

Адаптивные модели краткосрочного прогноза оседания земной поверхности и определение наиболее неблагоприятного положения здания в мульде сдвижения

Аспирант А.В. Воробьев;

Д.ф.-м.н., зав. кафедрой Г.Г. Кашеварова,

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Аннотация. Для оценки механической безопасности и возможности дальнейшей эксплуатации зданий, расположенных на подработанной территории, требуется прогноз оседаний земной поверхности. Процесс оседания земной поверхности изучается путем применения адаптивных моделей краткосрочного прогнозирования временных рядов. Цель адаптивных методов прогнозирования заключается в построении самонастраивающихся математических моделей, которые способны отражать изменяющиеся во времени условия и давать достаточно точные оценки будущих членов данного ряда. Такие модели предназначаются, прежде всего, для краткосрочного прогнозирования.

Выбор подходящей модели прогнозирования осуществлен на основе сравнения прогнозных значений с натурными данными по оседаниям контрольных реперов. Из анализа результатов моделирования следует, что наиболее близким по значению к фактической величине оседания является результат прогноза с использованием модели Хольта.

Выполнен ряд численных экспериментов, в результате которых установлено наименее благоприятное положение пятиэтажного панельного здания в мульде сдвижения, а также определено напряженно-деформированное состояние типовой секции панельного здания. Результаты численных экспериментов подтверждаются данными обследований.

Ключевые слова: адаптивная модель прогнозирования; подработанная территория; оседание поверхности; мульда сдвижения; метод конечных элементов

Введение

Задачу прогнозирования различных социально-экономических процессов решает практически каждый экономист вне зависимости от области его исследования. Но в настоящее время в России остро стоит проблема предупреждения чрезвычайных ситуаций, ежегодно наносящих серьезный экономический ущерб многим регионам. Появились работы, посвященные прогнозу возникновения чрезвычайных ситуаций путем постоянного наблюдения и анализа их параметров [1–6].

Для Пермского края особенно актуальной является тема эксплуатации зданий и сооружений на подработанной территории. В результате добычи полезных ископаемых жилая и промышленная застройка отдельных населенных пунктов оказалась подработана горными работами. Проблемами подработанной территории занимаются сотрудники Пермского национального исследовательского университета в сотрудничестве с ОАО «Галугрия» (г. Пермь) [7–10]. Характер напряженно-деформированного состояния грунтового массива рассматривается в работах российских авторов [10–13] и в коллективной работе сотрудников университетов Китая [14]. За оседаниями городских территорий в Индонезии ведется наблюдение при помощи GPS технологий [15]. Аварийным ситуациям, возникающим в результате выработки соляных месторождений, посвящена работа сотрудников Китайской академии наук [16].

Для оценки механической безопасности и возможности дальнейшей эксплуатации жилых и административных зданий, оказавшихся в потенциально опасной зоне подработанной территории, требуется прогноз процесса деформирования грунтового массива и сроков введения мер охраны для каждого из этих зданий [17]. При сдвижении земной поверхности основными показателями, позволяющими прогнозировать и оценивать состояние зданий и сооружений, являются: оседание земной поверхности η , радиус кривизны R и горизонтальные деформации земной поверхности ε в основаниях зданий [7, 18].

В режиме реального времени проводился мониторинг для определения характера и динамики развития деформаций зданий, для выявления наиболее опасных мест и узлов, оценки развития повреждений и принятия соответствующих мер по проведению срочных противоаварийных мероприятий [7]. Отмечается общая динамика деформаций наблюдаемых

объектов, расположенных на одной площадке, периоды схожих во времени деформаций разных зданий. Выявлено, что деформации зданий, находящихся приблизительно в одинаковых условиях, происходят совместно с общими деформациями земной поверхности участка подработанной территории, на котором они расположены.

Имеется прогноз ожидаемых деформаций земной поверхности на 20 лет, выполненный в соответствии с нормативной литературой. К сожалению, данный долгосрочный прогноз не всегда соответствует реальности, и существует необходимость в альтернативном подходе. В данной работе предлагается использовать для статистических прогнозов адаптивные модели, применяемые обычно в экономике.

1. Адаптивные методы и модели прогнозирования временных рядов

Адаптивные методы прогнозирования временных рядов представляют собой методы, цель которых заключается в построении самокорректирующихся (самонастраивающихся) математических моделей, способных отражать изменяющиеся во времени условия, учитывать информационную ценность различных членов временной последовательности и давать достаточно точные оценки будущих членов данного ряда. Такие модели предназначаются, прежде всего, для краткосрочного прогнозирования [19, 20].

Процесс прогнозирования, опирающийся на статистические методы, распадается на два этапа. Первый, индуктивный, заключается в обобщении данных, наблюдаемых за более или менее продолжительный период времени, и в представлении соответствующих статистических закономерностей в виде модели. Второй этап, собственно прогноз, является дедуктивным. На этом этапе на основе найденных статистических закономерностей определяют ожидаемое значение прогнозируемого признака [21].

Под прогнозированием мы понимаем научное (т. е. основанное на системе фактов и доказательств, установленных причинно-следственных связей) выявление вероятностных путей и результатов предстоящего развития явлений и процессов, оценку показателей, характеризующих эти явления и процессы для более или менее отдаленного будущего. Таким образом, прогнозирование – это научная деятельность, направленная на выявление и изучение возможных альтернатив будущего развития и структуры его вероятных траекторий. Каждая альтернативная траектория развития связывается с наличием комплекса внешних условий.

Особенностью адаптивных моделей является то, что они способны приспособливать свою структуру и параметры к изменению внешних условий.

К простейшим адаптивным моделям относятся: *экспоненциальное сглаживание* – модель Брауна и *модели линейного роста*. К моделям линейного роста относятся: модель Хольта; модель линейного роста Брауна – частный случай модели Хольта; модель прогнозирования Дж. Бокса и Г. Дженкинса, в которой в модель Хольта включается разность ошибок [19, 20, 22–24].

Примем к рассмотрению в качестве базовых две модели: модель Брауна и модель Хольта.

Модель Брауна. Главное достоинство этой прогнозной модели состоит в том, что она способна последовательно адаптироваться к новому уровню процесса без значительного реагирования на случайные отклонения.

Недостатком модели является то, что экспоненциальная средняя дает систематическую ошибку, когда временной ряд имеет тенденцию линейного роста [19, 23, 24].

Модель Хольта. Важным моментом при использовании модели Хольта является выбор коэффициентов, которые определяют чувствительность модели. Чувствительная модель быстро реагирует на реальные изменения, а нечувствительная не реагирует на шум и случайные отклонения. Недостатком модели является то, что учитываются лишь линейные тренды и не учитывается сезонность [19, 22].

Модель Хольта – Уинтерса. Эта модель учитывает экспоненциальный тренд и аддитивную сезонность. Учет сезонности крайне важен в рассматриваемой задаче о деформациях земной поверхности, так как увеличение скорости деформаций связано с затоплением подземных выработок, но на данном этапе моделирование натуральных данных при помощи комбинированной модели Хольта – Уинтерса не представляется возможным, так как в предоставленной выборке интервал значений не учитывает сезонность. Натурные данные представлены с шагом в один год,

Воробьев А.В., Кашеварова Г.Г. Адаптивные модели краткосрочного прогноза оседания земной поверхности и определение наиболее неблагоприятного положения здания в мулде сдвижения

тогда как для реализации модели Хольта – Уинтерса требуются поквартальные либо ежемесячные данные [19, 25].

