

О механизме знакопеременных вертикальных движений поверхности городской среды (по результатам спутниковой радиолокационной интерферометрии)

**В.И. Горный¹, С.Г. Крицук¹, И.Ш. Латыпов¹, А.Г. Оловянный²,
С.Д. Петров³, А.А. Тронин¹**

¹*НИЦЭБ РАН, Санкт-Петербург 197110, Россия*

E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

²*Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН*

Санкт-Петербург 199004, Россия

E-mail: agolov2009@hge.ru

³*Санкт-Петербургский государственный университет,*

Санкт-Петербург 199034, Россия

E-mail: sergei@sp14272.spb.edu

На основе материалов многократной радиолокационной съемки спутниками ERS-1 и ERS-2 территории Санкт-Петербурга была реализована технология спутниковой радиолокационной интерферометрии по постоянным отражателям. В результате были выявлены знакопеременные вертикальные движения поверхности городской среды с амплитудой в десятки миллиметров. Анализ результатов многолетних вариационных наблюдений, выполненных в Санкт-Петербургском государственном университете за высотой приемной антенны глобальной навигационной спутниковой системы позволил высказать гипотезу о том, что вертикальные знакопеременные движения поверхности городской среды формируются под действием сезонных колебаний уровня грунтовых вод. Для проверки гипотезы построена математическая модель, описывающая деформации грунтового массива под влиянием сезонных изменений глубины уровня грунтовых вод и выполнено математическое моделирование этого процесса. Показано, что при неоднородных инженерно-геологических условиях под действием сезонных колебаний уровня грунтовых вод следует ожидать появление знакопеременных сезонных изменений высоты поверхности городской среды с амплитудой до 10 мм, что по порядку величины совпадает с результатами спутниковых и наземных вариационных измерений. Наблюдениями показано, что выявленные знакопеременные вертикальные движения поверхности приводят к образованию трещин во вновь отремонтированных зданиях, что может быть связано с усталостными явлениями в зданиях, построенных на ленточных фундаментах.

Ключевые слова: спутник, радиолокатор, интерферометрия, GPS, город, грунт, вертикальные колебания, математическое моделирование, деформация.

Введение

Космическая радиолокационная интерферометрия (КРИ) (Rodriguez, Martin, 1992; Gabriel et al., 1989; Gens, Van Genderen, 1996; Ferretti et al., 2001; Amelung et al., 1999; Wright, Stow, 1999; Cabral-Cano et al., 2003; Liu et al., 2008; Stramondo et al., 2008). позволяет с миллиметровыми погрешностями и высоким пространственным разрешением (от десятков - до первых метров) регистрировать вертикальные движения поверхности городской среды (ПГС) и изучать влияние этих движений на сохранность зданий и сооружений. КРИ была апробирована в условиях Санкт-Петербурга¹. Использовано 13 радиолокацион-

¹ Работы были поставлены по инициативе и в интересах Комитета по государственному контролю, использованию и охране памятников истории и культуры Санкт-Петербурга.

ных сцен спутников ERS-1,2 за период 1993 – 99 гг. В пределах центральной части города зарегистрировано ~ 15000 постоянных отражателей (ПО). Фрагмент окончательной карты представлен на *рис. 1*. Алгоритмы обработки спутниковой радиолокационной съемки, примененные при построении этой карты изложены в работе (Горный и др., 2010). Для ПО построены графики изменения высот (*рис. 2*). Повторные измерения (интервал между съемками – сутки) показали, что с вероятностью 99% изменения высоты ПГС, превышающие $\pm 3,7$ мм должны считаться достоверными. В результате, выявлено, что на отдельных участках наблюдаются знакопеременные вертикальные колебания ПГС с амплитудами, достигающими ± 10 мм и более.

