

# ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИ ОПАСНОЙ ТЕРРИТОРИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ

## EXPERIENCE IN DESIGNING LANDSLIDE PROTECTION STRUCTURES FOR SEISMIC REGIONS, USING UP-TO-DATE SOFTWARE SYSTEMS

Д. Д. ЖДАНОВ

И. А. БОКОВ

В. Г. ФЕДОРОВСКИЙ, канд. техн. наук

*В статье рассмотрен комплексный подход к расчётам устойчивости большой территории при изменяющейся в процессе строительства поверхности рельефа. Приводится пример автоматизации процессов выбора наиболее опасных расчётных сечений и генерации геометрии расчетных сечений для ввода в программу.*

*The article considers an integrated approach to calculating the stability of a large area with a changing surface during the construction process. An example of automation of the processes of choosing the most dangerous design sections and generating geometry of design sections for input into the program is given.*

### Ключевые слова:

*Оползень, расчёт устойчивости, матричный метод, оползневой фактор, водонасыщение, удерживающие конструкции*

### Key words:

*Landslide, stability calculation, matrix method, landslide factor, water saturation, retaining structures*

Внедрение технологий автоматизации позволило существенно нарастить производительность труда во всех сферах, в том числе и в сфере разработки проектной документации для строительства. Задачи, которые ранее выполнялись большой группой специалистов, в настоящее время выполняет один или несколько специалистов при помощи современного программного обеспечения.

В строительной индустрии в РФ и в мире намечен четкий курс на более полную автоматизацию программного обеспечения для разработки проектной документации и интеграцию в нее смежных разделов. В настоящее время поддержка внедрения технологии автоматизации осуществляется на уровне правительств экономически развитых стран и проводится как путем передачи обязательств по ее применению участниками тендеров на получение государственных заказов, так и обязательным внедрением в рабочий процесс государственных проектных институтов. Можно отметить, что и в РФ, на уровне частных заказчиков, использование BIM-технологий все чаще выдвигается как обязательное требование при заключении договора.

Прогресс в сфере автоматизации геотехнического проектирования весьма медленный по сравнению с остальными отраслями.

Одной из задач геотехнического строительства, трудозатраты в котором весьма высоки, является оценка оползневой опасности территории строительства. Как правило, процесс оценки оползневой опасности состоит из нескольких шагов:

1. Анализ топографических условий площадки в исходном состоянии, выявление участков с наибольшим уклоном;
2. Анализ архитектурно-планировочных решений планируемых к строительству зданий и сооружений, выявление участков, оказывающих существенное влияние на устойчивость склона;
3. Анализ инженерно-геологических условий площадки;
4. Расчеты коэффициента запаса устойчивости склона по намеченным участкам;
5. Разработка противооползневых сооружений для случаев, когда коэффициент запаса устойчивости склона менее нормативного.

Как правило, выбор участка для строительства обусловлен причинами, связанными с благоприятностью и пригодностью участка для строительства, но это происходит не всегда. В рассматриваемом случае площадка строительства характеризуется стесненностью и является потенциально опасной с точки зрения возможности активизации оползневых процессов в результате нагружения и планировки существующих склонов.

В ряде случаев для обеспечения устойчивости предлагают различные методы, часть которых тем или иным способом увеличивают прочностные и/или деформационные характеристики грунтов, либо повышают устойчивость искусственным изменением рельефа, а другая часть обеспечивает возможность строительства конструктивно, то есть с выполнением дополнительных конструкций.

В настоящей работе предложена технология выполнения комплексных расчетов (расчеты устойчивости грунтового массива в естественном состоянии и с противооползневыми сооружениями, расчеты влияния строительства на существующую застройку), включающая в себя применение алгоритма оценки оползневой опасности с визуальным отображением матрицы оползневой опасности, обладающая высоким потенциалом автоматизации путем интеграции программных комплексов, применяемых для разработки проектов вертикальной планировки, геоинформационных систем и геотехнического расчетного комплекса.

Предлагаемая технология была применена при разработке мероприятий инженерной защиты территории строительства и позволила выделить потенциально опасные участки, автоматизировать выполнение расчетов их устойчивости и расчетов противооползневых мероприятий.

### Краткое описание района строительства и объекта строительства

Район строительства расположен в селе Оползневом, расположенном на южном берегу Крыма и входящим в городской округ Ялта Республики Крым.

