

3. Эйрих А.К. Разработка метода оценки загрязненности рек тяжёлыми металлами для системы экологического мониторинга: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2003. – 20 с.
4. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. – 2003. – № 2. – С. 108–119.
5. Грива Г.И. Геоэкологические условия разработки газовых месторождений Ямала. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2005. – 352 с.
6. Савичев О.Г., Лыготин В.А. Пространственные изменения химического состава донных отложений рек Томской области // География и природные ресурсы. – 2008. – № 3. – С. 46–51.
7. Московченко Д.В. Геохимия ландшафтов севера Западно-Сибирской равнины: структурно-функциональная организация вещества геосистем и проблемы экодиагностики: автореф. дис. ... д-ра географ. наук. – Санкт-Петербург, 2010. – 33 с.
8. Нечаева Е.Г. Ландшафтно-геохимическое районирование Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. – 1990. – № 4. – С. 77–82.
9. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 376 с.
10. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Новосибирск, 2004. – 32 с.
11. Экогеохимия Западной Сибири. Тяжёлые металлы и радионуклиды / под ред. Г.В. Полякова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН; НИЦ ОИГГиМ, 1996. – 248 с.
12. Савичев О.Г., Копылова Ю.Г., Хвощевская А.А. Эколого-геохимическое состояние окружающей среды в Северном Приангарье (Восточная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 129–136.
13. Savichev O.G., Kolesnichenko L.G., Saifulina E.V. The ecologo-geochemical state of water bodies in the Taz-Yenisei interflaves // Geography and Nature Resources. – V. 32. – № 4. – P. 333–336, DOI: 10.1134/S1875372811040056.
14. Национальный атлас России: в 4-х т. Т. 1. Общая характеристика территории. – М.: Роскартография, 2005. – 170 с. URL: www.national-atlas.ru (дата обращения: 30.11.2007).
15. Организация и проведение наблюдений за содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях. РД 52.24.609–99. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 33 с.
16. Проведение расчётов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков. РД 52.24.622–2001. – М.: Росгидромет, 2001. – 68 с.
17. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. – М.: Высшая школа, 1975. – 342 с.
18. Веницианов Е.В. Физико-химические процессы в поверхностных водах // Водные проблемы на рубеже веков / отв. ред. М.Г. Хубларян. – М.: Наука, 1999. – С. 241–255.
19. Ramesh R., Ramanathan Al., Ramesh S., Purvaja R., Subramanian V. Distribution of rare earth elements and heavy metals in the surficial sediments of the Himalayan river system // Geochemical Journal. – 2000. – V. 34. – P. 295–319.

Поступила 24.04.2013 г.

УДК 624.131

## ПРОГНОЗ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ГОРОДЕ ХАНОЙ (ВЬЕТНАМ)

Х.Т. Фи, Л.А. Строкова

Томский политехнический университет

E-mail: geyer@tpu.ru

*Многофакторный корреляционный анализ используется впервые для прогноза оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод. Разработан алгоритм для построения функций среднегодовой скорости деформации земной поверхности ( $V_s$ ) и деформации земной поверхности во времени ( $S_t$ ) в результате извлечения подземных вод в микрорайонах Фапван, Льюнгиен и Тханьконг города Ханой. Сравнение с фактическими данными мониторинга указывает, что прогнозируемые значения осадки относительно близки к наблюдаемым результатам.*

### **Ключевые слова:**

*Оседание земной поверхности, извлечение подземных вод, многофакторный корреляционный анализ, средняя скорость деформации, деформация во времени.*

### **Key words:**

*Land subsidence, groundwater extraction, multivariate correlation analysis, average surface settlement rate, time-dependent settlement.*

Город Ханой является одним из крупнейших мегаполисов азиатского региона с развитой промышленностью, инфраструктурой, высокой плотностью населения.

Большая часть территории Ханоя находится на равнине Бакбо, которая имеет наклон с северо-запада на юго-восток (по течению Красной реки). На севере средние отметки поверхности составляют 8...12 м над уровнем моря, в центре – 5...7 м, на

юго-востоке – 3...4 м [1]. Невысокие горы охватывают  $\frac{1}{4}$  территории города.

Река Красная является самой большой рекой, протекающей по Ханю на расстоянии 163 км. Кроме Красной реки на территории города текут и другие реки: Дай, Дуонг, Кало, Толик, Кимнгу, Ньюе. В Ханое также расположено много озёр: Западное (500 га), Тханьчи, Баймау, Хоанкьём, Чукбак, Тхуле и т. д.

Ханой расположен в области субэкваториального муссонного климата. Тропический климат характеризуется делением года на два сезона – летний дождливый период муссонов с мая по ноябрь, и зимний сухой период с ноября по март.

