

водозаборных узлов, выделенных по показателям качества воды, различна. Предварительная оценка изменений на ближайшую перспективу возможна.

#### Выводы

Основной причиной загрязнения подземных вод в Люберецком районе Московской области является состояние водозаборных скважин, 30...60 % которых требуют ремонта и дополнительного бурения. Загрязнение подземных вод происходит из-за загрязненного поверхностного стока транзитных рек и отсутствия системы ливневой канализации.

В районе только 50 % жителей города Люберцы и около 30 % жителей поселков используют воду, прошедшую очистку на станциях обезжелезивания. Большинство водозаборных узлов в районе построено в 50-70-х годах прошлого столетия. Не лучше обстоит дело и с водоотведением. Практически все канализационные насосные станции морально и физически устарели.

Решение вопроса качественного водоснабжения жителей Люберецкого района возможно за счет подключения к внешним источникам водоснабжения, строительства новых, реконструкции старых водозаборных узлов, оборудованных современными системами очистки воды, за счет проведения профилактических и ремонтных работ.

Для выработки стратегии обеспечения жителей Люберецкого муниципального района качественной питьевой водой необходимо провести работы по обследованию водозаборных узлов и составлению гидравлических расчетов систем водоснабжения Люберецкого района.

1. Шварц И. Подмосковью угрожает большой дефицит питьевой воды // Строительная газета. – № 30. – 2003.

2. Концепция развития системы водоснабжения Люберецкого района Московской области. – М.: Концерн «Экопроект-строй», 1998. – С. 1–40.

3. Бородкин В. Проблема наступает на пятки. Люберецкая панорама // Общ.-полит. газета. – № 50 (120). – 2007. – 17 июля.

4. О состоянии окружающей среды Московской области в 2002 году: Государственный доклад / Под ред. Н. В. Гаранькина, Н. Г. Рыбальского и В. В. Снакина. – М.: НИИ-Природа, 2003. – С. 43–52.

Материал поступил в редакцию 19.06.13.

*Соколова Светлана Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Комплексное использование водных ресурсов»*

*Тел. 8 (499) 976-21-56.*

*E-mail: sokolovasvetlana@mail.ru*

УДК 502/504:627.51

**В. И. СМЕТАНИН, А. Н. НАСОНОВ, И. М. ЖОГИН**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

**И. В. ЦВЕТКОВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тверской государственный университет»

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ЗОН ВОЗВЕДЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПРОТИВОПАВОДКОВЫХ ДАМБ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕЧНОЙ СИСТЕМЫ**

*Предложен способ определения локальных критических состояний речной системы с использованием фрактального анализа. Рассмотрены мелиоративные технологии природообустройства среды как инструмента регуляции состояний через понижение фрактальной размерности.*

*Фрактальная размерность среды, фрактальная модель паводковых наводнений, защитные противопаводковые дамбы, флуктуации абиогенных нагрузок.*

*There is proposed a method of determination of critical states of the river system using a fractal analysis. Reclamation technologies are considered for environmental engineering as a means of the states control through fractal dimension reduction.*

*Fractal dimension of the medium, fractal model of flood inundation, protective flood dams, fluctuations of abiogenous load.*

На территории Российской Федерации, обладающей большим разнообразием геологических, климатических и ландшафтных условий, наблюдается более 30 видов опасных природных явлений. Наиболее тяжелые последствия вызывают землетрясения, наводнения, засухи, лесные пожары и сильные морозы.

Наводнения являются практически ежегодно повторяющимися стихийными бедствиями, а по площади охватываемых территорий и наносимому материальному ущербу – превосходящими все остальные. Затоплению подвержена территория страны общей площадью 400 тыс. км<sup>2</sup> (ежегодно затопливается около 50 тыс. км<sup>2</sup>) более 300 городов, десятки тысяч мелких населенных пунктов с населением более 4,6 млн человек, множество хозяйственных объектов, более 7 млн га сельскохозяйственных угодий. По оценкам специалистов, среднемноголетний ущерб от наводнений (в действующих ценах) составляет около 43 млрд р. [1].

