

**Н.В. Дорофеев, Р.В. Романов**

(Муромский институт Владимирского государственного университета,  
E-mail: dorofeevvnv@yandex.ru)

## **ПОЛУЧЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ ОЦЕНОК ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКЕ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ДАННЫХ**

*Разработан способ прогнозирования изменений параметров геологической среды на основе комплексной обработки распределённых данных. Материалы статьи могут быть полезны при решении проблем техносферной безопасности.*

*Ключевые слова: геоэкологический мониторинг, геодинамический объект, прогнозирование.*

**N.V. Dorofeev, R.V. Romanov**

## **GETTING THE FORECAST ESTIMATES CHANGES IN THE PARAMETERS OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT IN COMPLEX DISTRIBUTED DATA PROCESSING**

*Developed a method for predicting changes in the parameters of the geological environment on the basis of complex distributed data processing. The material can be helpful in solving the problems of technosphere safety.*

*Key words: geoecological monitoring, geodynamic object, forecasting.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 5 августа 2014 г.

### **Введение**

В процессе расширения техногенной среды происходит освоение и застройка новых территорий. При этом инженерно-технические объекты могут оказываться на территориях с нестабильной геологической структурой. Хотя в настоящее время перед началом строительства, в соответствии с нормативно-правовыми документами, для оценки застраиваемой территории проводят инженерно-изыскательные работы и в случаях необходимости расположения инженерно-технических сооружений на территориях с нестабильной геологической структурой проводят комплекс мер, направленных на защиту возводимых объектов от динамики геологической среды, полностью избавиться от последствий геологических процессов в приповерхностном слое не удастся. Примерами тому служат многочисленные техногенные аварии в Нижегородской, Пермской, Свердловской областях и в районах Гессена (Германия).

Все случаи разрушений административно-хозяйственных объектов и коммуникаций, являющиеся следствием приповерхностных геодинамических процессов, доказывают несовершенство применяемых инженерно-технических средств. Как правило, имеющиеся системы контроля и мониторинга по своей сути фиксируют не начало развития неблагоприятных геодинамических процессов, а начало деструктивных процессов в самом сооружении и не способны

заблаговременно спрогнозировать изменения геологического разреза. Очевидно, что недостатком таких систем является низкая проработанность математических моделей геологической среды и охват далеко не всех факторов, влияющих на изменения геологического слоя.

Таким образом, актуальной является задача разработки систем прогнозирования геодинамических процессов и оценки распределения сил в системах "грунт-строение-грунт" и "строение-грунт-строение" с применением комплексной обработки распределенных (как в пространстве, так и во времени) данных и многофакторного анализа.

Целью проведенной авторами работы является получение прогнозной функции, которая позволила бы оценить изменения геологической среды.

### Предпосылки развития карста

Одной из основных причин изменений геологического разреза для многих стран мира являются процессы карстообразования. В свою очередь, развитие процессов карстообразования обусловлено различными физико-химическими процессами (рис. 1), при этом растворимость хлоридных, сульфатных и карбонатных пород находится в примерном соотношении 10000:100:1 [1].

Как видно из рис. 1, развитие процессов карстообразования зависит от наличия как минимум четырех основных факторов:

- растворимых пород (карбонатные, сульфатные, соляные);
- растворителя (вода);
- подхода растворителя к карстующимся породам;
- отвода растворенной субстанции.