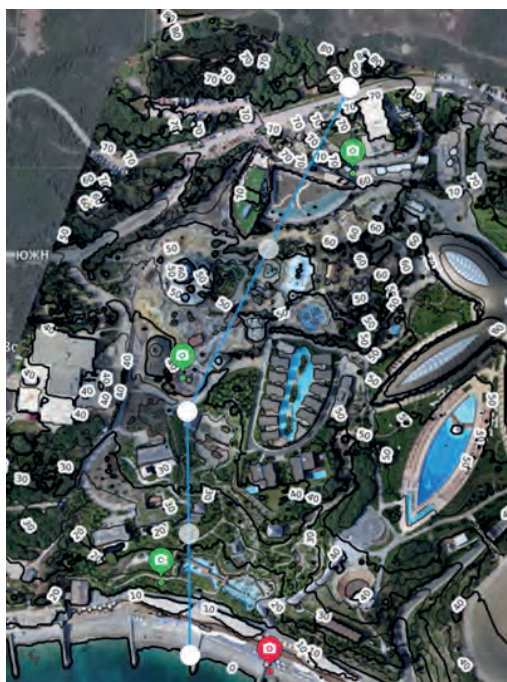


Рис. 1. План участка с линией профиля

Объект строительства – санаторно-курортный комплекс (СКК) «Мрия». Планируется застройка западного участка с благоустройством территории по концепции японского сада. Особенность данной концепции заключается в том, что на некоторых участках искусственно изменяют профиль пологого склона, создавая большой уклон путем подрезания подошвы склона и насыпи на бровке – тем самым искусственно создавая еще более опасный рельеф в изначально потенциально оползнеопасном районе. Также нужно упомянуть и о создании на данном сложном рельефе замкнутой системы, состоящей из нескольких прудов, водопадов и связывающих ручьев с постоянной циркуляцией воды. На рисунке 2 представлены продольные профили всей площадки в разное время: 21.10.16 – первоначальный рельеф, 14.12.16 – рельеф строительного периода и 28.05.18 – окончательный рельеф.

Как следует из результатов инженерно-геологических изысканий, площадка строительства имеет относительно простой геологический разрез с точки зрения характера напластования грунтов. Территория сложена твердыми суглинками с большим количеством включений в виде щебня и глыб известняка, а сверху покрыта слоем насыпного грунта (рисунок 3).

Как следует из результатов инженерно-геологических изысканий, площадка строительства имеет относительно простой геологический

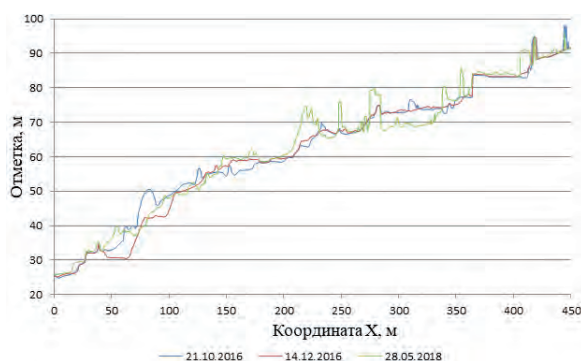


Рис. 2. Характерный продольный профиль строительной площадки (горизонтальный масштаб 1:5000)

Грунты насыпного слоя представлены суглинком коричневым с включениями щебня, известняка, с примесью строительного мусора, различного в зависимости от местоположе-

ния (куски бетона, арматуры, проволока, старые кабели, старые корни деревьев). Мощность слоя составляет 1,0 – 6,50 м.

Под насыпными грунтами залегает ИГЭ-1 – суглинок дресвяный, твердый, рыхлый, легкий пылеватый, с включениями дресвы и щебня аргиллита слабоокатонного от 20% до 30%, местами ожелезненного, местами с включениями пачек перемятого аргиллита, а также щебня, прослоев щебня и глыб известняка мраморовидного.

Ниже по разрезу ИГЭ-2 – суглинок дресвяный, твердый, рыхлый, легкий пылеватый, с включениями дресвы и щебня аргиллита слабоокатонного от 30% до 50%, с выраженными зеркалами скольжения, местами с включениями пачек перемятого аргиллита, а также прослоями щебня известняка мраморовидного.