При использовании модели прогнозирования временного ряда встает проблема адекватности этой модели. Пусть $\epsilon_t = y_t - \hat{y}_t$, где y_t – данные, которые уже известны, \hat{y}_t – прогноз на момент t , полученный с помощью некоторой адаптивной модели. Если ошибка ϵ_t невелика, то есть разница между реальными данными и прогнозом мала, то использование данной модели оправдано.

Для выбора наиболее адекватной модели проведены прогнозные расчеты по данным мониторинга оседаний на подработанной территории Пермского края (рисунок 1). Изолинии суммарных оседаний и горизонтальных деформаций на рассматриваемом участке приведены на рисунках 2 и 3.

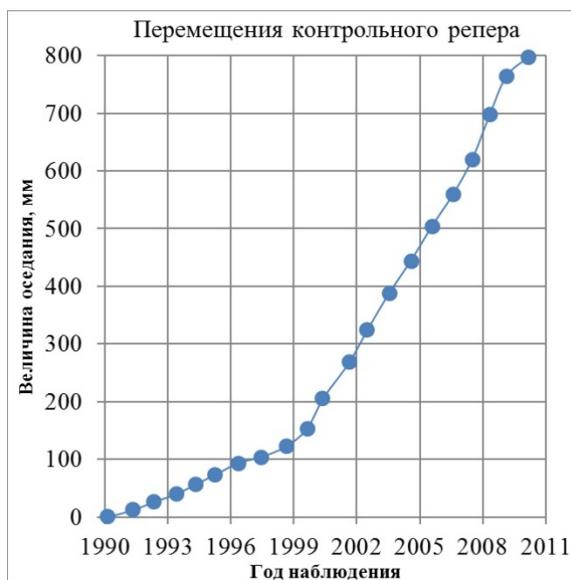


Рисунок 1. График перемещений контрольного репера



Рисунок 2. План поверхности с изолиниями суммарных оседаний (мм)

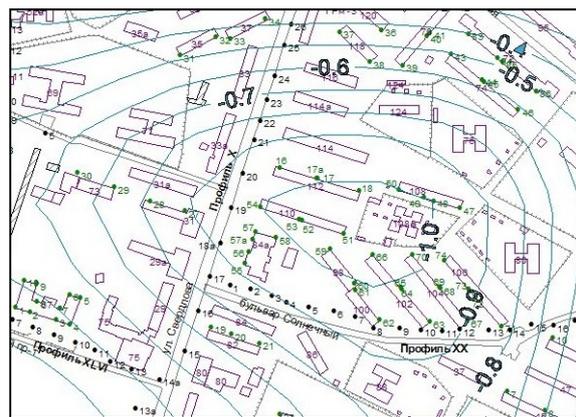


Рисунок 3. План поверхности с изолиниями горизонтальных деформаций (мм/м)

Построим по натурным данным линейные модели Брауна и Хольта.

Все адаптивные модели делятся на два класса: модели скользящего среднего (СС-модели) и авторегрессии (АР-модели).

Согласно схеме скользящего среднего оценкой текущего уровня (наблюдения) является взвешенное среднее всех предшествующих уровней, причем вес (множитель), который отражает информационную ценность наблюдения, тем больше, чем ближе оно находится к текущему уровню. Такие модели хорошо отражают тенденцию, но не позволяют отражать колебания, например, сезонные.

В СС-моделях сглаживание производится с помощью параметра сглаживания, который принимает значения в интервале от 0 до 1. Параметр сглаживания принимает значение больше 0,5 для быстроизменяющихся процессов и меньше 0,5 для относительно стабильных процессов.

Параметр сглаживания α для метода Брауна определен методом подбора и принят равным $\alpha = 0,57$. В качестве критерия подбора параметра α принято условие минимума суммарной погрешности результатов проверочного прогноза.

Графики натуральных и модельных значений оседания земной поверхности за период с 1982 по 2008 годы приведены на рисунке 4.

Для оценки точности построения модели приведен график погрешности модельных значений относительно натуральных данных. Погрешность, полученная в результате моделирования, представлена на рисунке 5.

На графике наглядно представлен механизм самонастройки модели. При достаточно обширной выборке погрешность моделирования находится в пределах 5–7%. Модель Хольта более точно описывает натурные данные.

Проверим точность краткосрочных (до пяти лет) прогнозов, выполненных при помощи созданных моделей Брауна и Хольта. Для этого выполним прогноз уже реализованных оседаний по данным 2005–2008 гг. Результаты прогнозирования представлены на рисунке 6. Погрешность результатов прогноза относительно натуральных представлена на рисунке 7.

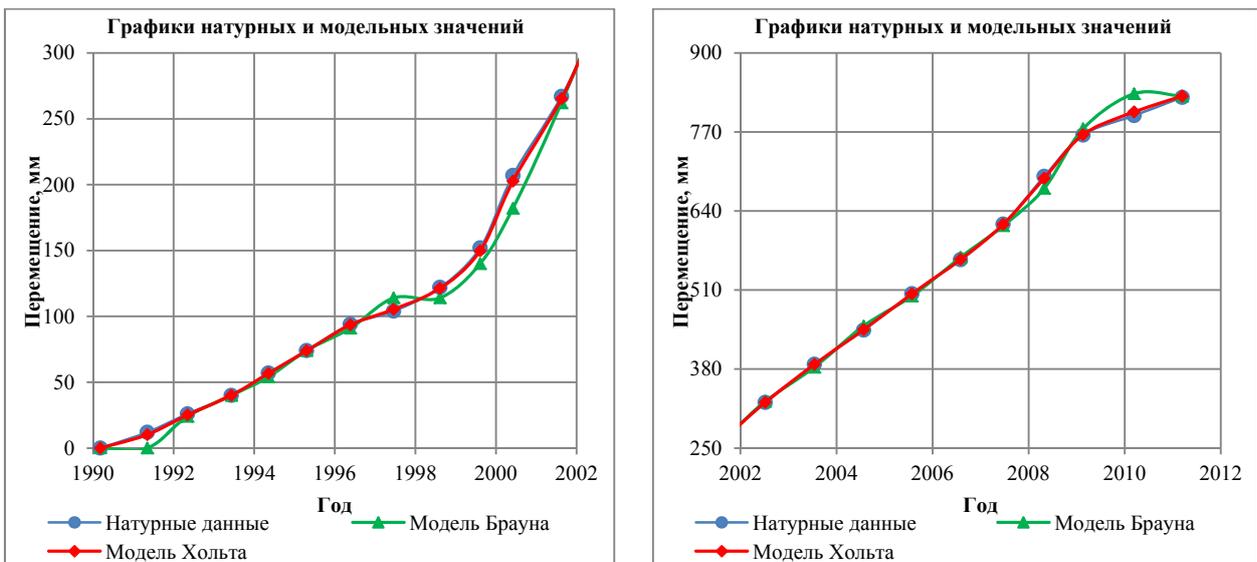


Рисунок 4. Графики натуральных и смоделированных значений

Из полученных результатов следует, что модель Хольта более точно аппроксимирует натурные значения при несущественной потере точности прогнозирования в сравнении с методом Брауна. Погрешность четырехлетнего прогноза не превышает 5%.