Геологические и антропогенные нагрузки формируют неоднородности вмещающего ландшафта, которые определяют дальнейшие процессы его самоорганизации, включая конфигурацию (меандрирование, бифуркацию и изрезанность русел) рек и их притоков. В результате таких процессов происходит усложнение среды настолько, что она оказывается чувствительной к любым погодным и антропогенным флуктуациям – выпавшим осадкам в виде дождей и снега, нарушениям берегового ландшафта и т. д. Другими словами, создается локальное напряжение ландшафтной среды, снятие которого естественным путем выражается в виде затопления прилегающих территорий. В этих условиях потенциальное определение таких участков имеет существенное значение, поскольку цена последствий может быть слишком велика.

В последнее время появляются работы, напрямую связывающие исследования структуры речных сетей с фрактальной организацией вмещающего ландшафта и расчета его фрактальной размерности [2, 3].

В этой связи интерес представляют практические исследования количественных оценок изменения организации среды после возведения гидротехнических сооружений и оценки целевой эффектив-

ности природообустройства. Определение мест потенциального затопления не всегда может совпадать с текущей статистикой ГО и ЧС, вследствие того что места ландшафтных напряжений могут изменяться во времени и пространстве.

Анализ пространственного распределения фрактальных размерностей по всей территории речной сети имеет существенное значение. Учитывая то обстоятельство, что исследуемая структура речной сети в общем случае не обладает однородностью вмещающего ландшафта, для его описания недостаточно лишь одной величины фрактальной размерности, а необходима целая совокупность таких размерностей, отражающих распределение мер организационной сложности в структуре речной сети на исследуемой территории.

Таким образом, в начале исследования мы вводим гипотезу, что пространственная организация речной сети с ее притоками, естественными и искусственными водоемами, а также гидротехническими сооружениями – это мультифрактал – сложная организация, объединяющая различные структуры компонентов (с разными фрактальными размерностями) речной системы в единую целостность. При этом фрактальная размерность отражает размерность пространства, в котором функционируют речные системы, и служит количественной оценкой состояний природных систем [2].

Регуляция структуры речной системы может осуществляться различными путями: созданием водохранилищ, искусственных водоемов, очисткой русел от донных отложений, строительством защитных противопаводковых дамб. Все эти мелиоративные мероприятия способствуют снижению фрактальной размерности вмещающей среды. Такая регуляция может происходить в различных точках пространства речной сети.

В этих условиях возведение защитной дамбы можно трактовать как процесс природообустройства, понижающий организационную фрактальную размерность среды. По сути, такое преобразование делает среду более однородной, а следовательно, более устойчивой к проявлению абиогенных флуктуаций. Дополнительный запас устойчивости формируется за счет того, что возведение гидротехниче-

ского сооружения по контуру береговой линии создает дополнительные центры аттрактивной сходимости абиогенных нагрузок. Это означает, что такие нагрузки уже могут бесконфликтно локализоваться во вмещающей среде за счет создания дополнительных центров устойчивости [4].

Анализ структуры речной системы проводили с использованием программы, которая разбивает выделенный прямоугольный фрагмент исследуемого гидрологического слоя карты исследуемой территории сеткой с размером ячейки  $\delta$  с последующим подсчетом числа покрытий  $N$  анализируемого объекта при вариации размеров покрывающих ячеек  $\delta$  – бассейнов речной сети и ее фрагментов. В качестве исходных данных также задается начальный и конечный шаг сетки, минимальный размер которого равен пикселю исследуемого изображения. Расчет фрактальных размерностей осуществляется по классической схеме:

$$\ln N = -D \ln \delta + \ln A. \quad (1)$$

В отличие от «клеточного» подсчета для обработки брались не отдельно бассейны рек, а прямоугольные области бассейнов речной сети. Обрабатывались как бассейны рек в целом, так и отдельные элементы речной системы. Если были необходимы результаты по верховьям реки (а они часто обладают очень неправильной формой), то брали несколько равно-великих прямоугольных областей, производили расчет по каждой, после чего результат усредняли.

