

# РАСЧЕТ ОСАДОК ДЕФОРМАЦИЙ В CREDO

**А.Ю. Будо** (Белорусский национальный технический университет)

В 2009 г. окончил Полоцкий государственный университет по специальности «геодезия». С 2011 г. работает в компании «Кредо-Диалог», в настоящее время — инженер-аналитик геодезического направления. Старший преподаватель кафедры инженерной геодезии Белорусского национального технического университета. Аспирант Полоцкого государственного университета.

**Д.М. Васильков** (Белорусский государственный университет)

В 1985 г. окончил факультет прикладной математики Белорусского государственного университета по специальности «прикладная математика». С 1994 г. работает в компании «Кредо-Диалог», в настоящее время — руководитель проектов разработки продуктов геодезического направления. Доцент кафедры дискретной математики и алгоритмики Белорусского государственного университета. Кандидат физико-математических наук.

**Д.В. Грохольский** («Кредо-Диалог»)

В 2007 г. окончил Военный институт (топографический) военно-космической академии им. А.Ф. Можайского (Санкт-Петербург) по специальности «астрономогеодезия». С 2012 г. работает в компании «Кредо-Диалог», в настоящее время — инженер-аналитик геодезического направления.

Недооценка деформационных процессов при строительстве и эксплуатации объектов может привести к необратимым экономическим, экологическим и социальным последствиям. Чтобы свести к минимуму риск повреждения и разрушения конструкций, необходим постоянный мониторинг осадочно-деформационных процессов, воздействующих на многоэтажные здания, а также промышленные сооружения, такие как ГЭС, атомные электростанции, горнодобывающие шахты и т. д.

Программа CREDO Расчет Деформаций занимает особое место в комплексной технологии мониторинга деформаций, предоставляя инженеру-геодезисту удобный инструмент для сбора данных геодезических наблюдений и их многоплановой интерпретации. В этой статье представлен краткий обзор вычислительных возможностей новой версии программы, выпущенной в ноябре 2013 г., с описанием новых и

традиционных подходов к решению сопутствующих прикладных задач.

## ▼ Наблюдения как основа модели

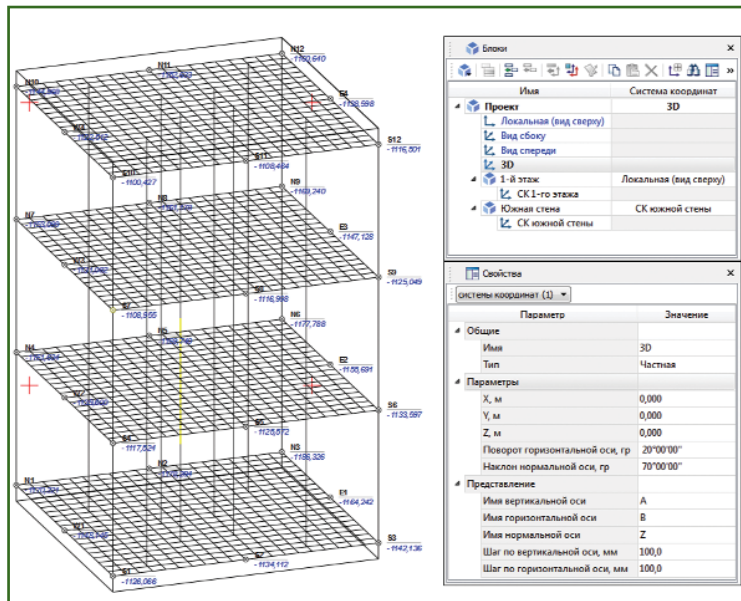
Технология мониторинга деформаций основана на последовательном накоплении и обработке данных наблюдений — отметок и плановых координат специальных осадочных и осадочно-деформационных марок, закрепляемых на объекте. Данные поступают дискретно через примерно равные интервалы времени, длительность которых зависит от конкретного объекта. Фрагмент данных, содержащий информацию об измерениях на определенный фиксированный момент времени, составляет *цикл наблюдений*.