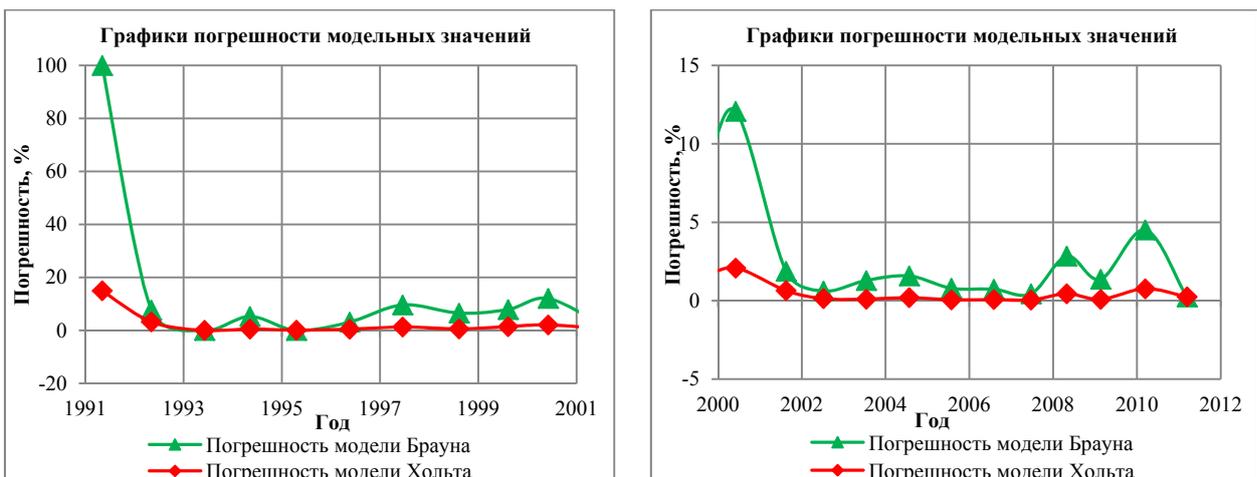


Рисунок 5. Погрешности модельных значений

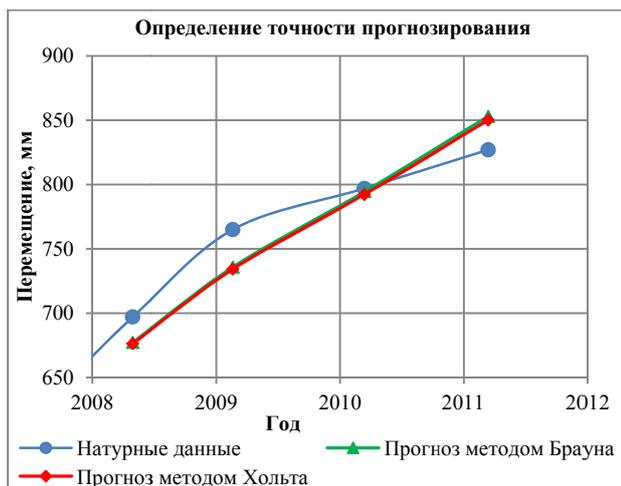


Рисунок 6. Проверочный прогноз реализованных оседаний

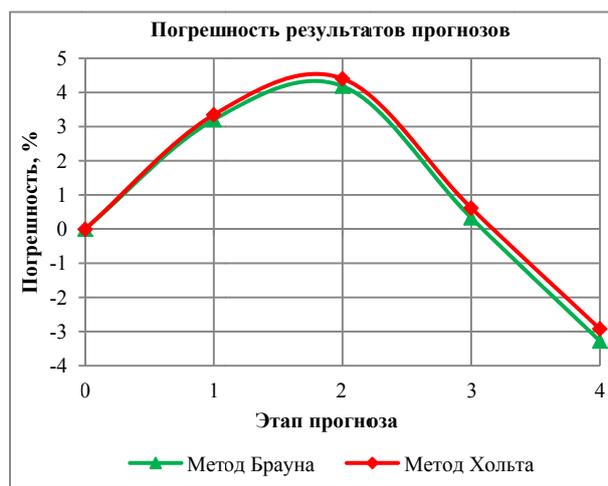


Рисунок 7. Погрешность результатов прогноза

Выполним сравнение результатов прогнозирования, полученных с применением адаптивных моделей Брауна и Хольта, а также вычисленных аналитическим путем, со значением фактически реализовавшихся оседаний для рассматриваемого репера.



Рисунок 8. Сравнение результатов прогноза с фактическим значением

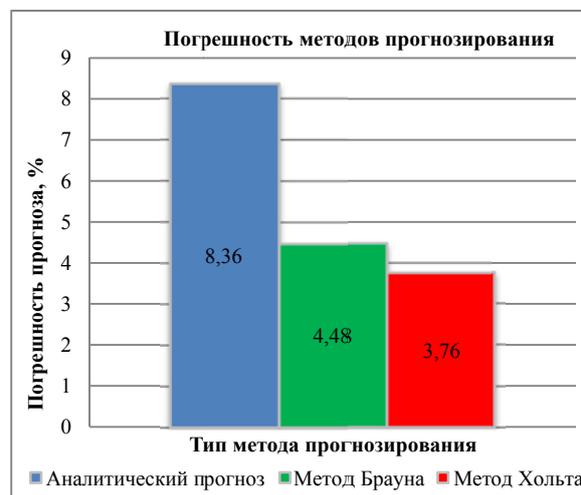


Рисунок 9. Погрешность результатов прогноза

Из анализа полученных графиков видно, что наиболее близким по значению к фактической величине оседания является результат прогноза с использованием модели Хольта. На рисунке 9 приведена диаграмма, отражающая количественное значение погрешностей использованных методов прогнозирования.

На основании полученных результатов заключаем, что использование адаптивных моделей прогнозирования на краткосрочных прогнозах имеет преимущество в точности перед аналитическими методами прогнозирования.

2. Определение наименее благоприятного положения здания в мульдe сдвижения

В ходе многолетнего мониторинга состояния жилого фонда установлено, что наиболее чувствительными к деформациям земной поверхности являются панельные здания. Определение наименее благоприятного положения здания в мульдe сдвижения произведено на примере жилого пятиэтажного панельного здания.

Общая характеристика объекта. Здание относится к типовой серии 1-468А. Жилой дом имеет пять этажей. Количество подъездов 8. Подвал расположен под всем зданием. Здание крупнопанельное, прямоугольное в плане. Длина здания в крайних осях 120 м, ширина в осях

Воробьев А.В., Кашеварова Г.Г. Адаптивные модели краткосрочного прогноза оседания земной поверхности и определение наиболее неблагоприятного положения здания в мульдe сдвижения

11 м. Здание поделено деформационным швом на два отсека длиной 60 м. Высота этажей 2,8 м. Высота подвала в среднем составляет 2,2 м. Отметка здания по карнизу крыши составляет +14,500 м. За отметку 0,000 принят уровень чистого пола 1 этажа.

