

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОПОЛЗНЕВЫХ УЧАСТКАХ

*И.А. Садовенко, ГВУЗ «Национальный горный университет», Украина  
Л.Я. Эйдельштейн, Научно-производственное предприятие «ОЗОН С», Украина  
В.И. Тимошук, Е.А. Шерстюк, ГВУЗ «Национальный горный университет», Украина*

Разработана система прогнозирования чрезвычайных ситуаций на склоновых участках, включающая программное обеспечение на основе аналитической оценки устойчивости склонов и автоматизированный комплекс мониторинга и информирования "ОЗОН ГЕО".

Оползни грунтовых склонов представляют реальную угрозу для различных видов деятельности, включая эксплуатацию жилых и промышленных зданий, объектов горной промышленности, а также транспортной инфраструктуры. Участки, подверженные оползнеобразованию, охватывают значительные площади застроенных территорий, где в верхней части породной толщи преобладают неустойчивые лессовые образования. Из-за несоответствующего проектирования зданий и водоотведения число чрезвычайных ситуаций, повлекших за собой жертвы и разрушения, значительно выросло за последние несколько десятилетий.

Один из крупномасштабных оползней в Украине произошел на лессовом грунтовом склоне в жилом массиве "Тополь", расположенном в пределах юго-восточной части Днепропетровска 6 июня 1997 года (рис. 1). Катастрофическому сдвигению грунтовой массы предшествовало длительное, медленное развитие характерных деформаций, в течение нескольких лет не классифицирующихся как угрожающие. В результате было полностью разрушено три здания, а общие потери от оползня оцениваются в 75 миллионов долларов. После произошедшего оползня значительно возрос риск для города, преимущественно в связи с геологическими факторами – около 30% городских территорий покрыто мощными лессовыми отложениями, и к тому же имеют место значительные утечки из коммунальных систем водоснабжения и канализационных сетей.



Рис. 1. Участок жилого массива "Тополь" (Днепропетровск) после оползня в июне 1997 г.

Несмотря на некоторый прогресс в борьбе с этой угрозой в глобальном масштабе, учащение оползнеобразований и рост экономических потерь делают предотвращение оползней актуальной проблемой, которая требует принятия своевременных мер защиты для минимизации ущерба. Достоверный прогноз таких явлений нуждается в надлежащем учете

региональных особенностей инженерно-геологических условий, которые оказывают значительное влияние на местную геодинамику.

Созданный продукт научной разработки в системе прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций, вызванных оползнями, объединяет геомеханические модели, программное обеспечение и технические элементы. Система содержит два функционально связанных модуля и включает в себя программное обеспечение с возможностью аналитической оценки и прогноза геомеханических условий и устойчивости склонов, и автоматизированный комплекс мониторинга и информирования "ОЗОН ГЕО".

**Численная модель.** Этот компонент системы прогнозирования основан на математической модели деформируемой упругопластической среды грунтового массива. Данная модель, являясь обобщением упругой и жесткопластической среды с внутренним трением, сочленяет две теории, на которых базируется современная механика горных пород: теорию упругости и теорию предельного состояния. Алгоритм и разработанное программное обеспечение позволяет прогнозировать упругопластические деформации в неоднородных склонах с использованием набора стандартных физико-механических характеристик грунтов.

Процедура численного решения основана на предпосылке силового взаимодействия между элементами моделируемой области в узловых точках. При этом условие сплошности среды удовлетворяется неразрывностью узловых связей между элементами. Деформирование элементов обусловлено приложением сил со стороны соседних элементов, каждая сила имеет две составляющие по осям координат. Компоненты узловых сил  $\{F\}$  и узловых перемещений  $\{\delta\}$  связаны по известному в строительной механике принципу возможных перемещений: при бесконечно малом перемещении узловых точек работа узловых сил должна быть равна работе внутренних напряжений. Шесть уравнений, связывающие узловые силы с вектором узловых перемещений, объединены в одно матричное выражение:

$$\{F\} = [K]\{\delta\}, \quad (1)$$

где  $[K] = \int_s [B]^T [D][B] dS$  - матрица жесткости элемента;  $[B]$  - матрица производных функций формы;  $[D]$  - матрица связи напряжений и деформаций в условиях плоской деформации.