В CREDO Расчет Деформаций данные циклов поступают из нескольких источников: они могут быть введены вручную, импортированы из текстового файла произвольного формата или загружены в виде

проектов приложений CREDO\_DAT и CREDO Нивелир. Кроме наблюдений программа позволяет загружать не привязанные ко времени растровые подложки и векторные примитивы в различных форматах, описывающие проектное положение объекта или топографический план исследуемой территории.

Для качественной интерпретации данных наблюдений недостаточно выполнить статистический анализ и выпустить необходимые графические и текстовые отчеты. Программа CREDO Расчет Деформаций предоставляет пользователю возможность увидеть деформационный процесс в срезе многих параметров, в динамике и с максимальной наглядностью.

Задача это непростая, особенно для сооружений сложной структуры. В программе комплексные объекты декомпозируются на более простые составляющие — *блоки*, для кото-



**Рис. 1**  
Представление многоэтажного здания в частной системе координат

рых пользователь задает требуемые системы координат и графические представления, позволяющие работать с частью конструкции как с отдельным объектом. Такой подход позволяет создавать произвольные виды элементов сооружений в плоскостях, параллельных стенам зданий, рядам колонн и другим вертикальным и наклонным конструкциям, а также проводить независимый анализ осадок и деформаций каждого отдельного блока многоблочного сооружения или всех стен и этажей многоэтажного здания (рис. 1).

#### ▼ Оценка надежности наблюдений

Контрольные пункты — это реперы опорной плановой или высотной сети, с которых выполняются измерения пространственного положения марок, закрепленных на здании или сооружении. Находясь в непосредственной близости от наблюдаемого объекта, сеть контрольных пунктов также может быть подвержена смещениям, что негативно отражается на достоверности деформационной модели.

CREDO Расчет Деформаций позволяет провести контроль устойчивости плановой и высотной сети контрольных пунктов с помощью нескольких методов. Два из них относятся к плановой сети: это метод последовательного анализа и классический метод наименьших квадратов. На серии тестов первый метод показал лучшую стабильность, особенно при малом числе контрольных пунктов. Идея последовательного анализа состоит в поиске наиболее устойчивой опорной стороны, относительно которой затем вычисляются параметры аффинного преобразования, совмещающего пункты в начальном и текущем циклах с минимальным суммарным отклонением. После применения этого преобразования простой статистический анализ позволяет определить отклонения контрольных пунктов, превышающие установленный допуск.

Похожий принцип лежит в основе анализа устойчивости высотной сети, где методом простого перебора программа находит пункт с наиболее ус-

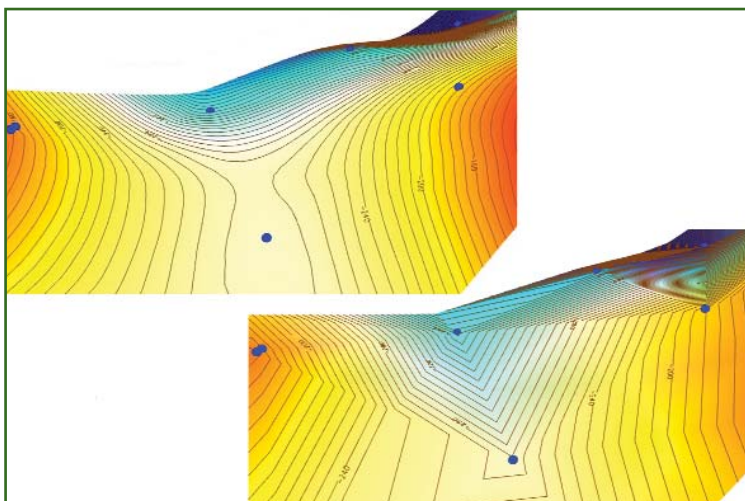
тойчивой отметкой и сравнивает превышения относительно этого пункта в начальном и конечном циклах.

#### ▼ Модель деформационного процесса

В основе решения задачи интерпретации данных наблюдений лежит качественная модель деформационной поверхности, описывающей отклонения точек объекта в текущем цикле относительно начального цикла. Исходными данными для ее построения являются плановые положения марок и их текущие отклонения.