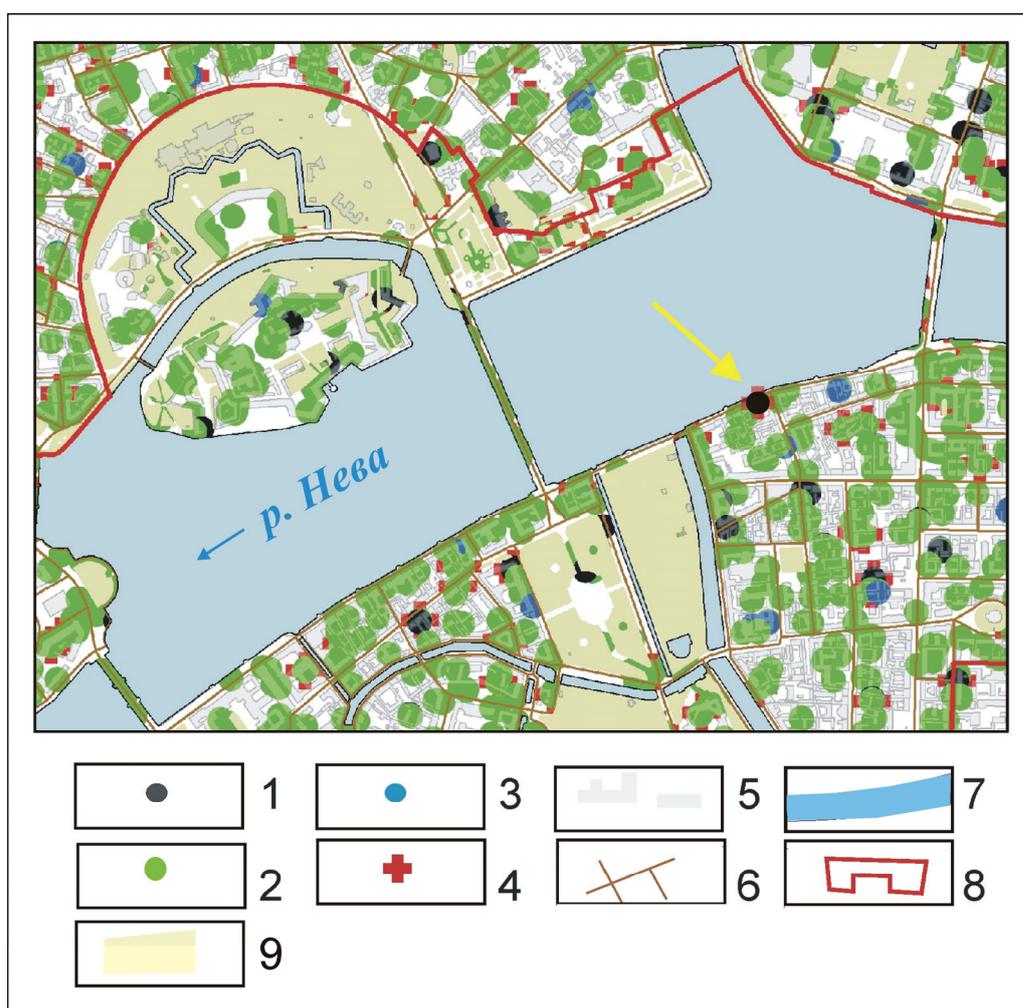


Рис. 1. Фрагмент карты расположения ПО, построенных на основе технологии КРДИ за период 1993 – 1999 гг. по материалам спутников ERS-1,2. Масштаб: 1:10 000. Желтой стрелкой показан ПО на д.18, Наб. Кутузова, кинематика которого приведена на *рис. 2*.
Условные обозначения: 1. Опускание ПО более – 5 мм.
 2. Изменения высот ПО не более ± 5 мм. 3. Подъем ПО более +5 мм.
 4. Среднеквадратическое отклонение высоты ПО от временного тренда более 5 мм (знакопеременные движения ПО). 5. Здания и сооружения. 6. Улицы. 7. Акватории.
 8. Границы зоны охраны объектов культурного наследия — ОЗ.
 9. Зеленые зоны