Подземные воды на участке распространены не повсеместно, а приурочены к трещинам и включениям в суглинки и залегают в виде тонких потоков, линз, «мешков», «карманов». Водовмещающими породами являются залегающие в основном в виде линзообразных прослоев дресвяно-щебенистые грунты аргиллитового, песчаникового и реже известнякового состава, более редко суглинки дресвяно-щебенистые, с включением обломочного материала до 50%.

По результатам лабораторных испытаний грунтов получено, что при водонасыщении у данных грунтов показатель угла внутреннего трения снижается на 10%, а удельное сцепление – на 75%.

Район строительства по комплексу инженерно-геологических условий: геоморфологических – один геоморфологический элемент с современно-древнеоползневыми склонами ( $d_p Q_{III-IV}$ ,  $d_p Q_{II-III}$ ); геолого-литологических – три ИГЭ; гидрогеологических – подземные воды имеют потоково-струйчатый характер; геологических и инженерно-геологических процессов – оползни, абразия до строительства берегоукреплений, эрозия, высокая сейсмичность (8 баллов при повторяемости 1 раз в 500 лет с вероятностью 0,90 не превышения этой величины в ближайшие 50 лет) – относится к третьей (сложной) категории.

Таким образом, площадка характеризуется наличием особых грунтов, прочность которых резко снижается при водонасыщении, высокой сейсмичностью, исторической опасностью участка строительства по отношению к оползневым процессам, спецификой планировки территории со сложным рельефом и, вследствие устройства системы прудов и водопадов, теоретически возможным замачиванием грунтов, и, наконец, наличием слоя насыпного грунта толщиной 0,5...5 м, с неопределенными прочностными и деформационными характеристиками.

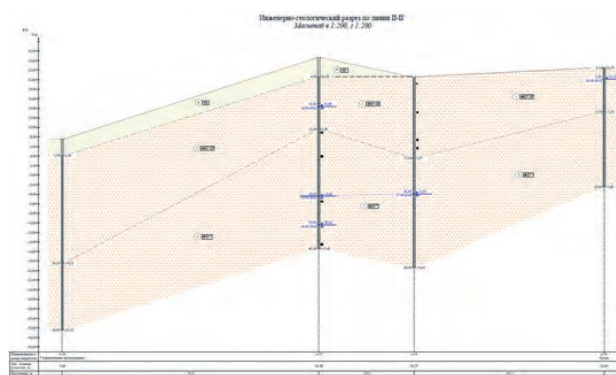


Рис. 3. Характерный инженерно-геологический разрез

### **Описание некоторых запроектированных сооружений инженерной защиты и особенности их проектирования**

По результатам расчетов сечений, полученных по описанной ниже технологии, были получены коэффициенты запаса устойчивости как для локальных поверхностных оползней, так и для глубинных. Величины этих коэффициентов указывали на то, что для обеспечения устойчивости грунтового массива на некоторых участках склона необходимо выполнение противооползневых мероприятий.

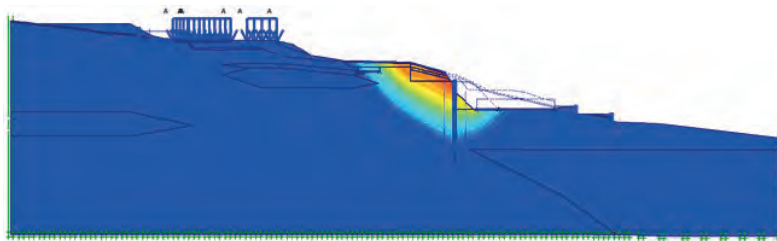
Согласно плану застройки территории почти в самой нижней ее части предусматривался комплекс подземных сооружений, возводимых открытым способом. Для строительства подземных сооружений будет производиться разработка котлованов. Перепад отметок котлована подземных сооружений в среднем составляет 11-12 м. В связи с большими перепадами высот, а также для снижения влияния выработок на общую устойчивость склона и существующую застройку принято решение о разработке котлованов под защитой ограждающих конструкций, которые в эксплуатационный период будут выполнять роль подпорных и удерживающих конструкций.