В разрезе четвертичных отложений выделяют пять свит, различающихся по возрасту и генезису (снизу вверх):

- раннеплейстоценовые аллювиальные отложения (свита Лэчи) представлены гальками, гравием, с включением линз песков, супесей или суглинков. Мощность 25...30 м;
- средне-, позднеплейстоценовые аллювиальные и аллювиально-пролювиальные (свита Ханой) отложения сложены гальками, гравием и песками, местами суглинками и супесями, развитыми в верхней части разреза. Мощность 10...34 м;
- позднеплейстоценовые аллювиальные, озерные и озерно-болотные отложения (свита Виньфук) имеют определенные закономерности перехода от песков в нижней части разреза к суглинкам и глинам в верхней, местами прослеживаются суглинки с органическими остатками. Мощность 10...45 м;
- ранне- и среднеголоценовые озерно-болотные, морские и болотные отложения (свита Хайхынг) относятся к специфическим слабым водоносным грунтам в Ханое и представлены суглинками и глинами с органическими остатками в основании разреза, постепенно сменяющимися морскими глинами синего цвета. Мощность 0,5...15 м;
- позднеголоценовые аллювиальные и аллювиально-озерно-болотные отложения (свита Тхайбинь) имеют широкое распространение и характеризуются постепенным переходом от песков к супесям и суглинкам, местами с включениями органических остатков. Мощность 20...35 м.

В тектоническом отношении большая часть территории г. Ханой расположена в рифтовой зоне реки Красной. В этой зоне имеются активные разломы, перемещения отдельных крупных тектонических блоков составляют до 8 мм в год. Только в XX в. зафиксировано 144 землетрясения, в том числе два сильных землетрясения около 7–8 баллов.

Характерной особенностью геологического строения территории Ханоя является наличие в разрезе мощной толщи слабых грунтов и интенсивное проявление опасных инженерно-геологических процессов природного и техногенного характера.

Одним из наиболее опасных природно-техногенных процессов на территории г. Ханой является оседание поверхности, вызванное интенсивными откачками подземных вод для водоснабжения и сопровождающееся деформациями зданий и сооружений.

В пределах Ханоя зафиксировано наличие двух поэтажно расположенных водоносных комплексов [2].

Повсеместное распространение в городе имеет *плейстоценовый слабонапорный водоносный комплекс* (qr), водовмещающими породами которого являются крупнообломочные образования (галька и гравий) и пески свит Ханой и Виньфук, которые рассматриваются и как важный несущий слой для свайных фундаментов в Ханое.

В верхней части разреза современных аллювиальных отложений, представленных водоносными песками, местами с гравием, прослеживается *голоценовый водоносный комплекс* (qh). На некоторых участках города грунтовые воды загрязнены хозяйственно-бытовыми стоками.

По данным гидрогеологической службы г. Ханоя [3], в городе действуют три основные формы водозабора подземных вод: общественные, промышленных предприятий и частные.

В г. Ханое действуют 19 крупных и 11 мелких общественных предприятий (станций водоснабжения), занимающихся обеспечением населения водой. Они в общей сложности имеют 290 скважин, пробуренных на плейстоценовый водоносный горизонт, со средней мощностью 680 тыс. м<sup>3</sup>/сутки (по данным 2010 г.). Для водоснабжения промышленных предприятий в общей сложности действует 1100 скважин. Они также пробурены на плейстоценовый водоносный горизонт, на глубину от 32 до 85 м, при средней производительности 309 тыс. м<sup>3</sup>/сут (по данным 2010 г.). Частных водозаборных скважин насчитывается около 790 тыс. Их глубина небольшая, они используют голоценовый водоносный комплекс или верхнюю часть плейстоценового и имеют общую производительность 778 тыс. м<sup>3</sup>/сут. (по данным 2010 г.). Общая добыча подземных вод в 2010 г. составила 1767 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Большая часть воды забирается из плейстоценового водоносного комплекса (qr).

Мониторинг оседания поверхности и снижения уровня грунтовых вод проводится Ханойским институтом технологий строительства (НІВТ) на 10 наземных станциях.

Оценка и прогноз оседания поверхности имеет большое значение в предупреждении и уменьшении его вреда в отношении гражданских и промышленных сооружений. Исследование оседания поверхности различными методами выполняли многие авторы: Л.Ч. Тханг, Н.Б. Ке, Ф.Х. Жао, Ч.М. Тху и др., но результаты прогноза и мониторинга значительно отличаются друг от друга.

Прогноз оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод представляется сложной геотехнической задачей, зависящей от различных факторов, таких как снижение уровня подземных вод; состав, мощность и физико-механические свойства грунтов; нагрузки от зданий, сооружений и насыпных грунтов; разложение органических соединений в породах; тектонические движения и др.