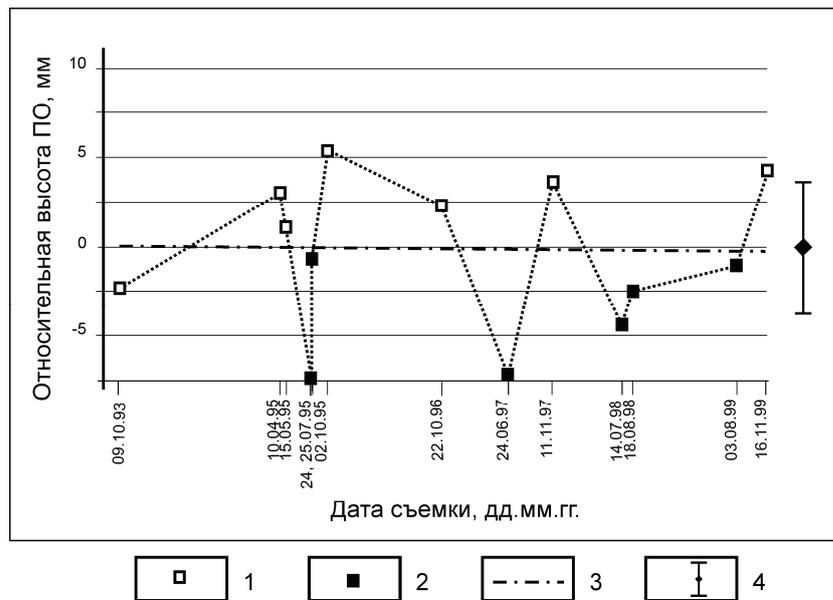


Рис. 2. Кинематика ПГС (Наб. Кутузова, д.18, Санкт-Петербург), зарегистрированная по методике КРИ ПО. Условные обозначения: 1. Высоты ПО, измеренные осенью и весной. 2. Высоты ПО, измеренные летом. 3. Линия тренда высот ПО. 4. Доверительный интервал для результатов измерений высот ПО, полученный с вероятностью 99%

Дополнительно проанализированы данные мониторинга высоты приемной антенны глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), смонтированной на здании Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) (рис. 3).

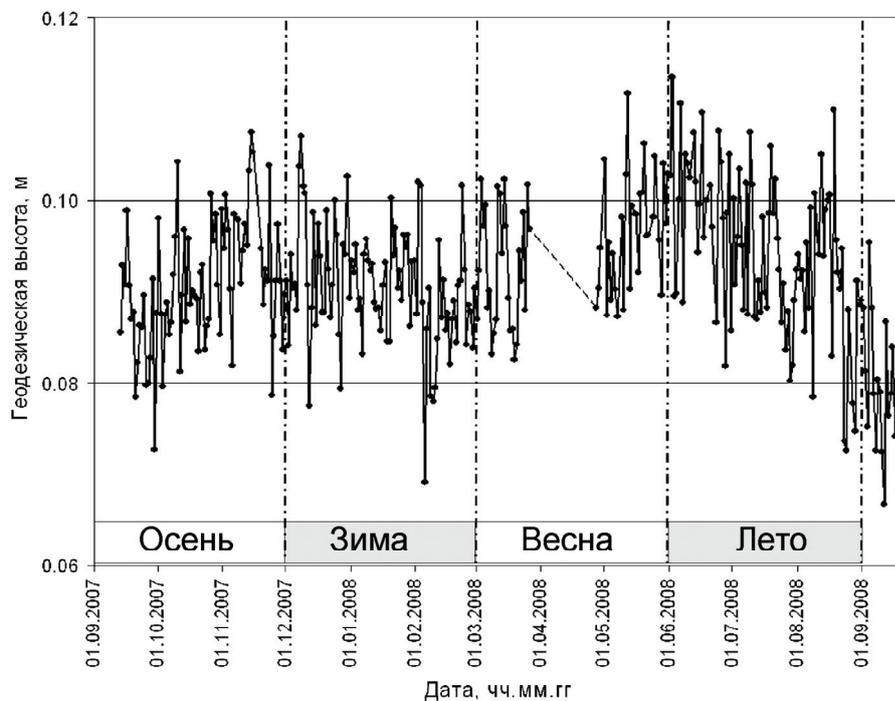


Рис. 3. Ряд геодезических высот пункта СПбГУ относительно эллипсоида WGS-84 на основе вычисленных прямоугольных координат фазового центра в системе ITRF2003 (модели ионосферы, орбиты спутников и геодинамические параметры в соответствии с IERS Conventions 2003)

Анализ данных КРИ и вариационной станции ГНСС показал, что минимальные высотные отметки наблюдаются в конце лета, а максимальные – в конце весны.

В связи с этим, встал вопрос о механизме, вызывающем периодические вертикальные движения ПГС. Анализ результатов КРИ и данных ГНСС показал, что наблюдается сезонная ритмика изменения высот ПО, расположенных на неустойчивых грунтах. Например, ПО на Набережной Кутузова (территория насыпана) (рис. 1) в летнее время года, как правило, имеет минимальную высоту, а весной и осенью, наблюдается подъем. Это позволило выдвинуть гипотезу об изменении высотных отметок ПГС из-за набухания грунтов с высокой влагоемкостью (например, торфов) при сезонных подъемах уровня грунтовых вод (УГВ) и выдавливания, поглощенной воды, под весом зданий и сооружений при сезонных понижениях УГВ.

Целью настоящей статьи является проверка выдвинутой гипотезы путем математического моделирования предполагаемых эффектов.