Ввиду постоянства производных функций формы в пределах элемента интегрирование в уравнении (1) заменено умножением на площадь  $S$ . В структурной основе численного алгоритма лежит матрица жесткости системы, формируемая из матриц жесткости элементов и связывающая собой в систему линейных уравнений известные узловые силы и неизвестные узловые перемещения. Результатом численного решения является установление перемещений узлов модели исходя из заданных узловых сил, определяемых внешней нагрузкой и собственным весом элементов модели. Предельное состояние склона и пластическое течение грунтового массива под избыточными напряжениями воспроизводится в модели в соответствии с методом начальных напряжений.

**Процесс моделирования.** Используемый алгоритм и разработанное программное обеспечение позволяет воспроизвести текущее состояние грунтового склона и оценить его устойчивость в реальном времени. В течение периода наблюдения модель работает как интегрированное программное средство для непрерывной коррекции измеряемых параметров ввода и автоматического запуска программы для контроля устойчивости грунтового склона.

Создание численной модели с использованием разработанного программного обеспечения для каждого участка в соответствии с особенностями инженерно-геологического строения включает следующие элементы:

- определение величины уклона в физических координатах; автоматическое разбиение его

вертикального разреза на треугольные элементы производится с учетом неоднородности породной толщи, при необходимости локальное сгущение сетки; формируются массивы для хранения координат узлов и описания элементов;

- формирование геометрии модели склона согласно его внешним контурам, геологическому строению, литологии и физико-механической неоднородности почв; изменение геометрии моделируемой области производится в интерактивном режиме с возможностью изменения уровня конечно-элементной детализации на участках прогнозируемого роста градиентов напряжений и деформаций;

- ввод физико-механических характеристик грунтов моделируемой толщи; производится как на этапе формирования численной модели, так и в процессе корректировки модели с возможным изменением типов элементов и значений их характеристик;

- определение граничных условий на контурах модели и внешних нагрузок в виде заданных перемещений и сосредоточенных сил, приложенных в узловых точках элементов модели; силы и перемещения контролируют напряженно-деформированное состояние моделируемой области и могут изменяться в процессе решения.

Физические и механические свойства грунтов изменяются в зависимости от природных и техногенных воздействий. Например, устойчивость обводненного склона определяется деформационными и прочностными свойствами грунтов, залегающих ниже и выше уровня грунтовых вод.

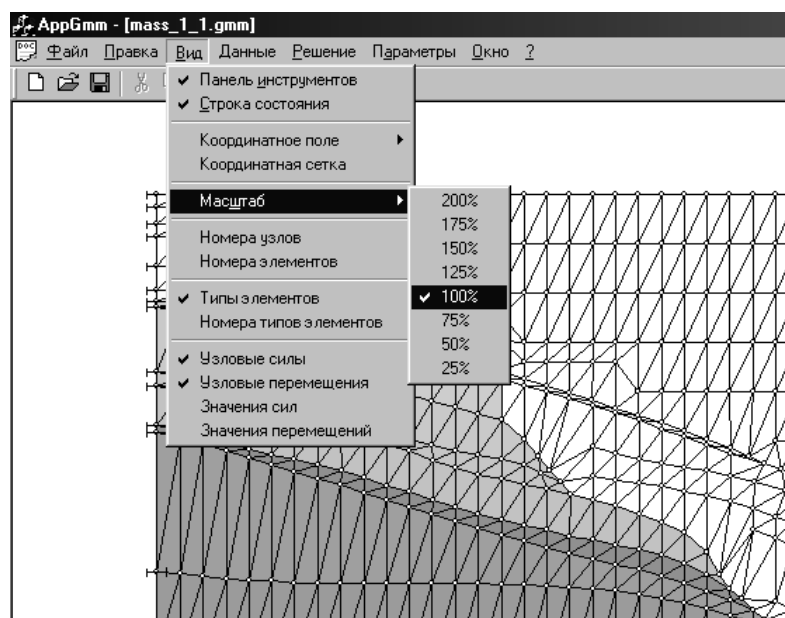


Рис. 2. Создание численной модели оползневого склона

**Применение модели.** Эта модель была применена ко многим оползневым участкам г. Днепропетровска, например, на участке в центральной части города (склон балки Рыбальская), где два многоэтажных здания находятся под угрозой разрушения из-за возможного оползня (рис. 3).

Сходимость численной модели, разработанной для этого участка, была подтверждена сравнением фактического и прогнозируемого перемещения контрольных точек массива. Так, расхождения между измеренными и вычисленными перемещениями в точках наблюдения в основаниях зданий были в пределах от 0,2 до 7,2%.