Для решения подобных задач наиболее эффективным методом является комбинация факторного и корреляционного анализа, а именно многофак-

торный корреляционный анализ. Данный метод представляет собой методику исследования факторов (параметров системы или их совокупностей), связь которых с результивным показателем в отличие от функциональной является неполной, вероятностной (корреляционной). Если при функциональной (полной) зависимости с изменением аргумента всегда происходит соответствующее изменение функции, то при корреляционной связи изменение аргумента может дать несколько значений прироста функции в зависимости от сочетания других факторов, определяющих данный показатель. Данные особенности этого метода позволяют решить поставленную задачу.

Решение задачи многофакторного корреляционного анализа проводится на ПЭВМ по типовым программам. Сначала формируется матрица исходных данных, в первой колонке которой записывается порядковый номер наблюдения, во второй – результивный показатель ( $Y$ ), а в следующих – факторные показатели ( $X_i$ ). Эти сведения вводятся в ПЭВМ, и рассчитываются матрицы парных и частных коэффициентов корреляции, уравнение множественной регрессии, а также показатели, с помощью которых оцениваются надежность коэффициентов корреляции и уравнения связи: критерий Стьюдента, критерий Фишера, средняя ошибка аппроксимации, множественные коэффициенты корреляции и детерминации. Изучая матрицы парных и частных коэффициентов корреляции, делается вывод о тесноте связи между изучаемыми явлениями [4]. Метод позволяет количественно оценить внос каждого фактора в величину осадки поверхности в результате извлечения подземных вод, представляя тем самым более надежные результаты прогноза.

Определение интегрированного показателя геотехнических факторов (целевая функция) основывается на анализе и синтезе геотехнических факторов, влияющих на осадку поверхности по данным наблюдений; моделировании связи между факторными и результивными показателями, т. е. подборе соответствующего уравнения, которое наилучшим образом описывает изучаемые зависимости; оценке надежности показателей связи и правомерности его использования для практической цели.

В качестве целевой функции для прогноза оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод может быть выбрана величина деформации земной поверхности во времени ( $S_t$ ) или среднегодовая скорость деформации земной поверхности ( $V_s$ ). Целевая функция  $Y(S_t$  или  $V_s)$  является функцией геотехнических факторов ( $X_i$ ):

$$Y(S_t \text{ или } V_s) = f(X_1, X_2, \dots, X_n).$$

Геотехническими факторами ( $X_i$ ) могут быть: уровень или скорость снижения подземных вод; характеристики грунтов (литологический состав, мощность и физико-механические свойства грунтов) и время  $t$ . Все эти факторы связаны с процессом оседания земной поверхности и между собой.

По фактическим данным мониторинга записывается уравнение множественной регрессии между  $S_t$  или  $V_s$  с геотехническими факторами и между самими геотехническими факторами. Затем определяется вес  $g_i$  каждого геотехнического фактора в целевой функции  $S_t$  или  $V_s$ . Таким образом, деформация земной поверхности по времени  $S_t$  или скорость деформации земной поверхности  $V_s$  на любом месте в исследуемом регионе определяются как

$$Y = \sum_{i=1}^p g_i R_i^H,$$

где  $Y$  – интегрированный показатель геотехнических факторов или целевая функция, может быть  $S_t$  или  $V_s$ ;  $g_i$  – вес геотехнического фактора  $i$ ;  $R_i^H$  – количественный параметр стандартизованного геотехнического фактора  $i$ .

Определение веса геотехнических факторов  $g_i$  осуществляется следующим образом:

- сбор и статистическая оценка фактических данных мониторинга, связанных с геотехническими факторами и целевой функцией;
- моделирование связи между факторными и результивными показателями, т. е. подбор соответствующего уравнения, которое наилучшим образом описывает изучаемые зависимости;
- вычисление парного коэффициента корреляции ( $r_{ij}, r_{ji}$ ) между геотехническим фактором и целевой функцией и между геотехническими факторами;
- вычисление стандартизованных коэффициентов ( $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ );
- вычисление многомерного коэффициента корреляции  $R$

$$R^2 = \sum_{i=1}^p \beta_i r_{iy}. \quad (1)$$

Многомерный коэффициент корреляции  $R$  позволяет оценить, являются ли значимыми геотехнические факторы в целевой функции. Если  $R \geq 0,75$ , то выбранные геотехнические факторы являются значимыми и адекватными. Если  $R < 0,75$ , то отсутствуют некоторые важные геотехнические факторы и необходимо пересмотреть геотехнические факторы в целевой функции.

- вычисление веса геотехнических факторов  $g_i$ .
- Вес геотехнических факторов  $g_i$  в целевой функции определяется по формуле (2)

$$g_i = \frac{|\beta_i r_{iy}|}{\sum_{i=1}^p |\beta_i r_{iy}|}. \quad (2)$$

В том числе  $\sum_{i=1}^n g_i = 1$  (общий вес геотехнических факторов равен 1).