Хорошо известно, что кусочно-линейная триангуляционная поверхность с вершинами в заданных точках является приемлемой моделью для решения многих инженерных задач, включая моделирование рельефа местности. Однако такой подход совершенно не пригоден для моделирования деформаций: закрепляя марки на поверхности объекта, инженер не знает заранее положения структурных линий и экстремальных точек («пиков» и «впадин»), определяющих топологические особенности будущей деформационной поверхности. Хуже того, повторяя контуры объекта, марки могут быть распределены крайне неравномерно например, в форме «креста» или вдоль одной линии, что значительно ухудшит интерполяционные свойства кусочно-линейной модели.

В CREDO Расчет Деформаций применен подход, основанный на методе конечных элементов и успешно применяемый в САПР для моделирования форм упругих поверхностей. Поверхность строится за несколько шагов. Сначала создается сеть гущения, затем для вычисления отметок сгенерированных вершин решается задача наименьших квадратов с минимизацией интегральной кривизны резуль-



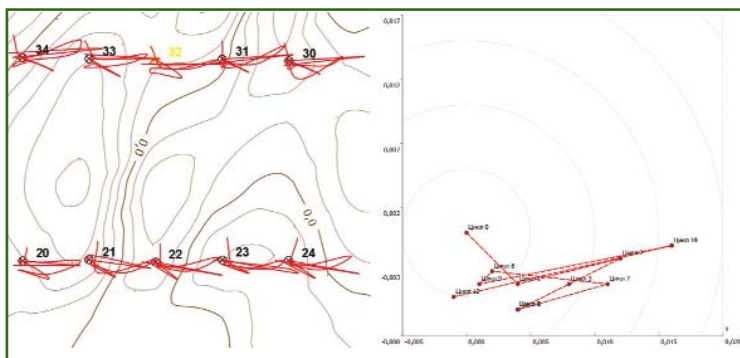
**Рис. 2**  
Поверхности, описывающие осадки за период: кусочно-гладкая (вверху) и кусочно-линейная (внизу)

тирующей поверхности. На последнем шаге для каждого треугольного участка вычисляются коэффициенты функции шивки, обеспечивающие сглаживание поверхности на границах треугольников.

Важно отметить, что данная модель тем более адекватно описывает деформационный процесс, чем в большей степени исследуемая поверхность удовлетворяет условию упругости. Для неупругих поверхностей может быть применен классический алгоритм, основанный на кусочно-линейной интерполяции (рис. 2).

Условию упругости удовлетворяют все железобетонные и металлические конструкции, включая монолитные сооружения, плотины и пролеты мостов. Степень упругости грунта определяется его геологическим строением. К условно неупругим поверхностям можно отнести стенки карьеров, оползнеопасные участки земной поверхности и т. д. Пользователь самостоятельно выбирает в программе нужный тип модели, соответствующий конкретному наблюдаемому объекту.

CREDO Расчет Деформаций позволяет построить деформа-



**Рис. 3**  
Траектории плановых смещений марок и радиальный график смещения одной марки

ционную поверхность по другим параметрам:

- мгновенная скорость вертикального смещения;
- кривизна поверхности смещения;
- относительное изменение локальной площади (дилатация);
- локальное растяжение и локальное сжатие.

Как видно из рис. 2, для отображения деформационной поверхности в программе используется трехмерный вид с множеством режимов, настройкой которых управляет пользователь. Существуют также традиционные двумерные представления — градиентная заливка и карта изолиний. Кроме

того, программа позволяет наблюдать динамику деформационного процесса в режиме анимации.

Для графической интерпретации плановых наблюдений используются масштабируемые траектории движения марок между выбранными циклами. Для отдельной марки может быть создан радиальный график развития деформаций во времени (рис. 3).

