоячими волнами может оказаться корректной.

3. *Апробация*

Для верификации данной модели нами в качестве полигона выбран Васильевский остров С.-Петербурга, в пределах которого исследовалась динамика активной пылевой взвеси. Актуальность работ такого рода связана с высоким показателем заболеваний легочной системы жителей данного района, обусловленным вырубкой зеленых насаждений, насыпными и строительными работами, интенсивными ветровыми потоками из-за близости прибрежной зоны, ростом транспортной нагрузки. Нами измерялась общая радиоактивность на коре деревьев на уровне человеческого лица: исходно кора представляет собой неактивный материал и ненулевой фон на ней может быть объяснен сорбцией активной пылевой взвеси. Число пикетов превышало 60 и сами пикеты равномерно распределялись по площади полигона, измерения производились на каждом пикете несколько раз с определением абсолютной погрешности и захватывали более полугода. Итоговые карты показывают, что, несмотря на колебание фона в отдельных областях Васильевского острова, структура поля значений радиоактивности, связанной с распространением пылевой взвеси, меняется незначительно. Это напоминает структуру стоячей волны, проявляющейся в ячеистом структурировании карт измеренного параметра (рис. 1), и допускает аналитическое моделирование его пространственно-времен-ной динамики.

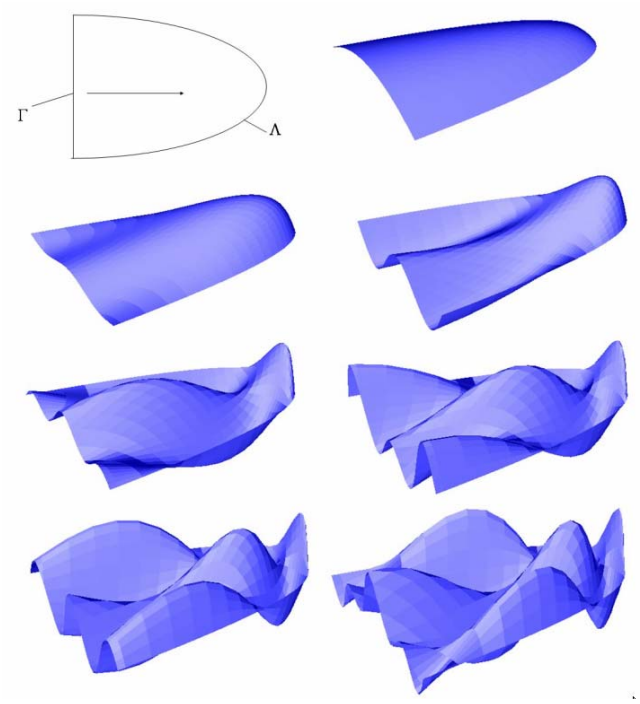


Рис. 2. Семейство стоячих волн в мембране, аппроксимирующее волновое структурирование пространственного распределения характеристического параметра

В последнем случае она представлена как динамика неравновесной мембраны с одной свободной (Г) и одной жестко закрепленной (Λ) сторонами (рис. 2).

Прикладной аспект обнаруженного эффекта состоит в том, что если измерение характеристического параметра осуществляется в пределах природно-технической геосистемы, ограниченной системой потенциальных барьеров, то для его пространственной и временной экстраполяции возможно применять систему детерминированных волновых функций, дающих достоверный прогноз на интервал, не превышающий половину от интервала измерений. Для подтверждения данного тезиса были проведены опытные работы по промплощадке предприятия, специализация которого предполагала регулярный дозиметрический контроль открытых территорий и крыш ряда зданий. Ненулевой фон мог быть обусловлен наведенной радиоактивностью, миграцией пылевой взвеси; стационарные источники отсутствовали. Система полагалась подобной Васильевскому острову: во втором случае роль потенциальных барьеров играли водные массивы, окружавшие полигон, а в первом - высокие заборы, препятствующие распространению взвешенных веществ. Как для Васильевского острова, так и в пределах изолированной промплощадки карта изолиний измеренного фона не меняла доминирующие простирания осей аномалий и градиентных зон, а только знак аномалий (относительно среднего значения) (рис. 3).

Допуская справедливость аппроксимаций этой структуры семейством стоячих волн, мы получили для отдельных пикетов строгую аппроксимацию:

1. на первом этапе подбора выполнена полиномиальная оценка, создающая основу для определения явной аналитической формы низкочастотной компоненты сигнала (на втором шаге);

2. Стоячая волна в опыте Бенара обладала фрактальной (самоподобной) структурой, т.е. подбор высокочастотной компоненты должен подчиняться формульным зависимостям той же