Метод многофакторного корреляционного анализа применялся по данным станций мониторинга за осадками поверхности «Фапван», «Льонгиен» и «Тханьконг». Местонахождение и внешний вид станций мониторинга показаны на рис. 1–3.

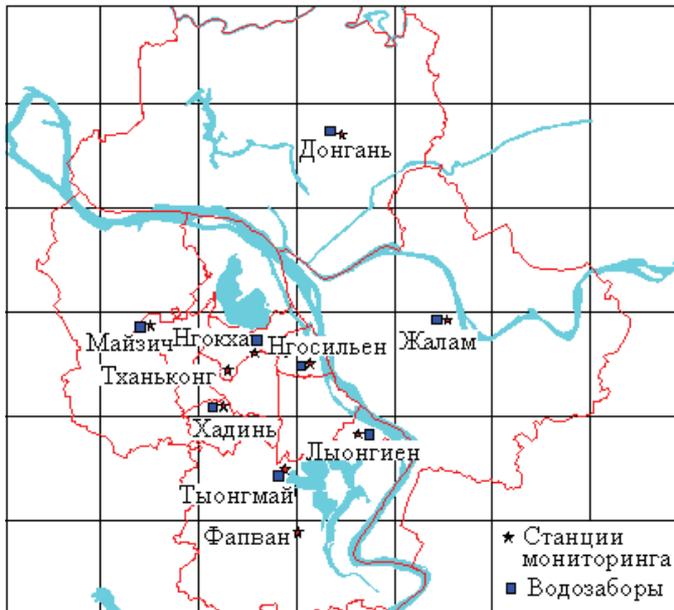


Рис. 1. Местонахождение станций мониторинга за осадками поверхности «Фапван», «Лыонгиен» и «Тханьконг» на карте Старого Ханоя [2]



Рис. 2. Станция Фапван



Рис. 3. Станция Лыонгиен

В геологическом разрезе на станциях мониторинга за осадками поверхности «Фапван», «Лыонгиен» и «Тханьконг» присутствует один слой слабого грунта, представленный глинами и суглинками свиты Хайхынг, перекрываемый глинами и суглинками свиты Тхайбинь, а подстилаемый глинами и суглинками свиты Виньфук.

Исходными данными для построения функций  $V_s$  и  $S_t$  являются:

- Слои грунта: мощность слоя слабого грунта, коэффициент средней относительной сжимаемости и плотность природного грунта.

- Данные мониторинга: глубина подземных вод, среднегодовая скорость деформации земной поверхности, деформация земной поверхности во времени.

Исходные данные для построения функций представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Исходные факторы для  $V_s$  [3, 5, 6]

| Станция мониторинга за осадками поверхности | Год    | Глубина подземных вод $H$ (м) | Средняя скорость деформации $V_s$ (мм/год) | Коэффициент средней относительной сжимаемости $m_m$ (см <sup>2</sup> /кг) | Мощность слоя слабого грунта $B_{\text{д}}$ (м) | Плотность природного грунта $\rho$ (г/см <sup>3</sup> ) |
|---|--------|-------------------------------|--|---|---|---|
| Фапван                                      | 1996   | 17,957                        | 28,952                                     | 0,034   | 26,0  | 1,59  |
|   | 1997   | 18,010                        | 21,198                                     | 0,034   | 26,0  | 1,59  |
|   | 1998   | 20,205                        | 23,070                                     | 0,034   | 26,0  | 1,59  |
|   | 1999   | 20,005                        | 19,908                                     | 0,034   | 26,0  | 1,59  |
|   | 2000   | 20,947                        | 19,245                                     | 0,034   | 26,0  | 1,59  |
|   | 2001   | 19,232                        | 15,019                                     | 0,034   | 26,0  | 1,59  |
|   | 2002   | 20,997                        | 18,283                                     | 0,034   | 26,0  | 1,59  |
| Лыонгиен                                    | 2000   | 19,123                        | 26,785                                     | 0,035   | 14,0  | 1,62  |
|   | 2001   | 18,893                        | 13,257                                     | 0,035   | 14,0  | 1,62  |
|   | 2002   | 19,203                        | 11,055                                     | 0,035   | 14,0  | 1,62  |
|   | 2003   | 20,593                        | 14,300                                     | 0,035   | 14,0  | 1,62  |
| Тханьконг                                   | 1997   | 14,300                        | 35,790                                     | 0,035   | 16,0  | 1,67  |
|   | 1998   | 15,370                        | 37,057                                     | 0,035   | 16,0  | 1,67  |
|   | 1999   | 15,615                        | 39,458                                     | 0,035   | 16,0  | 1,67  |
|   | 2000   | 16,583                        | 43,168                                     | 0,035   | 16,0  | 1,67  |
|   | 2001   | 16,637                        | 38,824                                     | 0,035   | 16,0  | 1,67  |
|   | 2002   | 17,650                        | 35,163                                     | 0,035   | 16,0  | 1,67  |
| 2003  | 18,713 | 32,810                        | 0,035                                      | 16,0  | 1,67  |   |