▼ **Расчет и представление дилатаций**

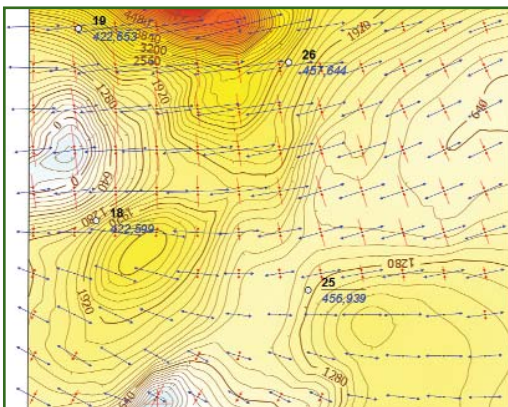
В процессе деформаций земной поверхности установленные на ней марки смещаются относительно друг друга,

что сигнализирует об уплотнении или разуплотнении отдельных участков. Обычно подобные явления сопровождаются разного рода тектоническими процессами или, чаще всего, являются результатом техногенной активности промышленных и горнодобывающих предприятий.

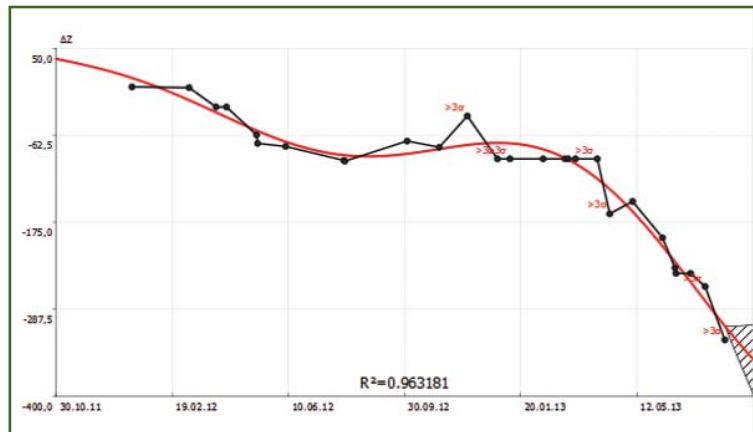
В геологии локальное изменение площади поверхности называется *дилатацией*. Поскольку дилатационные процессы непосредственно предшествуют осадкам или вспучиваниям почвы, они являются объектом постоянного мониторинга служб, отвечающих за экологическую безопасность.

В CREDO Расчет Деформаций расчет дилатации выполняется для всей области объекта. На первом шаге создаются две деформационные поверхности смещения плановых координат от начального цикла — отдельно для координаты X и координаты Y. Построенные поверхности позволяют вычислить смещения в узлах регулярной прямоугольной сетки, покрывающей заданную область. Далее последовательно рассматривается каждая тройка соседних узлов сетки, образующая локальный треугольник. Вычисленные в узлах смещения позволяют определить и сравнить площадь этого треугольника в начальном цикле с его площадью в конечном цикле. Разность площадей дает возможность приблизительно оценить в центре масс данного треугольника дилатацию и другие параметры — локальное вращение и главные векторы сжатия-растяжения.

Абсолютные значения дилатации, сжатия и растяжения представлены в программе в виде деформационной поверхности. Кроме того, в окне плана может быть отображена регулярная сетка векторов сжатия и растяжения. Значения углов вращения локального треугольника можно отобразить в виде подписи (рис. 4).



**Рис. 4**  
Поверхность дилатации и сетка векторов сжатия-растяжения



**Рис. 5**  
График аппроксимации ряда наблюдений для одной марки

#### ▼ Поиск закономерностей и прогнозирование

Анализ развития деформационно-осадочного процесса является одной из важных задач мониторинга. С помощью аппроксимации данных наблюдений по методу наименьших квадратов программа позволяет установить закономерность изменения отметки одной выбранной марки или контрольного пункта. Результат выводится в виде линии тренда на графике развития осадков во времени. Пользователь имеет возможность задать вид аппроксимирующей функции, выбрав тип линии тренда — линейный, квадратичный либо периодический. Программа предлагает также автоматически рассчитать и построить график наиболее достоверной аппроксимирующей функции.