Модель здания выполнена из оболочечных конечных элементов и включает в себя наружные стены и перекрытия. Модель представлена на рисунке 10. Стеновые панели с одной из сторон здания условно не показаны [26].

К модели прикладываются кинематические граничные условия, величина перемещений каждого узла в основании модели определяется исходя из выбранного положения здания в мульде сдвижения.

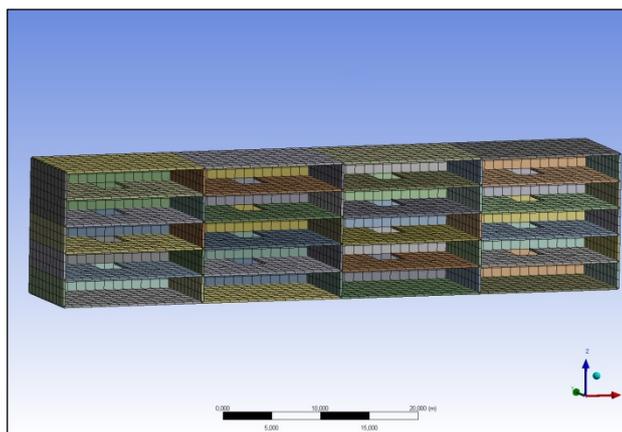


Рисунок 10. Конечно-элементная модель панельного здания

Для качественной оценки мульды сдвижения условно представим поверхность вращения образованной полупериодом функции косинуса:

$$f(x) = -\frac{h}{2} \cdot \left[\cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{L}\right) + 1 \right], \tag{1}$$

где h – максимальная величина осадки (в середине мульды);
 L – ширина мульды.

В программном комплексе ANSYS выполнен ряд расчетов, моделирующих различное положение здания в мульде оседания. По результатам расчетов составлена таблица 1. В процессе моделирования варьировались следующие параметры: положение здания в мульде оседания и угол поворота продольной оси здания относительно оси X. Рассмотрено пять вариантов положения здания в мульде оседания, расположение характеризуется положением центра здания в плане (см. рисунок 11) от центра мульды до ее края с равными интервалами.

Таблица 1. Максимальные значения интенсивности напряжений, МПа

		Угол поворота продольной оси здания, относительно оси X					
		0°	10°	20°	30°	40°	45°
Положение здания	1	12,17	12,15	12,16	12,16	12,16	12,17
	2	9,54	9,78	10,08	10,40	10,66	10,77
	3	2,02	2,97	4,11	5,32	6,40	6,87
	4	8,20	8,97	9,32	8,96	7,93	7,20
	5	8,83	9,29	9,75	9,55	8,72	8,09

На основании данных таблицы 1 для каждого положения здания относительно плоского дна мульды построим графики изменения интенсивностей напряжений в зависимости от поворота здания и скоростей изменения значений интенсивностей напряжений. Графики представлены на рисунках 12 и 13 соответственно.



Рисунок 11. Положения здания в мульдe оседания

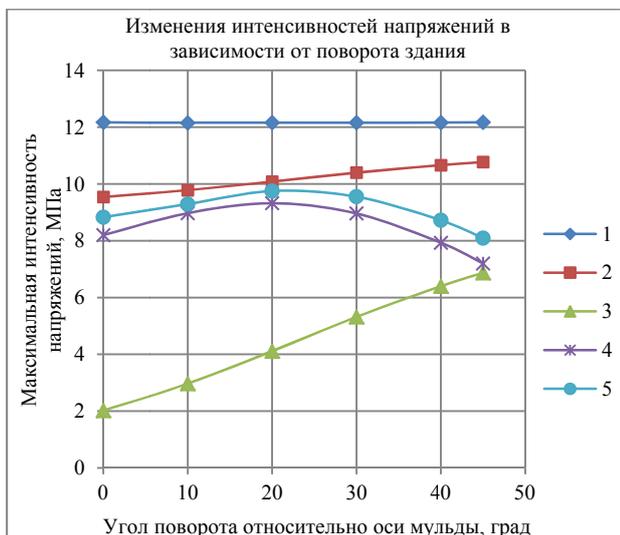


Рисунок 12. Изменение интенсивностей напряжений в зависимости от поворота здания

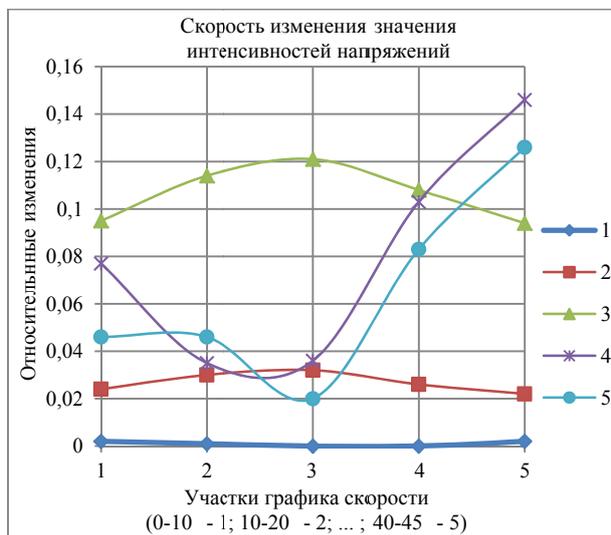


Рисунок 13. Скорости изменения значений интенсивностей напряжений

3. Оценка НДС типовой секции

Рассматриваются объекты типовой застройки – жилые панельные пятиэтажные здания типовой серии 1-468А, построенные в 1960-х гг. Конструктивная схема здания бескаркасная с поперечными несущими стенами и наружными самонесущими панелями. Лестничные марши и площадки сборные железобетонные. Пространственная жесткость и геометрическая неизменяемость зданий обеспечивается продольными вертикальными диафрагмами жесткости, жесткостью поперечных стен и дисков перекрытий [27].

План типовой секции представлен на рисунке 14.

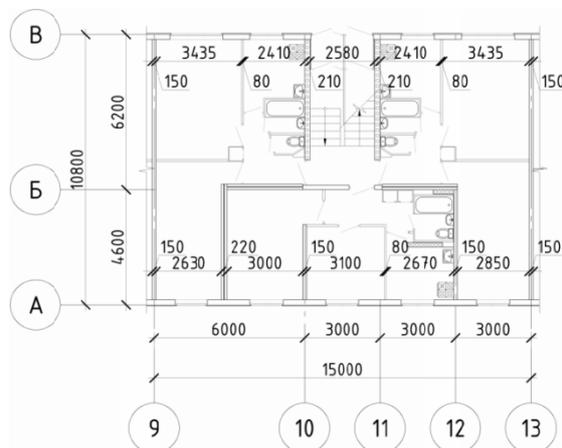


Рисунок 14. План типовой секции

Воробьев А.В., Кашеварова Г.Г. Адаптивные модели краткосрочного прогноза оседания земной поверхности и определение наиболее неблагоприятного положения здания в мульдe сдвижения

Имеются результаты предварительного детального обследования нескольких зданий, которые показывают, что разрушение здания обычно начинается в зонах *растянутых стыков* [27].