Математическая модель

Основные соотношения

Для проверки гипотезы построена математическая модель, описывающая деформации грунтового массива под влиянием изменений глубины УГВ. В соответствии с К.Терцаги (Терцаги, 1943), определение эффективных напряжений водонасыщенного массива выполнялось по зависимости:

$$\sigma_{ij}^f = \sigma_{ij}^0 - p\delta_{ij}, \quad (1)$$

где σ_{ij}^0 – полное напряжение; p – гидростатическое давление воды (нейтральное напряжение); $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$; i и j принимаются равными 1, 2 и 3 в соответствии с номерами осей координат.

При обводнении массива действующие до этого эффективные напряжения рассчитывались с использованием выражения:

$$\Delta\sigma = -\gamma_0(H_w - z); \quad (2)$$

при осушении:

$$\Delta\sigma = -\gamma_0\Delta H_w; \quad (3)$$

где γ_0 – объемный вес воды; H_w – УГВ; ΔH_w – приращение напора; z – глубина элемента массива. Изменение гидростатических давлений при осушении или обводнении некоторой области массива определялось решением фильтрационной задачи. Приращение эффективных напряжений в этой зоне определяется падением или ростом напоров.

Моделирование выполнено с использованием программы DESTROCK PLANE (Программный комплекс..., 2010), реализующей процедуры метода конечных элементов для деформирующейся и разрушающейся сплошной среды с анизотропными упругими, вязкими, пластическими и хрупкими свойствами. Деформации по разным направлениям считались не зависящими друг от друга, а деформации пор описывались математической моделью, в которой вязкий элемент параллельно был связан с нелинейным упругим элементом. Модель учитывала запаздывание и ограничение по величине деформаций пор. В результате, приращения деформаций по направлениям главных напряжений определялось соотношением:

$$\Delta \varepsilon_i^p = [\delta_i p F(\sigma_i) - \varepsilon_i^p(t)] * [1 - \exp(-q \Delta t)]; \quad (4)$$

где p – открытая часть пористости; δ_i – доля возможной деформации пористости на i -м направлении; σ_i – главные напряжения, ($i = 1, 2, 3$); $\varepsilon_i^p(t)$ и $\Delta \varepsilon_i^p$ – деформация пор и ее приращение в направлении главных напряжений; t и Δt – текущее время и его приращение; q – параметр вязкости; $F(\sigma_i)$ – нелинейная зависимость максимально возможной деформации пор в i -м направлении при соответствующих значениях напряжений. Условие закрытия свободных пор по направлению от напряжения, было принято в виде:

$$F(\sigma_i) = \sqrt{1 - \exp(-\xi \sigma_i / \sigma_{дл})}, \quad (5)$$

где $\sigma_{дл}$ – длительная прочность (полагая $F(\sigma_i) = 0,9$ при $\sigma_i = \sigma_{дл}$, имеем $\xi = 1,66$).

Модельный пример

Для здания с углубленным ленточным фундаментом при моделировании деформаций, вызванных сезонными изменениями УГВ, рассмотрено влияние линзы пористых торфов (*табл.*), залегающей в глинах под этим зданием (*рис. 4*).

Таблица. Принятые при расчетах механические характеристики грунтов и фундамента

<i>Грунт/фундамент</i>	<i>Модуль упругости, МПа</i>	<i>Коэффициент Пуассона, доли единицы</i>	<i>Пористость, доли единицы</i>
Песок	200	0,22	0,08
Торф	100	0,20	0,10
Глина	1000	0,25	0,05
Фундамент	10000	0,20	0