Изменение внешних нагрузок и свойств грунтов позволяет сравнивать различные сценарии развития геодинамических процессов на оползневых участках. Это позволяет осуществлять оперативную оценку состояния грунтового массива и эффективности технических мероприятий по защите оползневых территорий. Результатом моделирования

является коэффициент устойчивости склона и его изменения в связи с проектируемыми инженерно-техническими мерами, которые рассматриваются как варианты реагирования на возможные оседания и сдвиги. Результаты прогноза устойчивости на потенциально опасных участках позволят оконтурить зоны с повышенным риском деформирования, как показано на рис. 4, где рекомендуется расположение точек наблюдения. Таким образом, программно-реализованная модель для оценки устойчивости склона значительно увеличивает эффективность автоматизированного мониторинга и информирования комплекса "ОЗОН ГЕО".

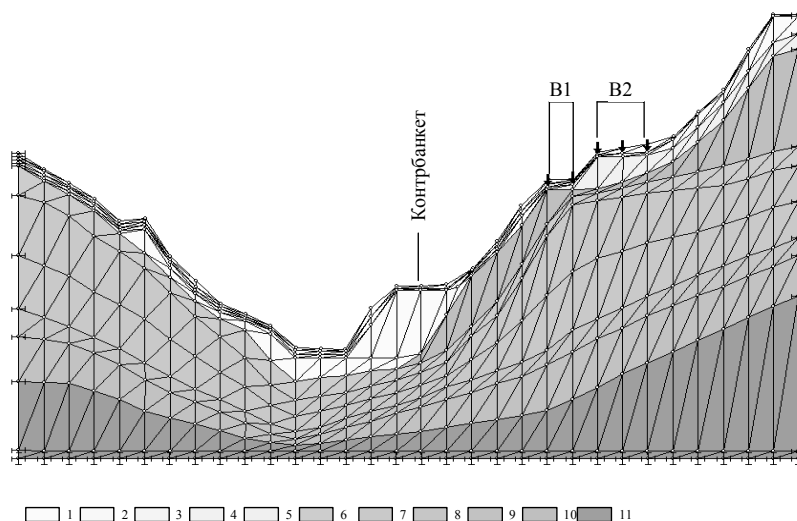


Рис. 3. Геологический разрез грунтового склона после деления на конечные элементы. 1, 2 – искусственные грунты; 3 - делювиальные отложения; 4...9 - четвертичные отложения лессового комплекса, 10, 11 - четвертичные суглинки и глины (цифры соответствуют номерам ИГЭ в таблице 1. B1 и B2 - расположение зданий в зоне риска оползня)

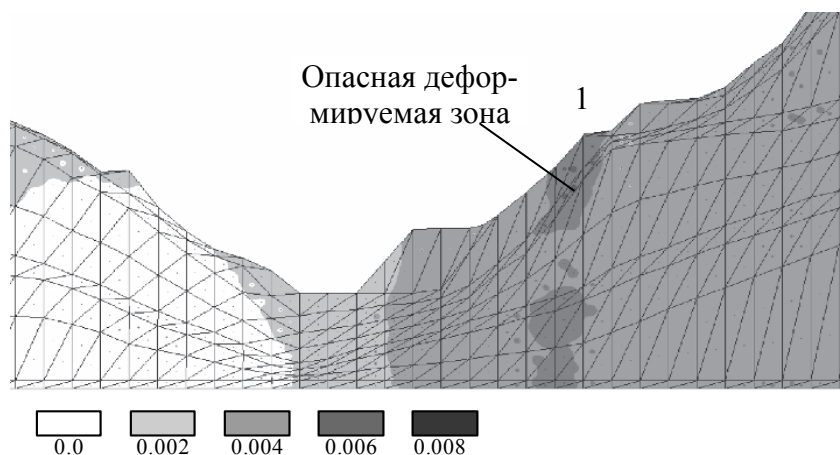


Рис. 4. Относительные сдвиговые деформации в грунтовом склоне в условиях дренажа и сооружения контрбанкета

**Характеристика системы.** В основу автоматизированной системы мониторинга и информирования "ОЗОН ГЕО" положен принцип автоматического прецизионного измерения относительных изменений геометрических параметров контролируемых объектов и, в сравнении с аналогичными системами, обладает следующими преимуществами:

- высокая точность и чувствительность измерительной системы;
- возможность ведения круглосуточного мониторинга с получением данных в реальном

масштабе времени;

- высокий уровень автоматизации сбора и обработки информации;
- автоматическое тестирование функционально-важных составных частей;
- возможность изменения всех настроек оборудования, установленного на объектах с АРМ диспетчера системы мониторинга;
- конструктивы системы оборудуются датчиками на вскрытие, а наиболее важные составные части - дистанционно управляемыми устройствами, препятствующими несанкционированному доступу к компонентам системы;
- сравнительно невысокая стоимость (700÷1100 € в перерасчете на одну контролируемую точку).