Для оценки несущей способности зданий и прогнозирования развития процесса деформирования применялось численное моделирование и современные программные комплексы. Это наиболее целесообразный подход, который в настоящее время используется для решения подобных задач [9–13, 28]. Традиционно для выполнения расчетов реальный физический объект заменяется некоторой аппроксимирующей (расчетной) моделью, при этом целесообразно иметь не одну модель, а систему аппроксимирующих моделей [26–28].

Вначале для приближенной оценки здание рассматривалось как упругий стержень [8]. От кинематического воздействия равномерного растяжения определялось значение критического удлинения здания ϵ_{cr} . Величина ϵ_{cr} не должна быть больше, чем суммарная длина стыков здания (вдоль его оси), умноженная на деформацию стали в момент разрыва (для стали Ст 3 она составляет 26%). При других видах деформирования предельно допустимый прогиб/выгиб здания δ можно определить, рассматривая случай, когда в одном из сечений здания-стержня удлинение достигнет величины ϵ_{cr} .

Далее все расчеты выполнялись в конечно-элементном программном комплексе ANSYS, верифицированном в Российской академии архитектуры и строительных наук.

Конструктивная система здания и решение связей между панелями должны обеспечивать надежность конструкций здания при эксплуатационных и аварийных воздействиях [9, 29], а связи во всех стыках должны обеспечивать восприятие соответствующих расчетных усилий.

Вертикальные стыки между панелями несущих и самонесущих стен должны обеспечивать восприятие усилий сжатия, растяжения и сдвига. Горизонтальные стыки между панелями несущих стен должны обеспечивать восприятие усилий от внецентренного сжатия стены из ее плоскости и изгиба со сдвигом в плоскости стены.

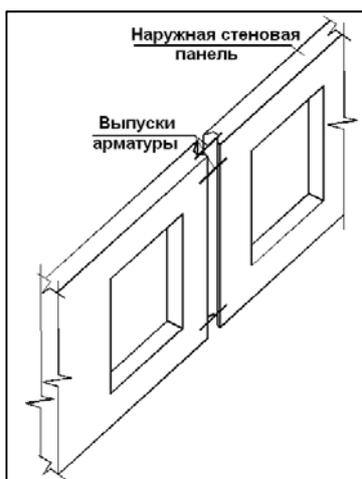


Рисунок 15. Зона стыка самонесущих панелей здания

Для изучения напряженно-деформированного состояния конструкции непосредственно в зоне стыка при растяжении и для определения предельного значения перемещения вначале была рассмотрена пространственная модель соединения наружных самонесущих панелей (рисунок 15). Панели в стыках соединяются друг с другом арматурой и двумя листовыми накладками. Общая площадь металла соединения в рассматриваемых зданиях составляет $\sim 15 \text{ см}^2$. Заполнение стыка бетоном на рисунке условно не показано.

При создании расчетной модели использовались 3-мерные 8-узловые конечные элементы SOLID65, имеющие по три степени свободы в каждом узле. Эти элементы рекомендуется использовать для расчета напряженно-деформированного состояния конструкций, выполненных из неоднородного материала (бетона/железобетона). При этом можно учесть наличие арматуры в бетоне, разнообразные включения в материал, процесс образования и развития трещин при больших или критических нагрузках.

Эффективные характеристики тензора жесткости железобетона определяются как смесь упругих характеристик компонент с учетом их направлений. В арматуре при этом могут возникать пластические деформации. Критерий прочности предусматривает возможность возникновения в элементе разного вида напряженного состояния. Разрушение (трещинообразование) происходит, когда интенсивность напряжений в элементе достигает критического значения. В этом случае материал теряет способность сопротивляться формоизменению, сохраняя способность сопротивляться всестороннему сжатию (если такой вид напряженного состояния возникнет после перераспределения напряжений и при дальнейшем деформировании).

При моделировании панелей в зоне стыка учитывалось наличие арматуры – стальных стержней диаметром 18 мм – и раствора, хотя обычно бетон в растянутых стыках не учитывается.

Как показали результаты нелинейного расчета, в зависимости от прочностных (предел прочности на растяжение и сжатие) и жесткостных (модуль упругости) физико-механических характеристик железобетона первые трещины в бетоне появляются при растяжении на величину $0,05 \div 0,4$ мм. При появлении трещин в зоне стыка происходит перераспределение напряжений в железобетоне, вся нагрузка передается на арматуру, которая и обеспечивает прочность соединения. Картина трещин соответствует данным натурных обследований.

Учитывая, что здание состоит из типовых блок-секций, *следующая расчетная модель* представлена в виде секции-этажа длиной 15 м для определения местоположения наиболее слабого конструктивного элемента здания (рисунок 16).

Дискретизация секции-этажа выполнялась разными типами конечных элементов, включенными в библиотеку ПК ANSYS: *панели и перекрытия* здания моделировались пластинчатыми элементами SHELL93; *стыки самонесущих панелей* – стержневыми элементами BEAM188 со свойствами арматурной стали AIII (диаметром 18 мм – вверху и внизу секции и 8 мм – между ними); *платформенные горизонтальные и вертикальные стыки* – пластинчатыми элементами SHELL281 с учетом реальных размеров конструктивного решения узла (70 x 50 x 8 мм).

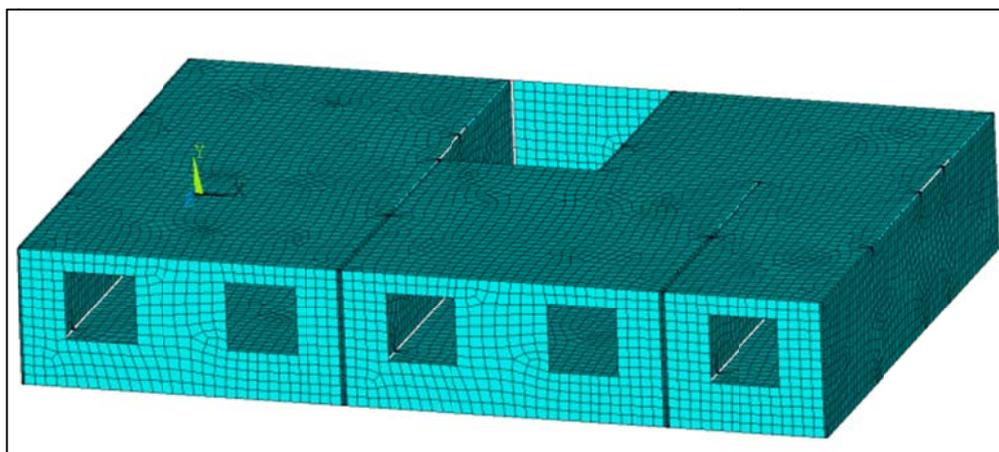


Рисунок 16. КЭ модель типовой секции

Рассматривались разные варианты кинематического воздействия на конструкции здания (растяжение, сжатие и изгиб), вызванного развитием деформаций в мульдe сдвига земной поверхности.

Результаты линейного расчета и уточненного нелинейного анализа напряженно-деформированного состояния конструкций для всех видов нагрузений показали, что при разных формах кинематического воздействия напряжения локализуются в стальных закладных элементах и наиболее нагружены стыки в зоне лестничной клетки. Это было выявлено и при обследовании зданий, находящихся в подобных условиях нагружения.