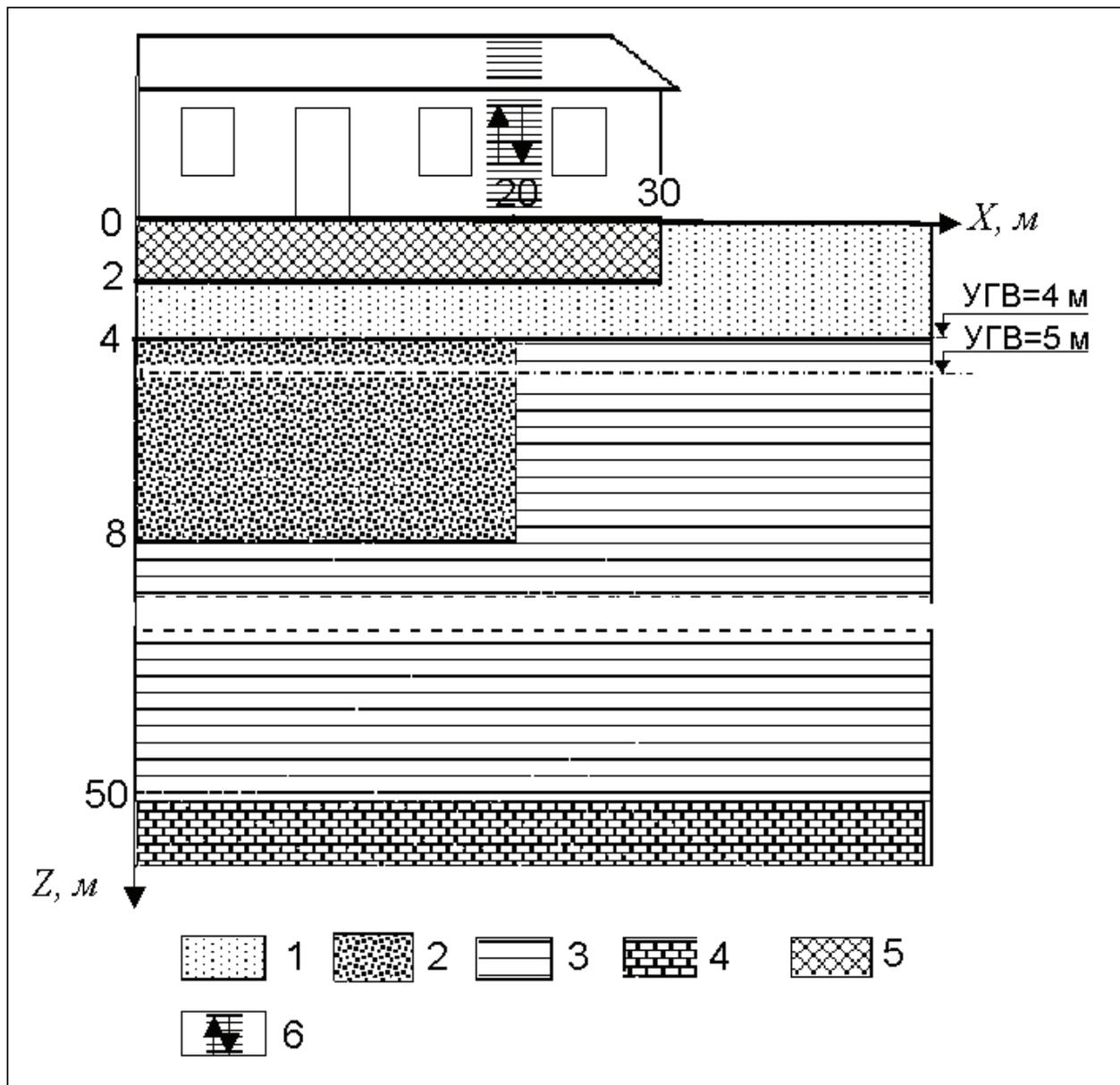


Рис. 4. Принятая модель для изучения влияния неоднородностей грунтового массива на деформации зданий при сезонных изменениях УГВ (зеркальная симметрия относительно оси ординат). 1 – песок; 2 – торф; 3 – глина; 4 – кристаллические породы; 5 – ленточный фундамент здания; 6 – зона возникающих в здании знакопеременных напряжений

Результаты

Моделирование показало, что под действием сезонных изменений УГВ, достигающих 1 м (изменение глубины от 4 м до 5 м, что соответствует условиям Санкт-Петербурга) на земной поверхности или на поверхности фундаментов зданий, лежащих над погребенной линзой торфов, следует ожидать появления периодических вертикальных колебаний с амплитудой до 6 мм относительно той части поверхности или фундамента, которая за пределами этой линзы опирается на прочные грунты (рис. 4).