Максимальная глубина котлована подземных сооружений составляет 12 м. Проектным решением, с учетом имеющейся строительной техники, сжатыми сроками строительства и некоторыми проблемами в привлечении новой строительной техники или ее транспортировки из крупных городов, предусмотрена стена (она же ограждение котлована на строительный период) из буросекущихся свай Ø800 мм длиной 30 м (сваи армируются через одну) с устройством контрфорсов из двух свай совместно со срезкой грунта со стороны склона и грунтовой упорной пригрузкой высотой 6 м со стороны котлована.

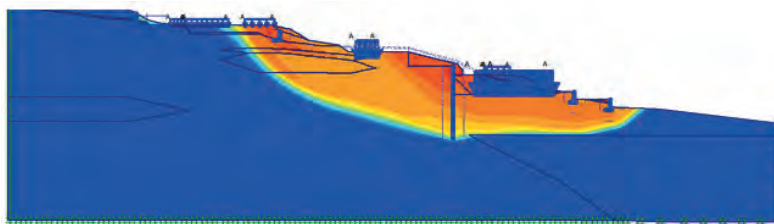
При проектировании сооружений инженерной защиты расчеты велись как на стадию эксплуатации сооружений, так и на стадию их строительства. Сводом правил 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия» [3] предписано, что расчеты необходимо производить на основные и особые сочетания нагрузок, при этом в одном особом сочетании учитывается только одно особое воздействие. В нашем случае присутствовало снижение прочностных свойств грунтов при их водонасыщении, а также особое воздействие – сейсмическое. Соответственно, изначально планировались расчеты на три основных и одно особое сочетание. Однако, учитывая приблизительные сроки и сезон строительства, было принято решение об учете возможности водонасыщения грунтов в период строительства сооружений.

Для некоторых расчетных случаев, например, для котлована подземных сооружений изначально был выполнен расчет на строительный период для случая полного водонасыщения грунтов. Однако, полученные в конструкциях усилия оказались в 4 раза больше, чем в тот же строительный период, но без особой нагрузки. Поэтому, учитывая то, что в нормах данный случай не предусмотрен, а также сжатые сроки строительства и малую вероятность наступления данного расчетного случая, было принято решение об учете водонасыщения грунтов с поверхности на половину высоты проектируемой стены. Внутренние усилия при данном случае оказались больше в 2 раза, а не в 4 (по сравнению с основным сочетанием нагрузок). Результат расчета по данному случаю представлен на рисунке 4.

На рисунке 5 приведен результат расчета на основное сочетание нагрузок. По полученным изополям расчетной призмы обрушения видно, что противооползневое сооружение работает, предотвращает поверхностные оползневые процессы и формирует глубинную поверхность скольжения с толщиной тела оползня до 30 м при большом коэффициенте запаса.



**Рис. 4.** Котлован подземного очистного сооружения. Особое сочетание нагрузок (полное водонасыщение грунтов). Расчетная призма обрушения.  $K_{st} = 1,117$



**Рис. 5.** Сечение вдоль склона, проходящее через подземное очистное сооружение. Основное сочетание нагрузок. Расчетная призма обрушения.  $K_{st} = 2,167$

### Алгоритм оценки оползневой опасности

Оценка оползневой опасности является комплексным мероприятием, включающим в себя как оценку коэффициента запаса устойчивости или вероятности схождения оползня, так и оценку потенциальных повреждений с социально-экономической точки зрения.

В настоящей работе рассматривается только оценка коэффициента запаса устойчивости. Классификация склоновых участков выполняется с учетом 3 основных факторов: инженерно-геологических и гидрогеологических условий и геометрии склона.

Исторически потенциальная опасность локального участка оценивается экспертно, при этом критериями оценки выступают ширина, уклон и протяженность склонового участка, соответствующие ему инженерно-геологические характеристики, наличие и уровни подземных вод, наличие удерживающих и искусственных сооружений. Затем рассчитываются коэффициенты запаса устойчивости по выделенным потенциально опасным участкам и сопоставляются с допустимыми нормами значениями.

Особенностями такого подхода являются как элемент субъективности в экспертном выборе наиболее опасных сечений, так и элемент существенных трудозатрат в анализе, сопоставлении критериев экспертной оценки и введения исходных данных по расчетным сечениям в расчетных программах.

Следует отметить, что устранение указанных недостатков является технической задачей, и один из оптимальных способов по трудовым и временным затратам, на наш взгляд, требует экспертной составляющей только в установлении и оценке критериев потенциальной опасности – так называемый полуколичественный метод. Информация по геометрии склона, инженерно-геологическим и гидрогеологическим условиям, как правило, уже имеется в цифровом виде в том или ином формате.