На рисунке 17 представлено изображение плит покрытия лестничной клетки, выполненное при обследовании здания, находящегося на подработанной территории. Выполнено переопирание плит покрытия для предотвращения внезапного обрушения.



Рисунок 17. Щели в стыках плит покрытия и стен лестничной клетки

На рисунке 18 приведены результаты расчета эквивалентных напряжений в стыках секции этажа при растяжении. Для определения наиболее нагруженных элементов расчет выполнен в линейной постановке без учета пластичности.



Рисунок 18. Эквивалентные напряжения в стыках при растяжении (линейный расчет)

При описании физической нелинейности материала арматурной стали принималась модель билинейного изотропного упрочнения для проведения анализа при больших деформациях. Это сочетание условия текучести Мизеса с изотропным расширением поверхности пластичности. Предел текучести арматурной стали $\sigma_T = 240$ МПа.

При выполнении нелинейного расчета использовалась пошаговая процедура приложения кинематического воздействия, т. е. перемещения увеличивались пошагово за счет малых приращений, чтобы гарантировать получение достоверной зависимости нагрузка – перемещение. При этом на каждом шаге выполнялись равновесные итерации и оценивалась сходимость итерационного процесса методом Ньютона – Рафсона.

Пластические деформации для стальных закладных элементов типовой секции при растяжении и оседании представлены на рисунках 19 и 20 соответственно.

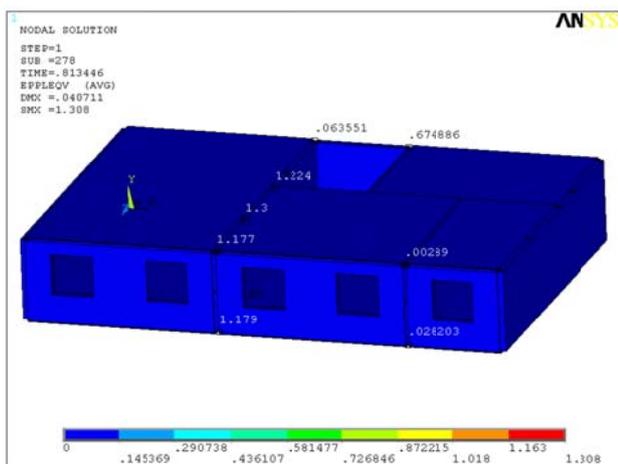


Рисунок 19. Эквивалентные пластические деформации при растяжении

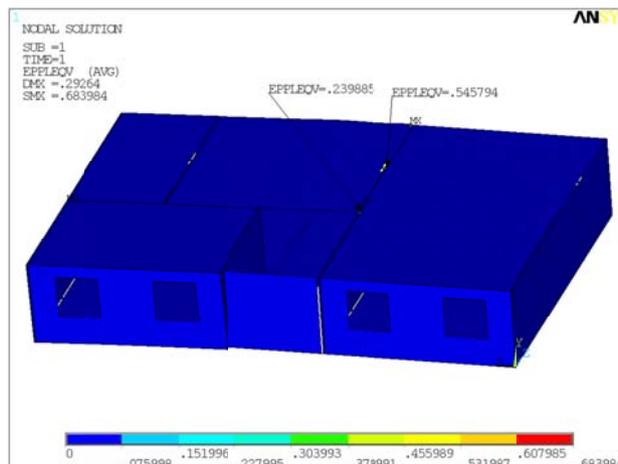


Рисунок 20. Эквивалентные пластические деформации при оседании

Сделано предположение, что при изгибе здания предельное состояние также наступит тогда, когда в одном из стальных закладных элементов здания будет достигнуто критическое удлинение ϵ_{cr} .

На основании расчетов для типовой секции составлена таблица 2.

Таблица 2. Максимальные значения интенсивности напряжений, МПа

Тип ГУ	Деформация, %	Приложенные перемещения, мм	Радиус кривизны пов-ти, м
Растяжение	1,8	1,24	∞
	2,4	1,47	∞
Оседание	1,7	2,11	4245
	2,0	2,44	2459

Выводы

Из выбранных моделей краткосрочного прогнозирования лучшие результаты показала модель Хольта. Погрешность тестового краткосрочного четырехлетнего прогноза, выполненного при помощи модели Хольта, в первые три года не превышает 3,00%. Погрешность второго шага прогнозирования при сравнении с фактическими данными оседания поверхности составляет 7,07%.

Рисунок 4 позволяет оценить динамику нарастания напряжений при изменении угла поворота здания относительно мульды оседания. Следует отметить, что поворот здания относительно оси мульды эквивалентен смещению плоского дна мульды относительно здания. Положение здания 3 (рисунок 11) характеризуется наиболее быстрым изменением напряжений. Положения 4 и 5 превосходят по скорости изменения напряжений положение 3 лишь в узком диапазоне углов от 40° до 45°. Положения 1 и 2, располагающиеся в области плоского дна, наименее чувствительны к изменению ориентации в пространстве.

Из анализа значений, полученных в результате численного моделирования, а также из графиков, представленных на рисунках 4 и 5, следуют выводы.

1. Наиболее опасным с точки зрения величины напряжений является положение здания 1. При таком положении здание подвергается изгибным деформациям, проседая в середине. На рисунках 21 и 22 представлены изополя интенсивностей напряжений для здания в таком положении.

2. Опасным с точки зрения эксплуатации здания является положение 3. При таком положении деформации здания постоянно нарастают и реализуются с максимальной скоростью, что может привести к аварийной ситуации при относительно невысоком уровне напряжений.

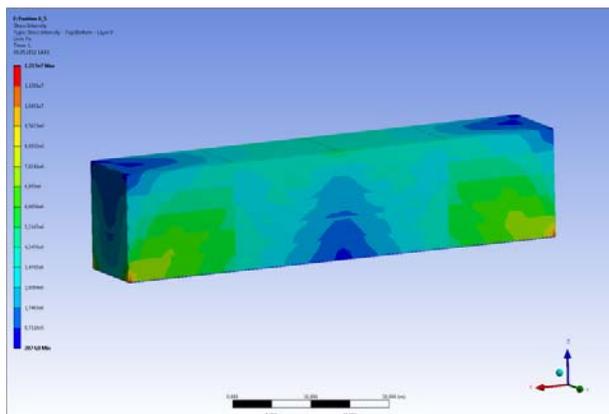


Рисунок 21. Интенсивность напряжений в стеновых панелях, МПа

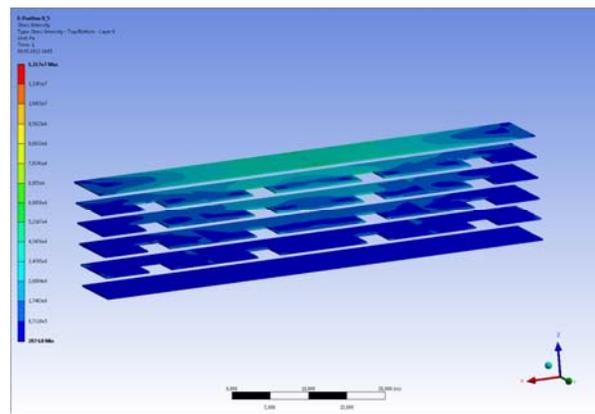


Рисунок 22. Интенсивность напряжений в перекрытиях, МПа

Проведенные вычислительные эксперименты для панельного здания типовой серии 1-468А позволили выявить некоторые особенности напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов здания, позволяющие в дальнейшем прогнозировать наличие аварийного состояния здания или возможность его дальнейшей эксплуатации.