Технико-экономические показатели системы "ОЗОН ГЕО" оптимизированы для контроля геометрических параметров зданий, сооружений и объектов, а также земельных участков, подверженных риску опасной геодинамики. При необходимости система дополняется подсистемой контроля состояния подземных вод и программно-аппаратным комплексом оперативного оповещения населения в случае угрозы возникновения чрезвычайных ситуаций.

Аппаратно-программный комплекс обеспечивает:

- оперативный сбор данных о развитии опасных процессов, сопровождающихся изменениями геометрических параметров строительных конструкций, инженерных сооружений и сетей, а также участков рельефа местности;
- исключение из так называемого «человеческого фактора», в первую очередь сбора, обработки и анализа информации, а также
- интеграцию с автоматизированными системами информирования ответственных должностных лиц и, при необходимости, оповещения населения.

Комплекс "ОЗОН ГЕО" обладает многофункциональной, иерархической и распределенной структурой с открытой модульной архитектурой, которая позволяет добавлять и изменять выполняемые функции. Системотехнические решения и высокая степень автономности работы подсистем обеспечивают поэтапное создание программно-аппаратного комплекса и внедрение его в реальную эксплуатацию с постепенным наращиванием технических и функциональных возможностей. Оборудование изготавливается с использованием современной элементной базы высокой степени интеграции, которая обеспечивает оптимальные массогабаритные характеристики и низкое потребление электроэнергии.

Обмен данными, взаимодействие подсистем и составных частей в границах каждой подсистемы осуществляется с использованием стандартных телекоммуникационных средств: по коммутируемым и не коммутируемым (выделенным) проводным каналам связи; по радиотелефонным (GSM) каналам связи.

**Структура системы и узлов.** Работа подсистемы контроля относительных вертикальных смещений строительных конструкций, инженерных сооружений и сетей основана на контроле уровня рабочей жидкости в специальных датчиках, соединенных гидромагистралью и устанавливаемых в контролируемых точках. Подсистема состоит из реперного устройства УР, предназначенного для контроля уровня рабочей жидкости в гидромагистральной; контрольных устройств УК – для измерения смещений контролируемых точек относительно реперной точки; модуля коммуникационного универсального МКУ – для сбора данных от УР и УК, их хранения и предварительной обработки для дальнейшей передачи АРМ мониторинга (рис. 5).

АРМ мониторинг позволяет выполнять многие функции, которые включают:

- 1) приём от МКУ данных о контролируемых параметрах системы;
- 2) ведение базы данных измерений по каждой контролируемой точке;
- 3) обработка и отображение принятой информации в реальном времени, представление данных в виде таблиц и графиков;

- 4) анализ и вывод на монитор ситуации на контролируемом объекте;
- 5) подготовка и формирование извещений для своевременного оповещения об угрозе возникновения или наличии ЧС;
- 6) обмен информацией с сопрягаемыми системами.

АРМ включает в себя ПК с ОС Windows XP, специализированное программное обеспечение (компоненты «Сервер» и «Терминал»), коммуникационное оборудование (универсальные модемные устройства), источник бесперебойного питания.