**Таблица 2.** Исходные факторы для  $S_t$  [3, 5, 6]

| Станция мониторинга за осадками поверхности | Время $t$ (месяц) | Глубина подземных вод $H$ (м) | Деформация земной поверхности по времени $S_t$ (мм) | Коэффициент средней относительной сжимаемости $m_{vm}$ (см <sup>2</sup> /кг) | Мощность слоя слабого грунта $B_{dy}$ (м) | Плотность природного грунта $\rho$ (г/см <sup>3</sup> ) |
|---|-------------------|-------------------------------|---|--|---|---|
| Фапван                                      | 0                 | 18,240                        | 13,810  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 4                 | 17,355                        | 20,058  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 8                 | 15,720                        | 24,507  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 12                | 17,957                        | 28,952  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 16                | 17,830                        | 38,053  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 20                | 16,290                        | 42,287  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 24                | 18,010                        | 50,150  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 28                | 18,015                        | 58,022  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 32                | 18,470                        | 63,072  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 36                | 20,205                        | 73,220  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 40                | 20,727                        | 81,427  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 44                | 18,540                        | 85,952  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 48                | 20,005                        | 93,128  | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 52                | 20,133                        | 100,453   | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 56                | 19,453                        | 105,295   | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 60                | 20,947                        | 112,373   | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 64                | 20,987                        | 119,008   | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 68                | 19,133                        | 121,472   | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | 72                | 19,323                        | 127,392   | 0,034  | 26,0                                      | 1,59  |
|   | Льонгиен          | 0                             | 18,633  | 11,792   | 0,035                                     | 14,0  |
| 4   |                   | 18,243                        | 16,818  | 0,035  | 14,0                                      | 1,62  |
| 8   |                   | 15,487                        | 18,863  | 0,035  | 14,0                                      | 1,62  |
| 12  |                   | 19,123                        | 26,785  | 0,035  | 14,0                                      | 1,62  |
| 16  |                   | 19,303                        | 33,585  | 0,035  | 14,0                                      | 1,62  |
| 20  |                   | 15,363                        | 33,177  | 0,035  | 14,0                                      | 1,62  |
| 24  |                   | 18,893                        | 40,042  | 0,035  | 14,0                                      | 1,62  |
| 28  |                   | 19,333                        | 45,785  | 0,035  | 14,0                                      | 1,62  |
| 32  |                   | 14,750                        | 45,440  | 0,035  | 14,0                                      | 1,62  |
| 36  |                   | 19,203                        | 51,097  | 0,035  | 14,0                                      | 1,62  |
| 40  |                   | 20,093                        | 56,385  | 0,035  | 14,0                                      | 1,62  |
| 44  |                   | 17,700                        | 58,615  | 0,035  | 14,0                                      | 1,62  |
| Тханьконг                                   | 0                 | 14,277                        | 2,853   | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 4                 | 14,643                        | 12,438  | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 8                 | 13,920                        | 24,438  | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 12                | 14,300                        | 35,790  | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 16                | 14,905                        | 46,595  | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 20                | 14,495                        | 59,100  | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 24                | 15,370                        | 72,847  | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 28                | 15,907                        | 86,150  | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 32                | 15,500                        | 99,930  | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 36                | 15,615                        | 112,305   | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 40                | 16,247                        | 126,380   | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 44                | 16,120                        | 141,590   | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 48                | 16,583                        | 155,473   | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 52                | 17,027                        | 169,987   | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 56                | 16,257                        | 183,000   | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 60                | 16,637                        | 194,297   | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 64                | 17,173                        | 207,552   | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 68                | 16,800                        | 218,000   | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 72                | 17,650                        | 229,460   | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
|   | 76                | 18,083                        | 243,953   | 0,035  | 16,0                                      | 1,67  |
| 80  | 18,313            | 258,857                       | 0,035   | 16,0   | 1,67                                      |   |
| 84  | 18,713            | 262,270                       | 0,035   | 16,0   | 1,67                                      |   |

**Построение целевой функции  $S_t$**

Из данных, представленных в табл. 1 и 2, целевая функция  $S_t$  построена по следующей схеме:

- а. Выбор геотехнических факторов: время  $t$ , глубина подземных вод  $H$ , коэффициент средней относительной сжимаемости  $m_{vm}$ , мощность слоя слабого грунта  $B_{dy}$  и плотность природного грунта  $\rho$  в целевой функции  $S_t$ . Коэффициенты парной корреляции между целевой функцией и параметрами, а также между факторами, представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Коэффициенты парной корреляции между  $S_t$ ,  $t$ ,  $H$ ,  $m_{vm}$ ,  $B_{dy}$  и  $\rho$  установленные по данным наблюдений на станциях Фапван, Льонгиен и Тханьконг

|          | $S_t$ | $t$    | $H$    | $m_{vm}$ | $B_{dy}$ | $\rho$ |
|----------|-------|--------|--------|----------|----------|--------|
| $S_t$    | 1,000 | 0,862  | 0,232  | 0,062    | 0,009    | 0,321  |
| $t$      | 0,862 | 1,000  | 0,545  | -0,235   | 0,266    | -0,071 |
| $H$      | 0,232 | 0,545  | 1,000  | -0,556   | 0,499    | -0,667 |
| $m_{vm}$ | 0,062 | -0,235 | -0,556 | 1,000    | -0,990   | 0,854  |
| $B_{dy}$ | 0,009 | 0,266  | 0,499  | -0,990   | 1,000    | -0,774 |
| $\rho$   | 0,321 | -0,071 | -0,667 | 0,854    | -0,774   | 1,000  |

- а. Стандартизованные коэффициенты  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  являются корнями системы уравнений 3:

$$\begin{cases} 0,862 = \beta_1 + 0,545\beta_2 - 0,235\beta_3 + 0,266\beta_4 - 0,071\beta_5 \\ 0,232 = 0,545\beta_1 + \beta_2 - 0,556\beta_3 + 0,499\beta_4 - 0,667\beta_5 \\ 0,062 = -0,235\beta_1 - 0,556\beta_2 + \beta_3 - 0,990\beta_4 + 0,854\beta_5 \\ 0,009 = 0,266\beta_1 + 0,499\beta_2 - 0,990\beta_3 + \beta_4 - 0,774\beta_5 \\ 0,321 = -0,071\beta_1 - 0,667\beta_2 + 0,854\beta_3 - 0,774\beta_4 + \beta_5 \end{cases} \quad (3)$$

Решив систему уравнений (3), получаем:  $\beta_1=0,787$ ;  $\beta_2=0,106$ ;  $\beta_3=-0,013$ ;  $\beta_4=0,221$ ;  $\beta_5=0,629$ .

- б. Многомерный коэффициент корреляции  $R$  определяется по формуле (1), с результатом  $R=0,952$ . Значение  $R=0,952$  свидетельствует о том, что геотехнические параметры, выбранные для участия в целевой функции, являются значимыми и адекватными.

- с. Вес параметров времени  $t$ , глубины подземных вод  $H$ , коэффициента средней относительной сжимаемости  $m_{vm}$ , мощности слоя слабого грунта  $B_{dy}$  и плотность природного грунта  $\rho$  в целевой функции, обозначенные соответственно  $g_1, g_2, g_3, g_4, g_5$  и определяемые по формуле (2), равны:  $g_1=0,748$ ;  $g_2=0,027$ ;  $g_3=0,001$ ;  $g_4=0,002$ ;  $g_5=0,222$ .

Таким образом, целевая функция  $S_t$  имеет вид  $S_t=0,748t+0,027H+0,001m_{vm}+0,002B_{dy}+0,222\rho$  (4)

Деформация земной поверхности за время  $S_t$  на станциях Фапван, Льонгиен и Тханьконг рассчитывается по формуле (4) и сравнивается с результатами мониторинга (рис. 4).

Прогнозируемые деформации земной поверхности за время  $S_t$  на станциях Фапван, Льонгиен и Тханьконг в 1,1–1,2 раза выше действительных наблюдаемых деформаций земной поверхности.