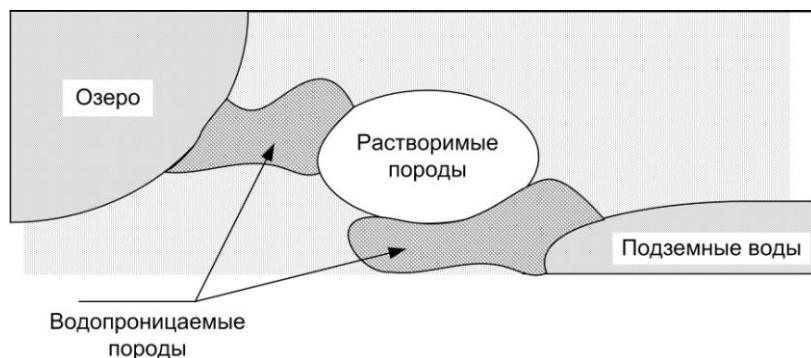
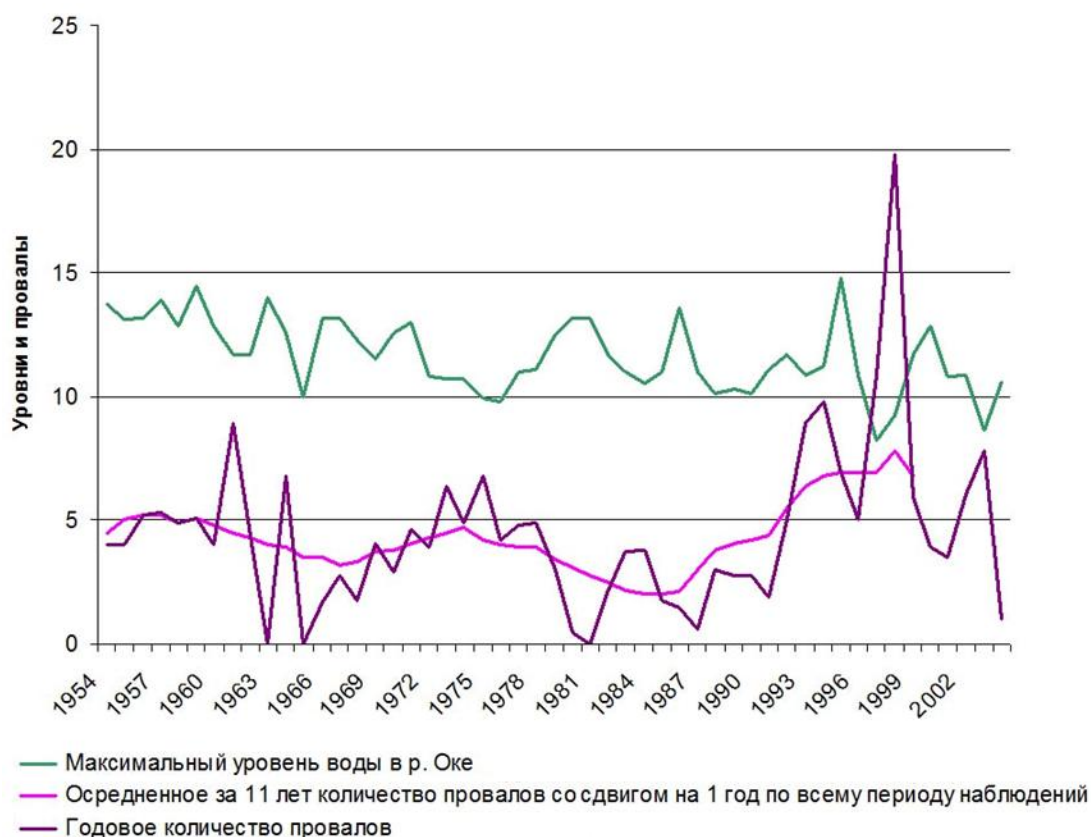


Рис. 1. Процесс карстования (общий вид)

В подтверждение этому на рис. 2 приведены хронологические графики уровня воды в реке Оке и количества образовавшихся провалов.

Обратим внимание, что процесс растворения зависит не только от геологического строения разреза и его расположения вблизи источников воды, но и от климатических условий.



**Рис. 2.** Хронологические графики изменения максимальных уровней воды в р. Оке и образования карстовых провалов

### Прогноз образования карстового провала

Для получения прогнозной функции образования провалов необходимы модель процессов карстообразования и модель обрушения свода пород. Поскольку процессы карстообразования являются недетерминированными, то для их прогнозирования можно использовать статистические методы. Интенсивность провалообразования в данном случае можно определить как [2]:

$$I = \frac{N}{S \cdot Y}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество провалов;