Приведем фрактальную модель паводковых наводнений на примере речной системы Тверской области.

В 2010 году погодные условия стали причиной увеличения уровня воды в озерах и реках Тверской области. Из-за дождей начались подтопления сразу в трех районах региона – Осташковском, Пеновском и Селижаровском. Подтопление этих мест явилось следствием весеннего паводка, который завершился усилением осадков – за 15 дней выпала их двухмесячная норма (самое крупное подтопление случилось в 1953 году, тогда уровень воды достиг 211 см при норме 185 см).

Согласно проведенным исследованиям, уровень подъема воды  $\Delta h$  от ординара равен средней скорости подъема  $X$ , умноженной на среднее время подъема  $T$ . Предполагая, что средняя скорость

подъема  $X$  является функцией фрактальной размерности  $D$  речной системы на данной территории, максимально возможный подъем уровня воды  $\Delta h$  можно выразить так:

$$\Delta h = k(D - D_0), \quad (2)$$

где  $k = \eta CT$  – поправочный коэффициент абиогенных нагрузок, определяемый величиной снежного покрова, скоростью таяния снегов, количеством осадков во время паводка и т. д.;  $D, D_0$  – соответственно значения фрактальных размерностей исследуемой территории.

Значение коэффициента  $k$  целесообразно принять одинаковым для всей территории Тверской области. Выбор его конкретного значения в текущий момент времени на основании имеющихся гидрологических данных не представляется возможным. В связи с этим введем следующую характеристику относительного уровня подъема воды  $\theta_{1,2}$  на сравниваемых между собой территориях с индексами 1 и 2:

$$\theta_{1,2} = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} = \frac{D_1 - 1}{D_2 - 1}. \quad (3)$$

Выбрав территорию 2 в качестве эталонной, можно записать следующее:

$$\theta_1 = \theta_{1,2} = \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} = \frac{D_1 - 1}{D_2 - 1}. \quad (4)$$

В качестве эталонной территории с размерностью  $D_2$  выберем минимальное значение фрактальной размерности по участкам территории Тверской области, которая оказалась равной 1,18. Ее выбор обусловлен тем, что эта территория по сравнению с остальными обладает максимальной однородностью или устойчивостью среды к наводнениям из-за флуктуации абиогенных нагрузок. Тогда из (3) следует:

$$\theta_1 = 5,555 \cdot (D_1 - 1). \quad (5)$$

Логично назвать величину  $\theta_1$  относительным коэффициентом наводнения  $i$ -й территории региона, который является количественной и качественной характеристикой паводкового затопления.

Особенностью коэффициента  $\theta_1$  является зависимость только от значения фрактальной размерности  $D_i$ . Факторы абиогенных нагрузок, такие как величина осадков, температурный режим, величина снежного покрова, влияния на величину этого коэффициента не оказывают, поскольку фрактальная размерность – это структурный инвариант (мера) организации природной среды, позволяющий количественно оценивать ее состояние,

включая структурные переходы из одного состояния в другое.

Таким образом, основным и универсальным регулирующим параметром в данном случае является фрактальная размерность речной системы  $D$  – показатель степени развитости речных систем и, как следствие, водонасыщенности территории [5, 6].