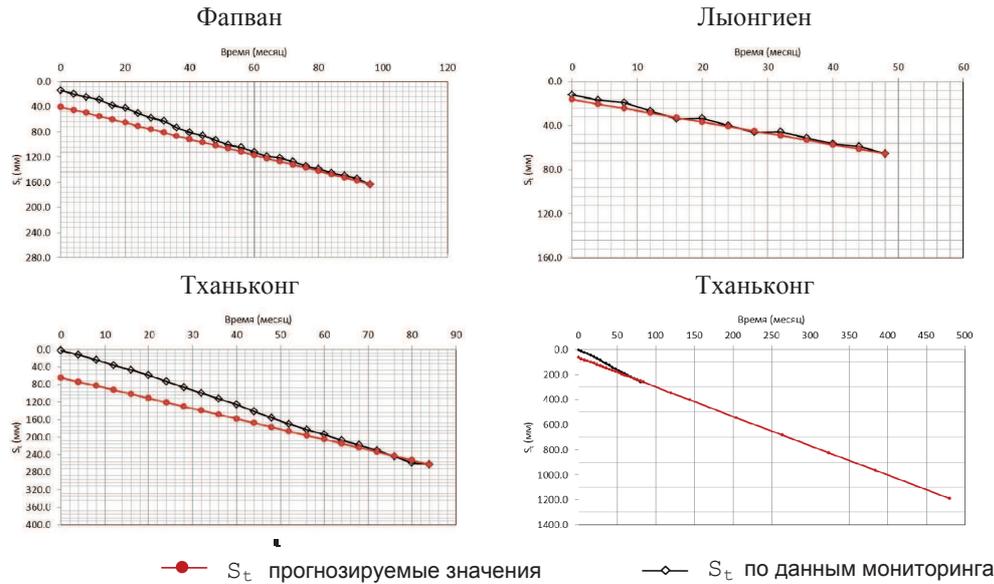


Рис. 4. Деформация земной поверхности во времени в связи с водоотбором подземных вод  $S_t$  на станциях Фапван, Лыонгиен и Тханьконг

**Построение целевой функции  $V_s$**

Из данных, представленных в табл. 1 и 2, целевая функция  $V_s$  построена в следующей последовательности:

- а. Выбор геотехнических факторов: глубина подземных вод  $H$ , коэффициент средней относительной сжимаемости  $m_{vm}$ , мощность слоя слабого грунта  $B_{dy}$  и плотность природного грунта  $\rho$  в целевой функции  $V_s$ . Парный коэффициент корреляции между целевой функцией и параметрами в функции, а также парный коэффициент корреляции между параметрами представлены в табл. 4.

Таблица 4. Коэффициенты парной корреляции между  $V_s$ ,  $H$ ,  $m_{vm}$ ,  $B_{dy}$  и  $\rho$  определяется по данным мониторинга на станциях Фапван, Лыонгиен, Тханьконг

|          | $V_s$  | $H$    | $m_{vm}$ | $B_{dy}$ | $\rho$ |
|----------|--------|--------|----------|----------|--------|
| $V_s$    | 1,000  | -0,771 | 0,465    | -0,354   | 0,797  |
| $H$      | -0,771 | 1,000  | -0,581   | 0,504    | -0,767 |
| $m_{vm}$ | 0,465  | -0,581 | 1,000    | -0,990   | 0,858  |
| $B_{dy}$ | -0,354 | 0,504  | -0,990   | 1,000    | -0,779 |
| $\rho$   | 0,797  | -0,767 | 0,858    | -0,779   | 1,000  |

- а. Стандартизованные коэффициенты  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  являются корнями системы уравнений (5)

$$\begin{cases} -0,771 = \beta_1 - 0,581\beta_2 + 0,504\beta_3 - 0,767\beta_4 \\ 0,465 = -0,581\beta_1 + \beta_2 - 0,990\beta_3 + 858\beta_4 \\ -0,354 = 0,504\beta_1 - 0,990\beta_2 + \beta_3 - 0,779\beta_4 \\ 0,797 = -0,767\beta_1 + 0,858\beta_2 - 0,779\beta_3 + \beta_4 \end{cases} \quad (5)$$

Решив систему уравнений (5), получаем:  $\beta_1 = -0,245$ ;  $\beta_2 = -0,797$ ;  $\beta_3 = -0,031$ ;  $\beta_4 = 1,270$ .

- б. Многомерный коэффициент корреляции  $R$  определяется по формуле (1),  $R = 0,917$ . Значение

$R = 0,917$  свидетельствует о том, что выбранные геотехнические параметры являются значимыми и адекватными.

- с. Вес параметров: глубина подземных вод  $H$ , коэффициент средней относительной сжимаемости  $m_{vm}$ , мощность слоя слабого грунта  $B_{dy}$  и плотность природного грунта  $\rho$  в целевой функции  $V_s$  обозначаются соответственно  $g_1, g_2, g_3, g_4$  и равны  $g_1 = 0,119$ ;  $g_2 = 0,234$ ;  $g_3 = 0,007$ ;  $g_4 = 0,640$ .

Таким образом, целевая функция  $V_s$  имеет вид:  
 $V_s = 0,119H + 0,234m_{vm} + 0,007B_{dy} + 0,640\rho$  (6)

Формула (6) применена для прогноза среднегодовой скорости деформации земной поверхности  $V_s$  на станциях Фапван, Лыонгиен и Тханьконг. Результаты сравнения прогнозируемых значений с реальными данными наблюдений представлены на рис. 5.

Прогнозируемые среднегодовые скорости деформации земной поверхности  $V_s$  на станциях Фапван, Лыонгиен и Тханьконг незначительно отличаются от средних значений по данным наблюдений.