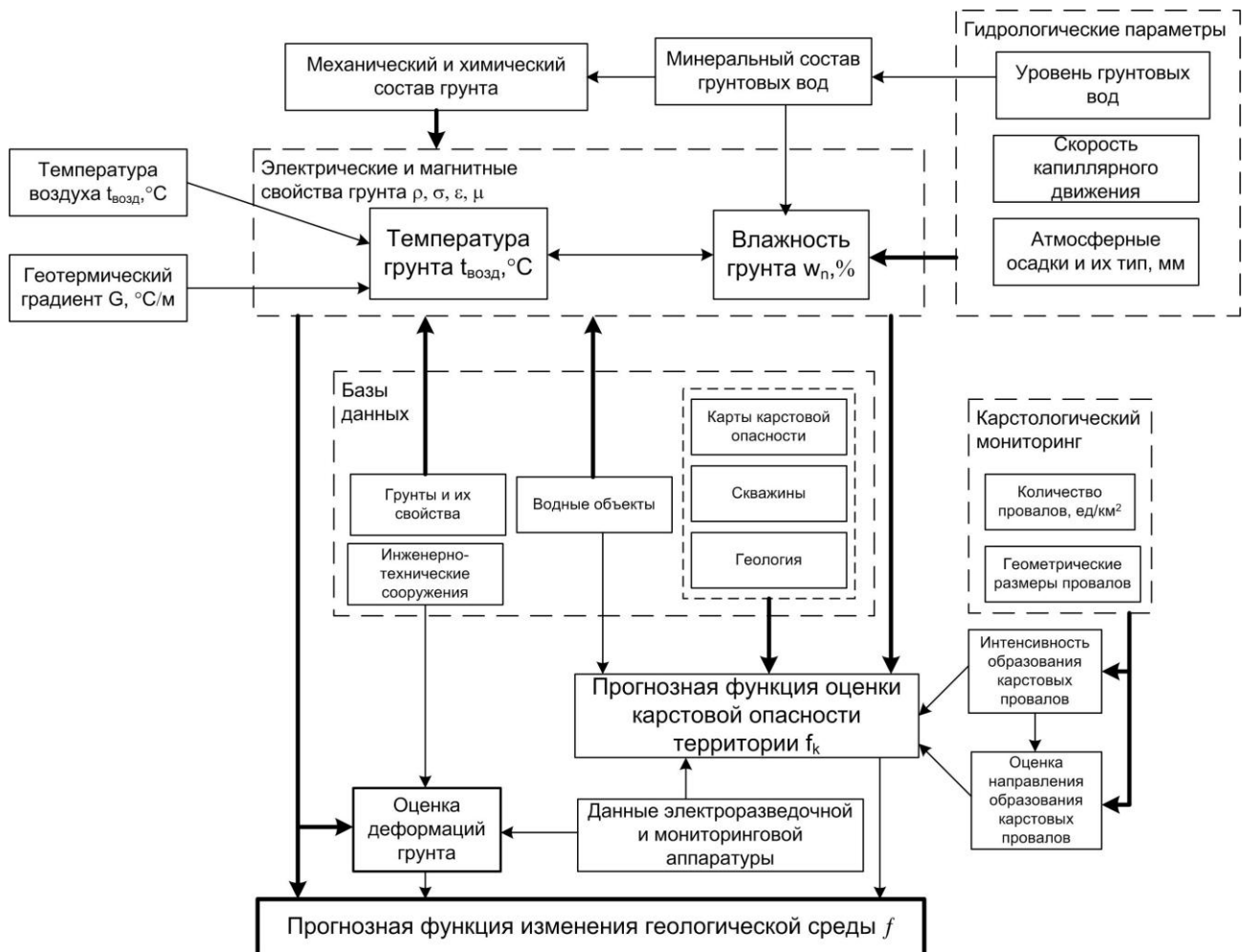
$S$  – площадь на которой определялось количество провалов;

$Y$  – количество лет в течение которых фиксировались провалы.

В работах Фикселя и Стояна [3] предлагается использовать данные не только об интенсивности провалов, но и ориентации провалов и их густоты.

Важную роль в прогнозе образования карстовых провалов играет оценка карстоопасности местности. Данные оценки даются для отнесения конкретной местности к той или иной категории карстоопасности [1] и в дальнейшем играют значительную роль в получении прогнозной оценки изменений геологической среды. Для определения карстоопасности местности имеются карты карстовой опасности, которые составлялись несколько десятков лет назад

и не могут отразить степень карстовой опасности на площади менее  $2 \text{ км}^2$  (на локальных участках) и геодинамику. Для получения прогнозных оценок изменений геологического разреза в автоматизированном режиме и в режиме реального (квазиреального) времени необходимо наблюдать за такими параметрами, как влажность и температура грунта. Кроме того, для получения более детальной модели приповерхностных процессов необходимо использовать дополнительные данные (рис. 3).