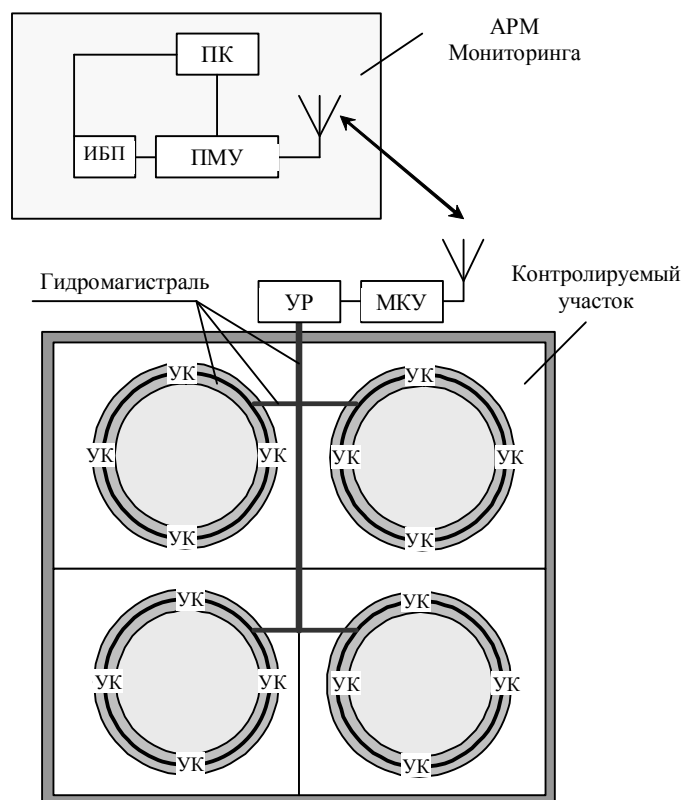


Рис. 5. Схема для контроля вертикальных перемещений в фундаменте хранилища аммиака ОАО "Одесский припортовой завод", Одесса

**Обработка данных и защита.** В процессе работы МКУ непрерывно производит опрос датчиков УР и УК. Если величина измеренного датчиком вертикального смещения, достигнет уровня регистрации (более 0,2 мм), то его значение вместе с датой и временем измерения сохраняется в локальной базе данных, организованной в энергонезависимой памяти МКУ. АРМ системы мониторинга периодически инициирует контрольный сеанс связи с МКУ для проверки работоспособности программно-аппаратного комплекса мониторинга, каналов связи и автоматического тестирования УР и УК. При контрольном сеансе связи данные измерений из базы данных МКУ переносятся в общую базу данных АРМ. Помимо этого в базу данных АРМ переносятся и вся дополнительная информация, связанная с работой установленного оборудования.

При достижении заранее установленного докритического значения, МКУ инициирует внеочередной сеанс связи с АРМ системы мониторинга, при котором данные об относительных смещениях копируются из базы данных МКУ в базу данных АРМ. АРМ определяет суммарный результат относительных изменений геометрических параметров и выдает сообщение о текущих и суммарных смещениях. При достижении заранее установленного критического значения, МКУ инициирует экстренные сеансы связи с АРМ, а также отправляет сообщения на телефоны ответственным должностным лицам. На АРМ

мониторинга определяются общие изменения геометрических параметров, рассчитывается их критическая динамика, после чего на экран монитора выводится соответствующий баннер, и воспроизводится тревожное голосовое сообщение.

Помимо данных, полученных из МКУ, в базе данных АРМ регистрируются время и дата соединения, а также все существенные действия оператора АРМ. Оператор может просмотреть все контролируемые параметры за любой временной интервал.

В системе предусмотрена программная защита от попыток несанкционированного доступа пользователей к внутрисистемной информации. Защита внутрисистемной информации от несанкционированного доступа осуществляется системой паролей, разрешающих доступ к различным видам информации различным категориям пользователей.

Предусмотрена защита информации при авариях и сбоях в системе электроснабжения. Защита данных обеспечивается: использованием в составе АРМ блока бесперебойного питания; системой архивации данных; сохранением данных, как минимум, в двух копиях на разных носителях во время оперативной обработки; использованием средств аварийного восстановления данных; ведением параллельных баз данных в ПК и МКУ. Технические и программные средства обеспечивают надежную и устойчивую работу в условиях воздействия различных факторов природного и техногенного характера. Надежность системы обеспечивается за счет резервирования и дублирования каналов связи, источников электропитания и функционально важных составных частей. Программно-аппаратная часть выполнена с учетом перспективного развития (подключения новых объектов, расширения информационно-аналитических функций и т.д.).

**Реализация системы.** Комплексы "ОЗОН ГЕО» в последние годы были установлены на различных участках в Украине (табл. 1). Их структура аналогична системе автоматизированного контроля вертикальных перемещений в фундаменте для хранения жидкого аммиака (рис. 5). В качестве примера, на рисунке 6 показан график, полученный во время контроля геометрических параметров анкера, установленного на месте оползня в районе села Ай-Даниль, Крым.