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Области вокруг озер и водохранилищ имеют меньшую фрактальную размерность, чем соседние с ними области, что обусловлено меньшей разветвленностью малых рек в окрестностях этих водоемов. Это объясняется тем, что в окрестностях крупных водоемов существуют особые гидродинамические режимы поверхностных и подземных вод, незначительно понижающие сложность организации речной системы. В то же время для окрестностей естественных озер (Селигер и других) фрактальная размерность всегда несколько выше, чем для искусственных водоемов (Московское море, окрестности Рыбинского водохранилища, Вышневолоцкое водохранилище). Из этого следует, что в окрестностях искусственных водоемов возможно нарушение динамики естественного водотока, упрощающего структуру речной системы. Это подтверждает теоретическое положение, что чрезмерное упрощение структуры речной системы ведет к ее деградации за счет техногенного доминирования естественных гидрологических и гидрогеологических процессов. Поэтому последствия чрезмерного зарегулирования природной среды вкупе с ее критическим усложнением одинаково опасны – в обоих случаях среда становится особо чувствительной к проявлению нагрузочных флуктуаций.

2. Для ландшафтной среды, представленной болотами, фрактальная размерность оказалась наиболее низкой, реки в таких местах практически отсутствуют. Подобное состояние характерно для однородной ландшафтной среды с низкой нелинейностью, в которой гидрологические и гидрогеологические изменения выражены слабо или практически отсутствуют – в среде с низкой нелинейностью для всех процессов характерна вялотекущая динамика. Являясь неотъемлемым компонентом природой среды, подобные ландшафты играют значимую роль в структуре других биоценозов.

3. Наблюдается тенденция: чем меньше река (приток), тем выше ее фрактальная размерность. При тождественных результатах для притоков первого порядка младшие притоки имеют большую фрактальную размерность, хотя и незначительную. В целом наблюдаемая неоднородность пространственного распределения фрактальных размерностей для структуры речной сети Тверской области подтверждает начальную гипотезу о ее мультифрактальном характере.

Распределение фрактальных размерностей речной системы, отражающее запас ее устойчивости к изменению абиогенных нагрузок по территории Тверской области, представлено на рисунке 1. Как следует из этого распределения, значение  $D$  для Тверской области колеблется в пределах 1,18...1,51. При этом максимальное значение фрактальной размерности речной системы, равное 1,51, относится к Осташковскому, Пеновскому и Селижаровскому районам, на территории которых статистически зафиксирован максимальный уровень подъема воды. Максимально возможное значение фрактальной размерности среды в этих районах соответствует ее критическому усложнению и, как следствие, проявлению неустойчивости к изменению абиогенных нагрузок. Это подтверждает адекватность разработанной фрактальной модели реальной статистике паводковых наводнений.

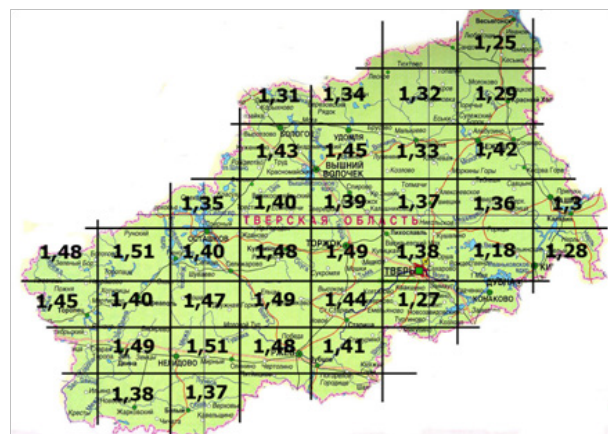


Рис. 1. Распределение фрактальных размерностей по участкам территории Тверской области

На рисунке 2 представлено пространственное распределение относительного коэффициента наводнения Тверской области. Из этого рисунка видно, что уровень подъема воды на разных территориях

может различаться не более чем в 2,8 раза, а возведение защитной дамбы необходимо на тех участках исследуемой территории, где выполняется соотношение  $\theta_i = \max$ , т. е. место возведения защитной дамбы определяется из условия максимальных локальных напряженностей исследуемых речных бассейнов. Цель возведения защитной дамбы – снять эту напряженность. Понижение относительного коэффициента затопления после возведения защитной дамбы рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta\theta = \frac{D_i - 1}{D_p - 1}, \quad (6)$$

где  $D_i$  и  $D_p$  – соответственно фрактальные размерности среды до и после возведения защитной противопаводковой дамбы.