Особенностью рассматриваемой площадки было то, что проектирование основных сооружений велось одновременно с разработкой противооползневых сооружений, и в ряде случаев, конструкции, выполняющие роль противооползневых сооружений, имели дополнительные функции подпорных стен возводимых сооружений и подпорных стен для реализации проекта вертикальной планировки.

В ходе проектирования менялась концепция устройства, благоустройства и размещения зданий и сооружений, а стесненные условия строительства обуславливали складирование грунта и строительных материалов непосредственно на площадке, что приводило к постоянному изменению высотных отметок площадки и образованию новых откосов из перемещенного грунта.

Указанные обстоятельства привели к необходимости выполнения расчетов на промежуточные «строительные» состояния площадки. Изменения топографической ситуации площадки поступали от компании, выполнявшей периодическую аэрофотосъемку. Таким образом, рельеф несколько раз значительно изменялся, что требовало оперативной оценки наиболее опасных профилей.

Для снижения трудозатрат и сокращения вероятности ошибок авторами настоящей статьи было решено автоматизировать данный процесс.

Реализован подход визуального отображения матрицы оползневой опасности, вычисленной полуколичественным методом. Матрица оползневой опасности представляет собой совокупность строк и, в нашем случае, трех столбцов, которые определены тремя числами: две координаты на плоскости и оценочный балл относительной оползневой опасности.

Вышеназванный полуколичественный метод является «средним» между качественным и количественным методом оценки. Качественный метод содержит в себе большую часть субъективных оценок, сильно зависит от опыта исполнителей и дает весьма условные результаты в виде присвоения участку одной из принятых категорий оползневого риска, например, «низкий» или «очень высокий». Количественный метод основан на расчете рисков, вычисляемых с помощью статистических данных по исследуемой территории, и последующей их оценке. Сама вероятность активизации оползневого процесса вычисляется на основе вероятностного моделирования с использованием статистических данных. Величины рисков оцениваются по допустимым величинам, устанавливаемым для экономических потерь – заказчиком, риском для жизни людей – нормативными документами.

Как мы видим, качественный метод является самым нетрудозатратным и одновременно неточным, количественный метод требует самых больших трудовых и временных затрат в сравнении с ранее названными методами, к тому же обуславливает наличие не всегда имеющейся статистики.

Для оценки оползневой опасности полуколичественным методом нужно задаться определяющими критериями, принять для них степень значимости и шкалу балльности. Итоговая оценка производится суммированием или перемножением условных баллов по всем критериям.

$$R = \sum_{i=1}^M K_i \cdot t_i, \quad (1)$$

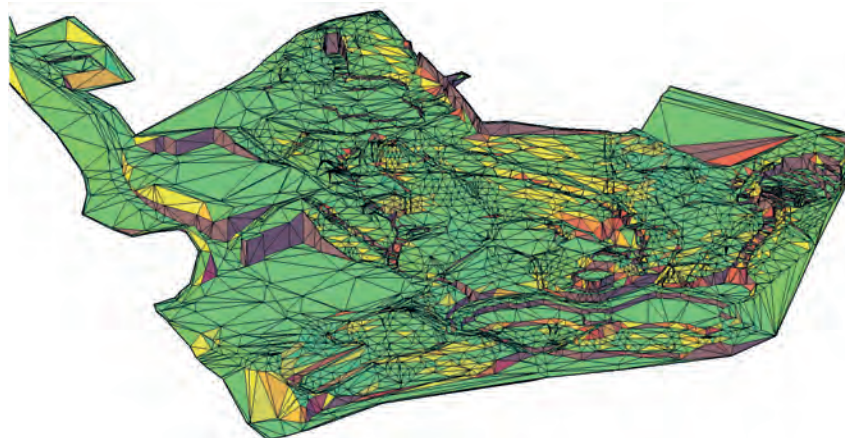
где  $R$  – оползневой риск,  $K_i$  – коэффициент значимости  $i$ -го фактора,  $t_i$  – балльное значение фактора,  $M$  – число факторов.