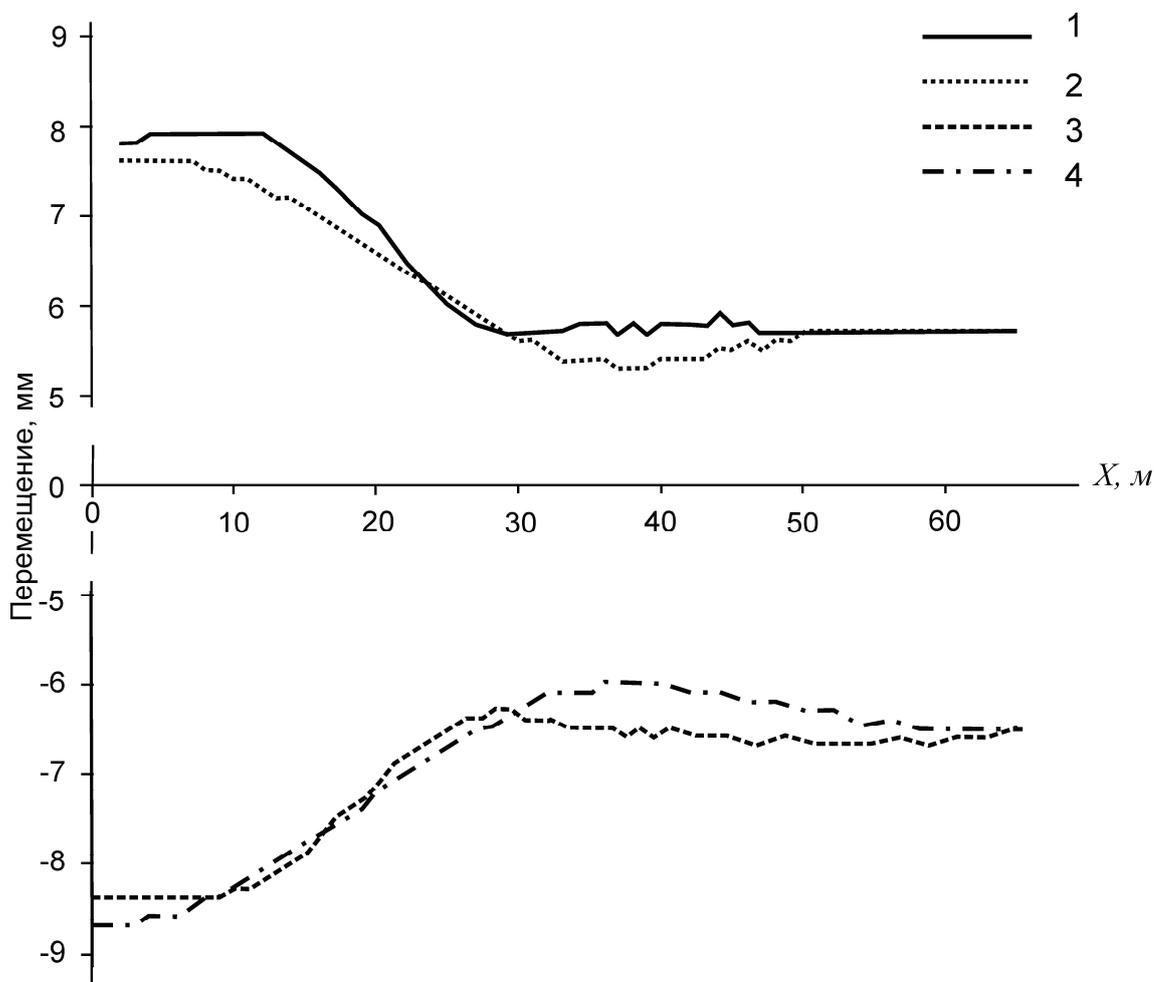


Рис. 5. Результат математического моделирования вертикальных перемещений поверхности грунта и верхней границы ленточного фундамента при изменении УГВ на 1 м. Подъем УГВ: 1 – поверхность без фундамента; 2 – поверхность фундамента. Опускание УГВ (летние и зимние межени). 3 – поверхность без фундамента; 4 – поверхность фундамента

Модельные значения подъема и опускания ПГС по порядку величин соответствует измеренным КРИ сезонным вариациям высот ПО.

Наличие знакопеременных вертикальных движений подобного генезиса, зарегистрированное в Санкт-Петербурге с помощью КРИ и ГНСС (рис. 1 – рис. 3) должно приводить к появлению знакопеременных напряжений, вызывающих усталостные явления в конструкционных материалах. Следствием этого может быть разрушение зданий и сооружений. Обследование, проведенное в центральных районах Санкт-Петербурга, где были отремонтированы фасады зданий показало, что на участках, где по данным КРИ зарегистрированы высокие амплитуды периодических колебаний ПО (5 мм и более) наблюдаются свежие «разрезающие» здания трещины, что указывает на действие исследованного в данной статье механизма возбуждения знакопеременных колебаний ПГС.