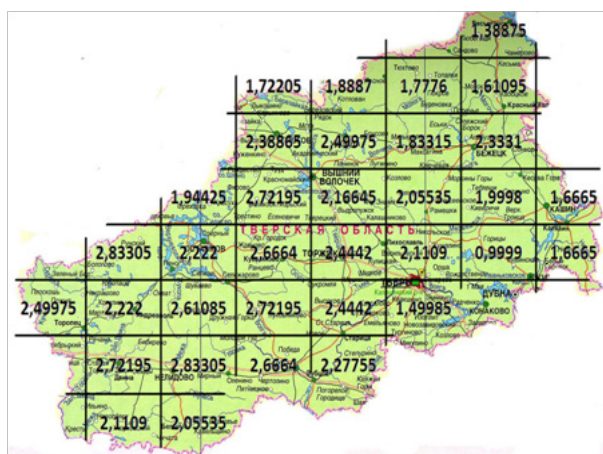


Рис. 2. Распределение относительного коэффициента наводнений  $\theta$  по участкам территории Тверской области

Эффективность природообустройства среды, связанная с понижением ее организационной сложности и более эффективной локализацией абигенных нагрузок в структуре речной системы, рассчитывается по следующей формуле:

$$\varphi = \frac{D_i - D_p}{D_{\min}} \quad (0 \leq \varphi \leq 1). \quad (7)$$

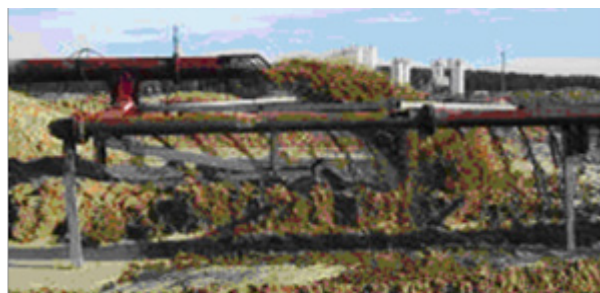
Соответственно для Тверской области с  $D_{\min} = 1,18$  эта величина рассчитывается так:

$$\varphi = 0,847(D_i - D_p). \quad (8)$$

Величина  $\varphi$  показывает, насколько природообустройство среды увеличивает ее однородность или запас устойчивости к возможным флуктуациям абигенных нагрузок. Если  $\varphi = 1$ , то возведение защитной дамбы способствует максимально возможному увеличению запаса устойчивости среды на данной территории.

Для выявленных зон ландшафтных напряжений среды с учетом их территориального размещения целесообразно использовать технологии возведения защитных противопаводковых дамб намывным способом с использованием местных строительных материалов – донных отложений и наносов, извлекаемых из русловой части водотока.

Такая технология, представленная на рисунке 3, включает разработку донных отложений землесосным снарядом и подачу их в виде пульпы по трубопроводам на карты намыва на месте возведения дамбы. Намыв грунта в тело дамб осуществляется при помощи распределительного устройства, расположенного непосредственно на карте намыва. Устройство позволяет отделять мелкие фракции грунта от крупных и направлять их раздельно: мелкие и негабарит – в среднюю часть дамбы, крупные – в боковые призмы (так формируется поперечный профиль возводимой дамбы с противофильтрационным ядром и устойчивыми боковыми призмами). Распределительное устройство для намыва отличается своей мобильностью за счет конструкции опорных элементов, обеспечивающих его самовыглубление при перемещении на новую карту намыва [7].