Для построенной линии тренда под графиком развития осадков отображается значение *достоверности аппроксимации*  $R^2$ , а также таблица статистической оценки надежности тренда, которая вычисляется с помощью критерия Фишера. Сравнение расчетного и теоретического значений критерия Фишера позволяет с некоторой вероятностью (по умолчанию 95%) подтвердить либо опровергнуть гипотезу о достоверности выявленного тренда.

Также пользователь имеет возможность оценить, насколько точно данный тренд аппроксимирует ряд наблюдений, проанализировав значение коэффициента  $R^2$ , которое изменяется от 0 до 1 и отображает степень соответствия ожидаемых для линии тренда значений фактическим данным.

На графике отмечаются циклы и номера марок, значения отметок которых отличаются от аппроксимированных более чем на  $3\sigma$  (рис. 5).

Программа позволяет прогнозировать развитие осадков на заданную дату с оценкой точности, если в свойствах графика указана дата за пределами выполненных наблюдений. Наиболее вероятная область нахождения пункта отображается на графике пунктирной линией. Отмечаются также прогнозируемые максимальное и минимальное значения. Ширина прогнозируемого диапазона прямо пропорциональна времени с момента последнего цикла и величине достоверности аппроксимации.

#### ▼ Инженерные расчеты, отчетность и экспорт

Программа позволяет решать ряд вспомогательных задач, относящихся непосредственно к расчету деформаций и осадков, а также выполнять некоторые инженерные операции общего назначения:

- расчет деформаций ба-  
шенных сооружений;
- расчет взаимного поло-  
жения пар пунктов;
- расчет осадки вдоль ли-  
нии профиля;
- расчет деформаций под-  
крановых путей;
- вспомогательные инже-  
нерные расчеты (обмеры, за-  
сечки, пересечения и т. д.).

Для оформления проектной отчетности программа позволяет создавать в окне плана всевозможные графические примитивы, элементы оформления строительных чертежей (например, координационные оси), топографические объекты с применением классификатора CREDO\_DAT и другие элементы оформления. На основе подготовленной графической модели формируется так называемая *чертежная модель* — отдельный документ программы, позволяющий работать с объектом как с чертежом: создавать рам-

ку и зарамочное оформление, компоновать чертеж из нескольких фрагментов основной модели, добавлять необходимые графические элементы, выводить чертеж на печать и экспортировать его во внешние форматы (DXF, PDF, PS, SVG).

Кроме чертежей и графиков по результатам обработки данных создаются ведомости (формат RTF) и сводные таблицы данных по циклам, которые могут быть экспортированы в файлы формата HTML для дальнейшей обработки в других приложениях, например, в приложениях Microsoft Office.

Программа CREDO Расчет Деформаций создана на платформе популярного в геодезической среде приложения CREDO\_DAT, унаследовав от него ряд архитектурных, графических и интерфейсных решений. В соответствии с планами компании «Кредо-Диалог» дальнейшее развитие программы

будет направлено на наращивание вычислительного функционала для решения прикладных задач мониторинга, а также на автоматизацию процесса сбора данных наблюдений, включая использование роботизированных систем.

При разработке программ для геодезического обеспечения строительства мы опираемся на сотрудничество с нашими пользователями и надеемся продолжить создание с их помощью высококлассных программных решений, облегчающих решение непростых повседневных задач инженерной геодезии.

#### RESUME

A brief survey of computational capabilities of the new version CREDO Deformation Calculation, released in November 2013 describes the new and traditional approaches to the solution of the related applications.

КОНКУРС  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ  
ПРОЕКТОВ CREDO

ОРГАНИЗАТОРЫ  
IX МЕЖДУНАРОДНОГО КОНКУРСА  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЕКТОВ,  
ВЫПОЛНЕННЫХ В СРЕДО,  
РАЗЫСКИВАЮТ ПОБЕДИТЕЛЯ!

Особые приметы:  
 талантлив,  
 настойчив,  
 готов отстаивать свои идеи,  
 создает интересные проекты,  
 умеет работать в CREDO.

ВОЗНАГРАЖДЕНИЕ ГАРАНТИРУЕТСЯ!

Технология CREDO

Подробности на сайте [www.credo-dialogue.ru](http://www.credo-dialogue.ru)