**Выводы**

Многофакторный корреляционный анализ позволил оценить влияние некоторых геотехнических факторов, таких как глубина подземных вод  $H$ , коэффициент средней относительной сжимаемости  $m_{vm}$ , мощность слоя слабого грунта  $B_{dy}$ , время  $t$  и плотность природного грунта  $\rho$  в формулах  $S_t$  и  $V_s$ .

Прогноз деформации земной поверхности за время  $t$  и среднегодовой скорости деформации земной поверхности на станциях мониторинга за осадками поверхности Фапван, Лыонгиен и Тханьконг путем применения целевых функций  $S_t$  и  $V_s$  (уравнения 4 и 6) показывает результат относительно близкий к фактическим данным мониторинга (рис. 2 и 3). Прогнозируемые среднегодовые скорости дефор-

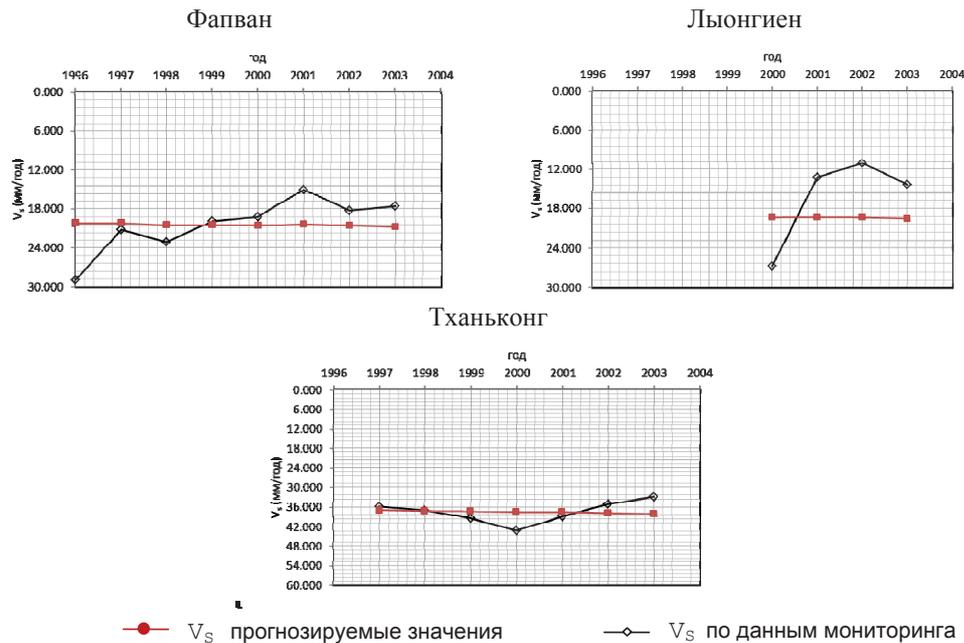


Рис. 5. Среднегодовая скорость деформации земной поверхности в связи с водоотбором подземных вод  $V_s$  на станциях Фапван, Лыонгиен и Тханьконг

мации земной поверхности  $V_s$  на станциях Фапван, Лыонгиен и Тханьконг не очень отличаются от средних значений по данным наблюдений; прогнозируемые деформации земной поверхности за время  $S$ , в 1,1–1,2 раза выше действительных наблюдаемых деформаций земной поверхности.

Из этого можно сделать вывод о том, что метод многофакторного корреляционного анализа явля-

ется надежным методом и может быть использован для прогноза оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в Ханое.

Для более точного прогноза необходимо построить другие станции мониторинга за осадками поверхности, чтобы дополнить данные мониторинга оседания и данные об инженерно-геологических условиях территории.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фи Х.Т., Строкова Л.А. Опасные геологические процессы на территории г. Ханой (Вьетнам) // Вестник Томского государственного университета. – 2011. – № 349. – С. 200–204.
2. Фи Х.Т., Нгуен Н.М., Строкова Л.А. Оценка и прогноз оседания земной поверхности в результате извлечения подземных вод в городе Ханой (Вьетнам) // Инженерная геология. – 2012. – № 2. – С. 52–59.
3. Report on research program on Hanoi land subsidence due to changing of groundwater level // НИБТ. – 2004. – № 38. – 125 p.
4. Савицкая Г.В. Анализ хозяйственной деятельности предприятия. – Минск: ООО «Новое знание», 2000. – 688 с.
5. Phuong N.H. Report on research and prediction of land subsidence due to changes in engineering-geological and hydrogeological conditions in Thanh tri district / The project code: B2001–36–01-T. – Hanoi, Vietnam, 2004. – 230 p.
6. Phuong N.H. Report on collecting and verifying data, additional studies for mapping of soft soils distribution in Hanoi to plan for construction in the capital of Vietnam // The project code: TC-DT/06–02–3. – Hanoi, Vietnam, 2004. – 261 p.

Поступила 06.02.2013 г.