а

б

Рис. 3. Рабочий этап возведения защитной дамбы с одновременной разработкой донных отложений: а – разработка донных отложений; б – возведение защитной дамбы с использованием распределительного устройства

**Выводы**

Возведение дамбы – это инструмент регуляции структуры речной системы через понижение ее фрактальной размерности. Существенным при этом является то обстоятельство, что намыв дамбы не разрушает сложившейся целостности компонентов среды, а лишь увеличивает ее эластичность за счет создания дополнительных центров устойчивости вмещающей среды. Этому во многом способствует очистка русла от донных отложений в процессе намыва дамбы, что значительно улучшает русловую гидродинамику реки.

1. Министерство по чрезвычайным ситуациям: Официальный сайт. – URL: [www.mchs.gov.ru](http://www.mchs.gov.ru) (дата обращения 5.11.13).

2. Калуж Ю. А., Логинов В. М., Чупикова С. А. Использование технологий ГИС при анализе фрактальных характеристик речной сети Тувы // Геоинформатика. – 2005. – № 4. – С. 31–40.

3. Ignasio Rodrigues, Andrea Rinaldo. Fractal River Basins. Chance and Self-Organization. – Cambridge university press, 2001. – 547 p.

4. Насонов А. Н., Сметанин В. И. Топологическое моделирование природно-техногенных систем // Природообустройство. – 2013. – № 1. – С. 11–16.

5. Тищенко Н. Н., Цветков И. В. Фрактальный анализ речных систем Тверской области. Моделирование сложных систем: сб. науч. трудов. – Тверь: Изд-во

ТьГУ, 1998. – Вып. 1. – С. 134–144.

6. Цветков И. В. Использование фрактальных временных рядов в комплексном анализе речных систем: Моделирование сложных систем: сб. науч. трудов – Тверь: Изд-во ТьГУ, 1998. – Вып. 1. – С. 145–155.

7. Сметанин В. И., Жогин И. М. Методы и средства гидромеханизации в составе мероприятий по защите территорий от наводнений // Природообустройство. – 2013. – № 2. – С. 80–83.

Материал поступил 21.11.13.

**Сметанин Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Организация и технологии строительства объектов природообустройства»  
Тел. 8-926-798-51-97

E-mail: [smetanin2000@yandex.ru](mailto:smetanin2000@yandex.ru)

**Цветков Илья Викторович**, доктор технических наук, доцент кафедры «Экономика и управление производством»  
Тел. 8-910-646-12-30

E-mail: [mancu@mail.ru](mailto:mancu@mail.ru)

**Насонов Андрей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Организация и технологии строительства объектов природообустройства»  
Тел. 8-926-207-09-54

E-mail: [andrenas22@yandex.ru](mailto:andrenas22@yandex.ru)

**Жогин Иван Михайлович**, инженер  
Тел. 8-916-541-42-32

E-mail: [zhogi.nivan@yandex.ru](mailto:zhogi.nivan@yandex.ru)

УДК 502/504.064.2

**О. А. ФЕДОТОВА**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## **АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ БАССЕЙНА ВЕРХНЕЙ ВОЛГИ В УСЛОВИЯХ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА\***

*Приведены результаты анализа и оценки гидрометеорологических характеристик за периоды весеннего половодья и межени по четырем частным водосборам и в целом по бассейну Верхней Волги. Рассмотрена динамика пространственно-временной изменчивости речного стока и определяющих его климатических факторов – атмосферных осадков и температуры воздуха.*

*Бассейн Верхней Волги, климат, речной сток, линейный тренд, ранговый критерий.*

*There are given results of the analysis and assessment of hydrometeorological characteristics for the period of spring floods and low water on four private water catchment basins and in whole on the Upper Volga basin. The dynamics of the spatial-temporal variability of river runoff and its defining climatic factors, such as precipitation and air temperature is considered.*

*The Upper Volga basin, climate, river runoff, linear trend, rank criteria.*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-05-00193а).