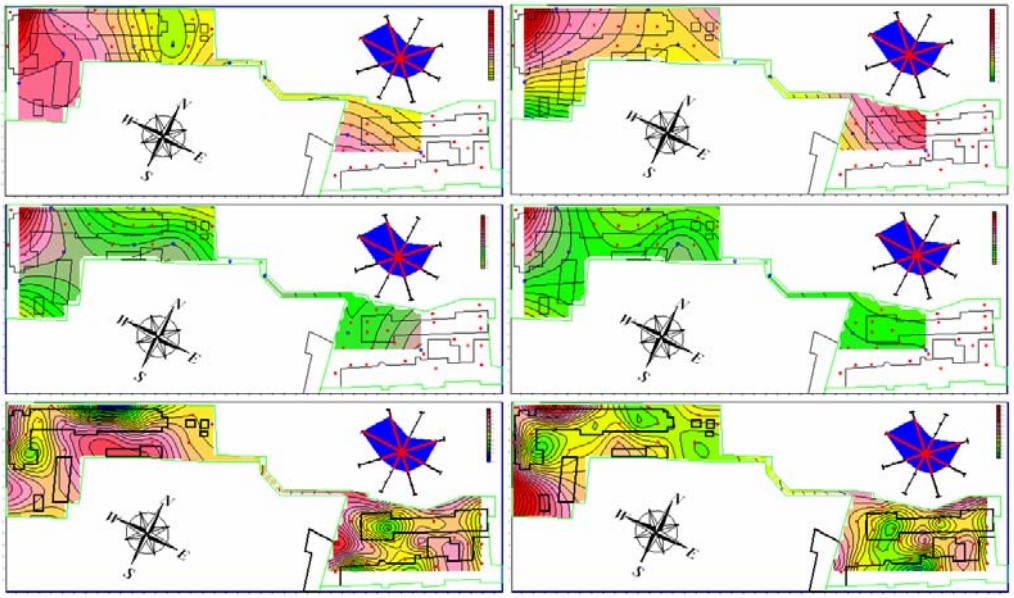


Рис. 3. Динамика измеренного фона в пределах изолированной промплощадки

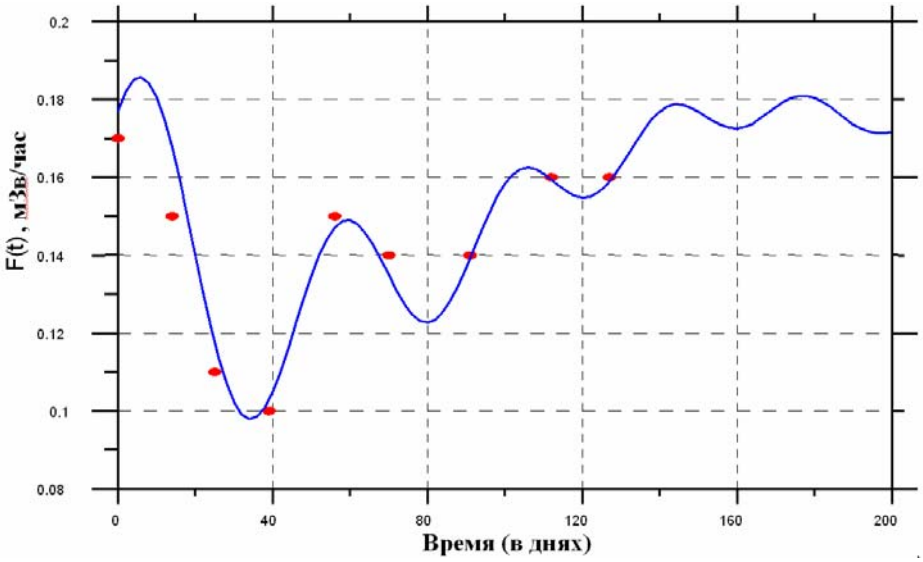


Рис. 4. Аналитическая аппроксимация временной динамики измеренного сигнала с последующим ее прогнозом

структуры, что и низкочастотная (третий этап).

Верификация данных положений дает для отдельного пикета суммарную аппроксимацию вида:

$$F(t) = 0.157 + 0.035\exp(-0.003t)\times$$
$$\times\sin\left(-\frac{(t+13)}{40}\right) + 0.05\exp(-0.015t)\times$$
$$\times\cos\left(\frac{t}{9.1\exp(-0.0016t)} - 0.9\right),$$

где $F(t)$ - измеренный фон, t - время.

Как видно из рис.4, такое аналитическое представление не только учитывает большую часть особенностей измеренного сигнала, но и дает вполне правдоподобный прогноз временной динамики измеренного параметра.

4. Заключение

Полученные результаты позволяют допустить, что любая природно-техническая геосистема может быть рассмотрена как кусочно-одно-родная. В пределах отдельной однородной области структурирование этой системы, проявляющееся как в структурировании характеристических ее параметров, так и семейства составных элементов (сообществ, популяций, ландшафтных комплексов и т.д.), проявляется, во-первых, в виде пространственно стационарного ячеистого деления, и, во-вторых, как детерминированное семейство стоячих волн. Последнее позволяет создавать строгие аналитические реконструкции в прогнозных задачах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карлов Н.В., Кириченко М.В.* Колебания, волны, структуры. – М., 2005, 170 с.
2. *Николис Г., Пригожин И.Р.* Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. – М., 1979, 305 с.
3. *Петров О.В.* Нелинейные явления термогравитационной неустойчивости и внутренние гравитационные волны Земли. ДАН СССР, т.326, №3, 1992. – С. 506-509.
4. *Мовчан И.Б.* и др. Изолированность экологической системы и характер распределения загрязнений в ней. Журн. “Региональная геология и металогения”, №28, 2006, 12 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Мовчан И.Б., Яковлева А.А., Бородина О.С. – С.-Петербургский государственный горный институт (технический университет).

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 10 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. *Е.А. Ельчанинов.*