**Рис. 3.** Структурная схема информационной обработки распределенных параметров прогнозной функции

Зависимости температуры грунта от его свойств, температуры воздуха, влажности и уровня сезонного оттаивания подробно рассмотрены в трудах И.С. Житомирского и А. Инстанеса [4]. Зависимости электрических и физических свойств грунтов от влажности и образующих её факторов (рассмотрены в пособии к СНиП 2.05.02-85, а также работах [5-8]).

Следует отметить об обратной зависимости температуры грунта от его влажности, при этом значение температуры на глубине  $z$  через время  $t$  можно получить как:

$$X_7^j(z) = X_9^{\max}(x, y) \exp\left(\frac{X_1^i(d) - z}{\alpha}\right) \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \frac{\sqrt{\pi T}(X_1^i(d) - z)}{\sqrt{\alpha}} + X_9^\varphi(x, y)\right), \quad (2)$$

где  $X_9^{\max}(x, y)$  – значение амплитуды колебаний суточной (сезонной, многолетней) температуры в точке с координатами  $x, y$ ;

$T$  – период колебания температуры (суточный, сезонный, многолетний);

$\alpha$  – приведенный коэффициент теплопроводности [9];

$X_9^\varphi(x, y)$  – фазовый момент для суточных (сезонных, многолетних) колебаний, соответствующий температуре в настоящий момент времени;

$X_1^i(d)$  – глубина сезонного оттаивания.

Получаемые по структурной схеме, изображенной на рисунке 3, прогнозные оценки, можно привязать к необходимому порогу срабатывания:

$$f(k) = \sum_i \left( \theta \left( \frac{|f(k-1) - f(i)|}{\Delta_A} - 1 \right) \cdot f(i) \right), \quad (3)$$

где  $f(k)$  – текущая оценка;

$\theta$  – функция Хэвисайда;

$f(k-1)$  – предыдущая оценка;

$f(i)$  –  $i$ -я оценка в диапазоне  $\Delta$  на  $k$ -м шаге;

$\Delta_A$  – порог срабатывания.

Очевидно, что для повышения достоверности прогнозных оценок необходимо учитывать изменения параметров геологического разреза и влияющих на него факторов не только в локальной точке, но и на большой площади.

### Комплексная обработка распределенных данных

Поскольку разместить в каждом месте мониторинговые системы достаточно проблематично и экономически нецелесообразно, то необходимо использовать методы компьютерного и математического моделирования геологических сред, статистические методы анализа и обработки. При этом предлагается во время обработки разнородных пространственных данных акцентировать внимание на аномальных отклонениях параметров геологической среды (плавных и частых изменениях прогнозирующей функции в локальной точке). В этом случае для каждой области геологической среды (размер области определяется в зависимости от требуемой точности обнаружения приповерхностных неоднородностей) создается матрица  $M \times N \times L$ , где  $M$  – долгота,  $N$  – широта,  $L$  – глубина. Поскольку на изменение геологической среды влияет множество параметров, то следует вводить поправочные коэффициенты, которые учитывают внешние дестабилизирующие факторы [10].

Для локации приповерхностных неоднородностей в исходной трехмерной матрице  $A\{N; M; L\}$  проводится линейная и нелинейная обработка с целью выделения резких перепадов в трехмерной картине распределения прогнозных оценок изменений геологической среды. В результате получается трехмерная матрица  $A'\{N; M; L\}$ , значение элементов которой отлично от нуля только в областях резких изменений. После этого проводится пороговая обработка для выделения границ объекта.