Анализ напряженно-деформированного состояния наружных стеновых панелей из ячеистого бетона показал, что в зависимости от физико-механических свойств железобетона первые трещины в бетоне появляются при растяжении на величину 0,05...0,4 мм. При появлении трещин бетон исключается из работы и прочность в зоне стыка обеспечивает арматура. На поверхности панелей образуются характерные трещины непосредственно по стыку панелей и в углах оконных проемов, что совпадает с данными натурных обследований.

Во всех рассмотренных случаях кинематического воздействия наибольшая концентрация напряжений отмечается в стальных элементах, соединяющих лестничные площадки со стеновыми панелями, и в закладных деталях в уровне пола в нижнем углу лестничной клетки. Значительные напряжения возникают в вертикальных стыках панелей слева и справа от лестничной клетки. Наиболее опасным элементом конструкции является нижнее примыкание плит перекрытия к несущей стене в зоне лестничной клетки.

Литература

1. Бараненко Ф.Ф. Математические методы и модели краткосрочного прогноза чрезвычайных ситуаций на постоянно наблюдаемых природных объектах: автореф. .. дисс. канд. физ.-мат. наук. Ставрополь, 2011. 20 с.
2. Москвичев В.В. Моделирование катастрофических процессов в природной среде [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nsc.ru/win/sbras/rep/rep2005/tom2/pdf/005.pdf> (дата обращения: 05.02.2008).
3. Кузьмин В. А. Фундаментальные основы автоматизированного прогнозирования дождевых паводков // Естественные и технические науки. 2009. №6. С. 271–285.
4. Войтюк А.В., Бараненко Ф.Ф., Семенчин Е.А. Применение адаптивных моделей линейного роста для краткосрочного прогноза наполняемости водохранилища // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2007. Т. 14. Вып. 1. С. 98–99.
5. Варшанина Т.П., Митусов Д.В., Плисенко О.А., Стародуб И.В. Нейросетевая модель прогноза паводков на малых реках Адыгеи // Известия РАН. Серия географическая. 2007. №6. С. 87–93.
6. Васильев А.С. Инженерно-технологические проблемы мониторинга и прогнозирования состояния гидросферы атмосферных и морских экологических систем // Наука и технологии в промышленности. 2006. №3. С. 65–71.
7. Ермаков В.В., Патраков А.Н. Мониторинг несущих строительных конструкций жилых зданий, построенных на подрабатываемых территориях без конструктивных мер защиты // Вестник ПГТУ. Строительство и архитектура. 2010. №1. С. 63–71.
8. Кашеварова Г.Г., Сон М.П., Воробьев А.В. Определение предельно допустимых деформаций панельных зданий, эксплуатируемых на подработанной территории // Материалы Российской конференции с международным участием «Геотехнические проблемы проектирования зданий и

Воробьев А.В., Кашеварова Г.Г. Адаптивные модели краткосрочного прогноза оседания земной поверхности и определение наиболее неблагоприятного положения здания в мулде сдвижения

- сооружений на карстоопасных территориях». 22–23 мая 2012, г. Уфа. Уфа: БашНИИстрой, 2012. С. 51–55.
9. Кашеварова Г.Г., Фаизов И.Н., Зобачева А.Ю. Конструктивные меры защиты зданий и сооружений на подработанной территории // Вестник ПГТУ. Строительство и архитектура. 2010. №1. С. 72–77.
 10. Золотова Л.Т., Мараков В.Е., Теннисон Л.О. Прогноз развития оседаний и деформаций земной поверхности на площадях, подработанных пластом В карналлитового состава // Маркшейдерский вестник. 2007. №4. С. 34–37.
 11. Зацепин М.А. Математическое моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния пологозалегающего массива горных пород // Вестник СПбГУ. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2009. Вып. 1. С. 68–73.
 12. Кургузов В.Д. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород, ослабленного квадратной выработкой // Вычислительные технологии. 2003. Том 8. №5. С. 84–93.
 13. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г. Численная модель для расчёта напряженно-деформированного состояния грунтового массива и земной поверхности при добыче калийных руд // Маркшейдерский вестник. 2002. №3. С. 41–46.
 14. Hong X., Yong K., Mou Z.. Prediction and discuss of strap mining subsidence by numerical simulation analysis and its engineering apply // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 308-310. Pp. 1683–1687.
 15. Abidin H.Z., Andreas H., Gumilar I., Fukuda Y., Pohan Y., Deguchi T.. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development // Natural Hazards. 2011. Vol. 59. Issue 3. Pp. 1753–1771.
 16. Jing W., Yang C., Kong, J., Ji W. Risk analysis of ground subsidence accidents caused by underground storage caverns in salt rock // Rock and Soil Mechanics. 2011. Vol. 32. No.S2. Pp. 544–550.
 17. СП 21.13330.2012. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах.
 18. ВСН 32-77 Инструкция по проектированию конструкций панельных жилых зданий. М.: Госгражданстрой, 1978.
 19. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. М.: Финансы и статистика, 2003. 416 с.
 20. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977. 200 с.
 21. Тутубалин В.Н. Статистическая обработка рядов наблюдений. М.: Знание, 1973. 64 с.
 22. Holt C.C. Forecasting trends and seasonals by exponentially weighted moving averages // ONR. Memorandum 52, Carnegie Institute of Technology. Pittsburgh, 1957.
 23. Brown R.G. Smoothing forecasting and prediction of discrete time series. New Jersey: Prentice-Hall, 1963. 468 p.
 24. Brown R.G., Meyer R.F. The fundamental theorem of exponential smoothing // Operations Research. 1961. Vol. 9. No.5. Pp. 673–685.
 25. Winters P.R. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages // Management Science. 1960. Vol. 6. No.3.
 26. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев: Сталь, 2002. 600 с.
 27. Кашеварова Г.Г., Воробьев А.В. Численный анализ возможности сохранения жилых панельных зданий на подработанной территории // Тезисы докладов IV международного симпозиума «Актуальные проблемы комплексного моделирования конструкций и сооружений». Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. С. 77–79.
 28. Белостоцкий В.Н. Сидоров А.М., Акимов П.А., Кашеварова Г.Г. Математическое моделирование техногенной безопасности ответственных строительных объектов мегаполисов // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2010. Т. 06. №1-2. С. 45–64.
 29. Шапиро Г.И., Юрьев Р.В. К вопросу о построении расчетной модели панельного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2004. №12. С. 32–33.