Обсуждение результатов

Традиционно, «высокочастотные» изменения геодезических высот поверхности, регистрируемые системами глобального позиционирования или же КРИ ПО рассматривались как погрешности измерений. Поэтому методики измерений были направлены на минимизацию влияния подобных осцилляций на итоговый результат, что достигалось путем осреднения значений высот на определенном интервале времени. Этот прием вполне оправдан при традиционных геодезических измерениях. В то же время, как показывают результаты, полученные в настоящей статье, «высокочастотные» изменения геодезических высот могут быть вызваны не только погрешностями измерений, но и природными гидротермическими процессами, которые реально изменяют высоты ПГС. А уже сезонные изменения высот ПГС в неоднородных инженерно-геологических условиях (сочетание слабых грунтов с устойчивыми) могут приводить к появлению усталостных напряжений конструкционных материалов зданий и сооружений. Таким образом, КРИ ПО может стать основным инструментом при проектировании застройки на новых территориях, при мониторинге сохранности памятников архитектуры, при планировании капитального ремонта зданий.

Представляется, что в условиях Санкт-Петербурга применение КРИ ПО особенно актуально в силу разнообразия речных и озерно-болотных отложений в центральной части города, наличия обширных намывных территорий.

Еще одной особенностью природных условий Санкт-Петербурга являются частые наводнения, которые в короткие сроки значительно повышают УГВ в прибрежных зонах города. Таким образом, как следует из результатов настоящего исследования, риск разрушения знаменитых архитектурных ансамблей набережных Санкт-Петербурга значительно выше, чем в остальной части города. Отсюда, возрастает роль комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений, который препятствует подъему уровня Невы в черте города, а, соответственно, не допускает резкого повышения УГВ в районе набережных.

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующие важные для практики сохранности зданий и сооружений выводы.

1. Математическое моделирование подтвердило гипотезу о значимости сезонных изменений УГВ на формирование знакопеременных вертикальных движений ПГС в условиях неоднородных грунтов.

2. Ленточные фундаменты практически не снижают амплитуду знакопеременных вертикальных колебаний, вызванных изменениями УГВ.
3. В районах со значительными сезонными вариациями УГВ новые здания с ленточным фундаментом необходимо проектировать на участках с однородными инженерно-геологическими условиями в зоне колебаний УГВ.
4. Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга снижает амплитуды колебаний УГВ, что существенно повышает значимость защитных сооружений для сохранения исторического облика центральной части города.

Литература

1. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Оловянный А.Г., Тронин А.А. Знакопеременные вертикальные движения земной поверхности по данным космической радиолокационной съемки (на примере Санкт-Петербурга) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 321-332.
2. Программный комплекс для математического моделирования трещиноватых разрушающихся массивов горных пород (DESTROCK PLANE). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614935. СПбГУ (RU), Институт геоэкологии им Е.М.Сергеева РАН (RU). Авторы А.Г.Оловянный, В.П.Чанцев. 2010.
3. Терцаги К. Теория механики грунтов: М.: Госстройиздат, 1961. 507 с. (Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics, N.Y., Wiley, 1943. - 510 p.)
4. Amelung F., Galloway D.L., Bell J.W., Zebker H.A., and Laczniaik R.J. Sensing the ups and downs of Las Vegas – InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation // Geology. 1999. V. 27. P. 483-486.
5. Cabral-Cano E., Dixon T.H., Zamora Sanchez O., Diaz Molina O., Correa-Mora F. Ground subsidence in Mexico City imaged by InSAR, GPS and gravimetry // Abstracts with Programs - Geological Society of America, Apr 2003. V.35. No 4. P.77.
6. Gabriel A.K., Goldstein R.M., and Zebker H.A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry // Journal of Geophysical Research. 1989. V. 94. P. 9183-9191.
7. Gens R., and Van Genderen J.L. SAR interferometry - issues, techniques, applications // International Journal of Remote Sensing. 1996. V. 17. No. 10. P. 1803-1835.
8. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. No. 1. P. 8-20.
9. Liu G., Luo X., Chen Q., Huang D., Ding X., Detecting Land Subsidence in Shanghai by PS-Networking SAR Interferometry // Sensors. 2008. V. 8. P. 4725-4741.
10. Rodriguez E., and Martin J. Theory and design of interferometric SARs // Proc. IEEE. 1992. V. 139. P. 147-159.
11. Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F.R., Moro M., Saroli M. Subsidence Induced by Urbanisation in the City of Rome Detected by Advanced InSAR Technique and Geotechnical Investigations // Remote Sensing of the Environment. 2008. V. 112. No. 6. P. 3160-3172.
12. Wright P., and Stow R. Detecting mining subsidence from space // International Journal of Remote Sensing. 1999. V. 20. No. 6. P. 1183-1188.