Таблица 1. Типичные примеры применения системы в Украине

Год внедрения	Участок	Регион (город)	Контролируемые параметры
2006	Оползневой склон	Ай-Даниль, Крым	Относительные вертикальные перемещения элементов крепления анкера
2009 *	хранилище жидкого аммиака на ОАО "Одесский припортовый завод"	Южная Украина (Одесса)	Относительные вертикальные перемещения основания
2009 *	хвостохранилища бывшего предприятия по добыче урана «Приднепровский химический завод»	Центральная Украина (г. Днепропетровск)	Контроль вертикального оседания плотин
2009 *	хвостохранилище металлургической компании «АрселорМиттал Кривой Рог»	Центральная Украина (г. Кривой Рог)	Контроль вертикального оседания плотин
2010	Дворец бракосочетаний	Киев	Относительные вертикальные перемещения перекрытия
2011 *	«Олимпийский» Национальный спортивный комплекс	Киев	Относительные вертикальные перемещения перекрытия

2011 *	"Донбасс-Арена" Стадион	Донецк	Относительные вертикальные перемещения перекрытия
2011 *	Хвостохранилище горнодобывающей компании «ЮГОК»	Центральная Украина ( г. Кривой Рог)	Контроль вертикального оседания плотин

\* Стадии проектирования и монтажа на участке

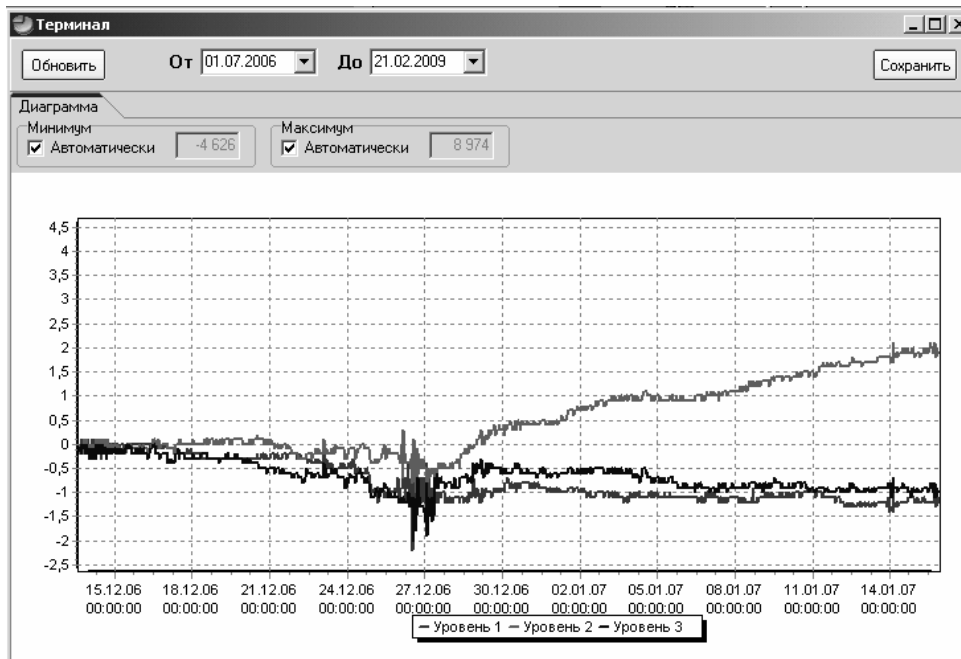


Рис. 6. Вертикальные перемещения на разных уровнях крепления анкера на оползневом участке в деревне Ай-Даниль, Крым

**Выводы.** Разработана и протестирована система прогнозирования и предупреждения от чрезвычайных ситуаций на грунтовых склонах. Она содержит два модуля для аналитических оценок и технических средств, а также позволяет в режиме реального времени прогнозировать деформации грунтового массива, уровня грунтовых вод, состояние элементов конструкций зданий и сооружений. Система может использоваться для информирования должностных лиц о риске оползневой динамики, для оценки эффективности технических мер, принимаемых для предотвращения опасных геодинамических явлений, таких как оползни.

#### Список литературы

1. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.:Недра, 1987. – 221 с.
2. Wood, D.M. (1990) Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge.
3. Sadovenko, I.O., D.V. Rudakov, and V.I. Timoschuk (2009) Analysis of Dynamic Impact on a Ground Slope During Destruction of an Emergency House. Coupled Site and Soil-Structure Interaction Effects with Application to Seismic Risk Mitigation, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, IV, 305-312.
4. Про можливості застосування автоматизованої системи «ОЗОН КПТ» в інформаційній технології з оцінки виникнення надзвичайних ситуацій на гідроспорудах / О.Г. Лисиченко, Л.Я. Ейдельштейн // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. — 2010. — Вип. 1. — С. 49-54.