В качестве предварительной обработки для подобного класса задач предлагается применить метод выделения перепадов с согласованием, который, в отличие от подобных методов выделения перепадов скользящим окном, имеет высокую помехоустойчивость. Суть метода заключается в том, что перед применением дифференциального оператора следует согласовать со значениями в рассматриваемом окне некоторую поверхность первого или второго порядка. Очевидно, что для локации приповерхностных неоднородностей, свободно располагающихся в рассматриваемом пространстве, можно воспользоваться вычислением модуля градиента распределения фаз в матрице  $A$ :

$$|\nabla A\{x_1, x_2, x_3\}| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}, \quad (4)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – координаты обрабатываемого элемента матрицы  $A$ ;

$a, b, c$  – дискретные разности элементов матрицы, вычисляемые по выражениям (5-7).

$$a = A\{x_1, x_2, x_3\} - A\{x_1 - 1, x_2, x_3\}; \quad (5)$$

$$b = A\{x_1, x_2, x_3\} - A\{x_1, x_2 - 1, x_3\}; \quad (6)$$

$$c = A\{x_1, x_2, x_3\} - A\{x_1, x_2, x_3 - 1\}. \quad (7)$$

Для снижения вероятности ложного обнаружения приповерхностных неоднородностей необходимо проводить дополнительную обработку выявленных аномалий в геологической среде. Например, можно проводить поиск формы обнаруженной аномалии в базе геоэлектрических моделей, тогда в структуру, приведённую на рис. 3 следует ввести базу данных аномальных сигналов. Пополняя такую базу данных шаблонами аномальных сигналов, впоследствии можно ускорить процесс поиска и отбора участков геологической среды с развивающимися процессами карстообразования.

### Заключение

Разработан способ получения прогнозных оценок изменений геологического разреза при комплексной обработке распределенных данных. Обосновывается необходимость применения комплексной обработки распределенных данных при мониторинге и прогнозировании приповерхностных процессов карстообразования. Приведенная в статье структурная схема информационной обработки распределенных параметров прогнозной функции учитывает воздействие на результаты прогноза температурной и гидрологической помех, а также данные о категории карстоопасности, нагрузки на грунт и оперативные данные от электроразведочных комплексов.

Приведённые в статье положения могут быть использованы для построения региональных систем геодинамического контроля, построенных на базе распределённых мониторинговых систем с привязкой к гидрологическим, метеорологическим и административно-хозяйственным данным. Развитие подобного рода систем, позволит заблаговременно выявлять геодинамику и предупреждать аварийные ситуации.

*Работа выполнена при поддержке  
Гранта РФФИ "14-08-31570-мол\_а"*

### Литература

1. **Aderhold G.** Klassifikation von erdfallen und senkungsmulden in karstgefährdeten gebieten hessens. Empfehlungen zur Abschätzung des geotechnischen Risikos bei Baumassnahmen // HLUG – Hessesches Landesamt für Umwelt und Geologie. Geologische Abhandlungen Hessen, Band 115. Wiesbaden 2015.
2. **Reuter F., Tolmacev V.** Bauen und Bergbau in Senkungs – und Senkungsgebieten // Eine Ingenieurgeologie des Karstes: 176 S., Berlin, 1990.
3. **Fiksel T., Stoyan D.** Mathematisch-statistische Bestimmung von Gefährdungsgebieten bei Erdfallprozessen // Z.f. angew. Geologie, 1983, 9: 455-459.
4. **Instanes A.** // Arctic Climate Impact Assessment – Scientific Report, 2006, chapter 16.
5. **Орехов А.А., Дорофеев Н.В.** Алгоритм коррекции влияния гидрологической помехи на контроль геодинамических объектов // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. № 22. 2012. С. 74-78.
6. **Орехов А.А., Дорофеев Н.В.** Геоэлектрическое моделирование приповерхностных геодинамических объектов с учётом воздействия эндогенных факторов // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. Вып. 1 (26). 2014. С. 32-40.
7. **Орехов А.А., Дорофеев Н.В.** Информационно-измерительная система для проведения геоэлектрического контроля геодинамических объектов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. № 2. 2012. С. 60-62.
8. **Орехов А.А., Дорофеев Н.В.** Геоэлектрическое моделирование подземных водных объектов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2012. № 4. С. 16-19.
9. **Кузичкин О.Р.** Алгоритм формирования прогнозных геодинамических оценок при геоэлектрическом мониторинге суффозионных процессов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. № 5. С. 50-53.
10. **Кузичкин О.Р., Дорофеев Н.В.** Анализ алгоритмических ошибок и погрешностей при регрессионной обработке геомагнитных измерений // Метрология. № 11. 2007. С. 50-56.