On the mechanism of land surface vertical oscillations in urban areas (by satellite radar interferometry)

V.I. Gornyy¹, S.G. Kritsuk¹, I.Sh. Latypov¹, A.G. Olovyanny²,
S.D. Petrov³, A.A. Tronin¹

¹SRCES RAS, St. Petersburg 197110, Russia

E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

²St. Petersburg Division of Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS,
St. Petersburg 199004, Russia

E-mail: agolov2009@hge.pu.ru

³Saint Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia

E-mail: sergei@sp14272.spb.edu

The permanent scatters technique of satellite radar interferometry was applied on the territory of St. Petersburg historical center. ERS-1 and ERS-2 multiple radar satellite survey data were used for this project supported by the St. Petersburg Government. Vertical oscillations of land surface with amplitudes of about few tens of millimeter were recorded for the urban territory. The analysis of long time series of Global Positioning System receiving antenna geodetic highs allows a hypothesis about underground water level seasonal variations as the main reason of these land surface oscillations. A mathematical model describing the ground deformations under the influence of seasonal underground water level variations was built. After that, mathematical simulation of this process was carried out. As a result, it was proved that vertical ground surface oscillations can be induced by underground water level variations. The order of magnitude of these oscillations amplitude is about 10 mm. These amplitudes coincide with the results of permanent scatters high variations recorded by satellite radar interferometry. Observations of renovated buildings located at places with high amplitudes of ground surface oscillations exhibited vertical cracks crossing the walls from the basement up to the top of the buildings.

Keywords: satellite, radar, interferometry, GPS, urban area, ground, vertical oscillations, mathematical simulation, deformation.

References

1. Gornyi V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Olovyannyi A.G., Tronin A.A., Znakoperemennye vertikal'nye dvizheniya zemnoi poverkhnosti po dannym kosmicheskoi radiolokatsionnoi s"emki (na primere Sankt-Peterburga) (Alternating vertical oscillation movements of land surfaces according to results of satellite radar interferometry (on the example of St. Petersburg)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 2, pp. 321-332.
2. Olovyannyi A.G., Chantsev V.P., Programmnyi kompleks dlya matematicheskogo modelirovaniya treshchinovatykh razrushayushchikhsya massivov gornykh porod (DESTROCK PLANE), *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM No 2010614935* (Software package for mathematical simulation of collapsing rock massif (DESTROCK PLANE), State registration certificate for software No. 2010614935), SPbGU (RU), Institut geoekologii im E.M. Sergeeva RAN (RU), 2010.
3. Terzaghi K., *Teoriya mekhaniki gruntov* (Theoretical Soil Mechanics), Moscow: Gosstroizdat, 1961, 507 p.
4. Amelung F., Galloway D.L., Bell J.W., Zebker H.A., and Laczniaik R.J., Sensing the ups and downs of Las Vegas – InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation, *Geology*, 1999, Vol. 27, pp. 483-486.
5. Cabral-Cano E., Dixon T.H., Zamora Sanchez O., Diaz Molina O., Correa-Mora F., Ground subsidence in Mexico City imaged by InSAR, GPS and gravimetry, *Abstracts with Programs - Geological Society of America*, Apr. 2003, Vol. 35, No. 4, p. 77.
6. Gabriel A.K., Goldstein R.M., and Zebker H.A., Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry, *Journal of Geophysical Research*, 1989, Vol. 94, pp. 9183-9191.
7. Gens R., and Van Genderen J.L., SAR interferometry - issues, techniques, applications, *International Journal of Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, No. 10, pp. 1803-1835.
8. Ferretti A., Prati C., Rocca F., Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, Vol. 39, No. 1, pp. 8-20.
9. Liu G., Luo X., Chen Q., Huang D., Ding X., Detecting Land Subsidence in Shanghai by PS-Networking SAR Interferometry, *Sensors*, 2008, Vol. 8, pp. 4725-4741.

10. Rodriguez E., and Martin J., Theory and design of interferometric SARs, *Proc. IEEE*, 1992, Vol. 139, pp. 147-159.
11. Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F.R., Moro M., Saroli M., Subsidence Induced by Urbanisation in the City of Rome Detected by Advanced InSAR Technique and Geotechnical Investigations, *Remote Sensing of the Environment*, 2008, Vol. 112, No. 6, pp. 3160-3172.
12. Wright P., and Stow R., Detecting mining subsidence from space, *International Journal of Remote Sensing*, 1999, Vol. 20, No. 6, pp. 1183-1188.