*Александр Владимирович Воробьев, г. Пермь, Россия
Тел. моб.: +7(922)641-74-06; эл. почта: km02@yandex.ru*

*Галина Геннадьевна Кашеварова, г. Пермь, Россия
Тел. моб.: +7(912)884-38-04; эл. почта: gkgkash@mail.ru*

© Воробьев А. В., Кашеварова Г.Г., 2013

Воробьев А.В., Кашеварова Г.Г. Адаптивные модели краткосрочного прогноза оседания земной поверхности и определение наиболее неблагоприятного положения здания в мульдe сдвижения

doi: 10.5862/MCE.44.2

Adaptive models of short-term surface subsidence prediction and detection of the most hazardous building position in displacement trough

A.V. Vorobev,

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
+7(922)6417406; e-mail: km02@yandex.ru

G.G. Kashevarova,

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
+7(912)8843804; e-mail: ggkash@mail.ru

Key words

adaptive prediction model; subsided area; surface subsidence; displacement trough; finite-element technique

Abstract

Surface subsidence prediction is needed to evaluate mechanical safety and make it possible to provide further operation of buildings located in subsided area. The process of surface subsidence is studied by means of adaptive model of short-term time sequence prediction. The aim of adaptive forecast method is to build self-adjusting mathematical models that can show time-varying conditions and give accurate evaluation of given time sequence elements. Such models are primarily used for short-term forecasting.

An appropriate forecast model is chosen according to the comparison of forecast values with the full-scale data of control benchmark subsidence. The results of modelling analysis show that Holt's model forecasting has the nearest equivalent values to real subsidence value.

As a result of numerical modelling the worst position of a five-storey panel building in displacement trough and stress-strain behavior of a standard panel building are defined. Numerical modelling results are proved by survey data.

References

1. Baranenko F.F. *Matematicheskiye metody i modeli kratkosrochnogo prognoza chrezvychaynykh situatsiy na postoyanno nablyudayemykh naturnykh ob'yektakh* [Mathematical methods and models of short-term forecasting of emergency situations on constantly observed natural objects]. PhD thesis. Stavropol, 2011. (rus)
2. Moskvichev V.V. *Modelirovaniye katastroficheskikh protsessov v prirodnoy srede* [Modeling catastrophic processes in the natural environment]. [Online resource]. URL: <http://www.nsc.ru/win/sbras/rep/rep2005/tom2/pdf/005.pdf> (accessed: February 02, 2008). (rus)
3. Kuzmin V. A. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki*. 2009. No. 6. Pp. 271–285. (rus)
4. Voytyuk A.V., Baranenko F.F., Semenchin Ye.A. *Obozreniye prikladnoy i promyshlennoy matematiki*. 2007. Vol. 14. No. 1. Pp. 98–99. (rus)
5. Varshanina T.P., Mitusov D.V., Plisenko O.A., Starodub I.V. *Izvestiya Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2007. No 6. Pp. 87–93. (rus)
6. Vasilyev A.S. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti*. 2006. No. 3. Pp. 65–71. (rus)
7. Yermakov V.V., Patrakov A.N. *Vestnik PGTU. Stroitelstvo i arkhitektura*. 2010. No. 1. Pp. 63–71. (rus)
8. Kashevarova G.G., Son M.P., Vorobev A.V. *Materialy Rossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Geotekhnicheskiye problemy proyektirovaniya zdaniy i sooruzheniy na karstoopasnykh territoriyakh* [Materials Russian conference with international participation "Geotechnical problems designing buildings and structures on karst areas"]. 22–23 may 2012. Ufa, 2013. Pp. 51–55. (rus)
9. Kashevarova G.G., Faizov I.N., Zobacheva A.Yu. *Vestnik PGTU. Stroitelstvo i arkhitektura*. 2010. No.1. Pp. 72–77. (rus)
10. Zolotova L.T., Marakov V.Ye., Tennison L.O. *Mine surveying bulletin*. 2007. No 4. Pp. 34–37. (rus)

Vorobev A.V., Kashevarova G.G. Adaptive models of short-term surface subsidence prediction and detection of the most hazardous building position in displacement trough

11. Zatsepin M.A. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Seriya 10. Prikladnaya Matematika. Informatika. Protsessy Upravleniya*. 2009. No. 1. Pp. 68–73. (rus)
12. Kurguzov V.D. *Vychislitelnyye tekhnologii*. 2003. Vol. 8. No 5. Pp. 84–93. (rus)
13. Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G. *Mine surveying bulletin*. 2002. No. 3. Pp. 41–46. (rus)
14. Hong X., Yong K., Mou, Z. Prediction and discuss of strap mining subsidence by numerical simulation analysis and its engineering apply. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 308-310. Pp. 1683–1687.
15. Abidin H.Z , Andreas H., Gumilar I., Fukuda Y., Pohan Y., Deguchi T. Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Natural Hazards*. 2011. Vol. 59. Issue 3. Pp. 1753–1771.
16. Jing W., Yang C., Kong J., Ji W. Risk analysis of ground subsidence accidents caused by underground storage caverns in salt rock. *Rock and Soil Mechanics*. 2011. Vol. 32. No. S2. Pp. 544–550.
17. *SP 21.13330.2012 Zdaniya i sooruzheniya na podrabatyvayemykh territoriyakh i prosadochnykh gruntakh* [Set of rules 21.13330.2012. Buildings and structures on subsiding areas and subsiding soils]. (rus)
18. *VSN 32-77 Instruksiya po proyektirovaniyu konstruksiy panelnykh zhilykh zdaniy* [Engineering Instructions of panel buildings design]. Moscow: Gosgrazhdanstroy, 1978. (rus)
19. Lukashin Yu.P. *Adaptivnyye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov* [Adaptive methods of short-term time series prediction]. Moscow: Finansy i statistika, 2003. 416 p. (rus)
20. Chetyrkin Ye.M. *Statisticheskiye metody prognozirovaniya* [Statistical methods for forecasting]. Moscow, Statistics, 1977. 200 p. (rus)
21. Tutubalin V.N. *Statisticheskaya obrabotka ryadov nablyudeniy* [Statistical processing of the series of observations]. Moscow: Nauka, 1973. 64 p. (rus)
22. Holt C.C. Forecasting trends and seasonals by exponentially weighted moving averages. *O.N.R. Memorandum 52*, Carnegie Institute of Technology. Pittsburgh, 1957.
23. Brown R.G. *Smoothing forecasting and prediction of discrete time series*. New Jersey: Prentice-Hall, 1963. 468 p.
24. Brown R.G., Meyer R.F. The fundamental theorem of exponential smoothing. *Operations Research*. 1961. Vol.9. No 5. Pp. 673–685.
25. Winters P.R. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. *Management Science*. 1960. Vol. 6. No 3. Pp. 324–342.
26. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Computational models of structures and the possibility of their analysis]. Kiev: Сталь, 2002. 600 p. (rus)
27. Kashevarova G.G., Vorobev A.V. *Tezisy dokladov IV mezhdunarodnogo simpoziuma «Aktualnyye problemy kompleksnogo modelirovaniya konstruksiy i sooruzheniy»* [Abstracts of the IV International Symposium "Actual problems of complex modeling of structures and facilities"]. Chelyabinsk: Izdatelskiy tsentr YuUrGu, 2012. Pp. 77–79. (rus)
28. Belostotskiy A.M., Sidorov V.N., Akimov P.A., Kashevarova G.G. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2010. Vol. 06. No 1-2. Pp. 45–64. (rus)
29. Shapiro G.I., Yuryev R.V. *Industrial and civil engineering*. 2004. No. 12. Pp. 32–33. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 10–22