С учетом того, что по всей площадке величины прочностных характеристик одинаковы по слоям, подстилающим насыпной грунт, к тому же подстилающие слои весьма мало

отличаются этими характеристиками друг от друга в сравнении с насыпным грунтом (характеристики которого были назначены по описанию состава грунта, исходя из опыта работы), так что согласно [2] факторы прочностных характеристик подстилающих грунтов можно не учитывать, оценивая оползневую опасность только по толщине насыпного грунта. Стоит заметить, что такое допущение ограничивает применимость проведенных расчетов только для «поверхностных» оползней, то есть с расположением оползневого тела преимущественно в насыпном грунте.

Таким образом, в оценке оползневой опасности участвовали всего три критерия – уклон поверхности, толщина насыпного грунта и уровень грунтовых вод. Для удобного анализа и нахождения наиболее опасных участков, которые в дальнейшем будут рассчитываться более детально, была построена карта относительной оползневой опасности, представляющая собой множество точек, определенных абсолютными координатами в плане и имеющих конкретное значение относительной оползневой опасности в этой точке. Формирование множества этих точек происходило следующим образом:

1. с пространственной геометрической модели территории в виде поверхности, состоящей из треугольников, снимались показатели уклона и координаты центра тяжести треугольника. На основе этих данных создавалась карта в абсолютных координатах  $X$ ,  $Y$ ,  $i$ , где  $X$  и  $Y$  – значения абсолютных координат, а  $i$  – значение уклона, соответствующее этим координатам. На рисунке 6 представлена пространственная модель территории, на которой наибольшие уклоны выделены цветом от желтого до коричневого в зависимости от величины уклона;



**Рис. 6.** Пространственная модель рельефа участка строительства с цветовым отображением величины уклонов

2. по данным инженерно-геологических изысканий с помощью интерполяции были получены значения толщин насыпного грунта и глубины обнаружения подземных вод для каждой точки, полученной в предыдущем пункте;

3. матрица оползневой опасности была получена путем сложения баллов по трем факторам риска согласно формуле (1) с учетом коэффициентов значимости.

На рисунке 7 приведена полученная матрица оползневой опасности, представленная в виде изополей. Наиболее опасные участки выделены цветами от желтого до коричневого в зависимости от итоговой суммы баллов.



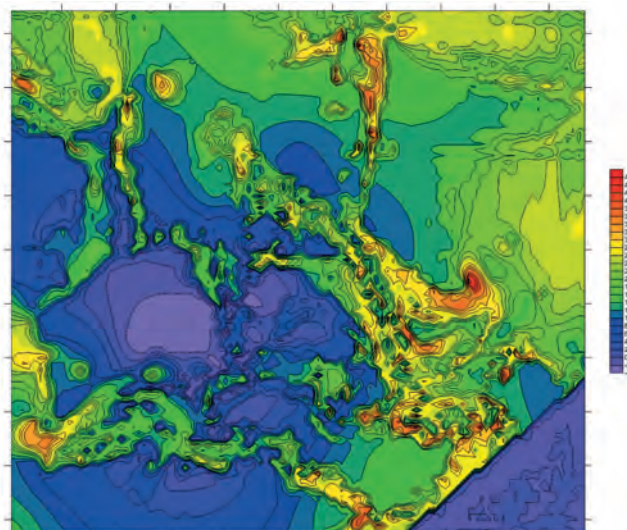


Рис. 7. Изополя относительной оползневой опасности

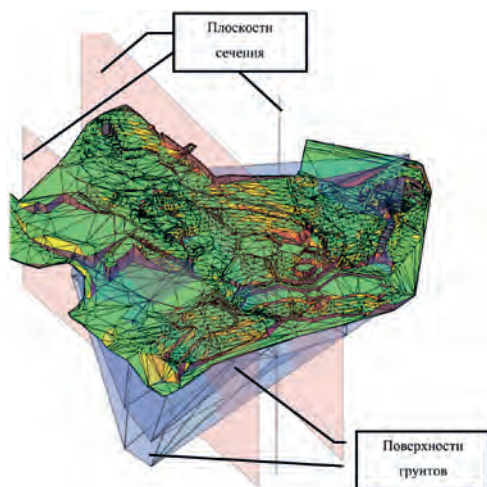


Рис. 8. Пространственная модель поверхностей грунтов и планировочной поверхности с выбранными по изополям (рис. 5) наиболее опасными расчетными сечениями

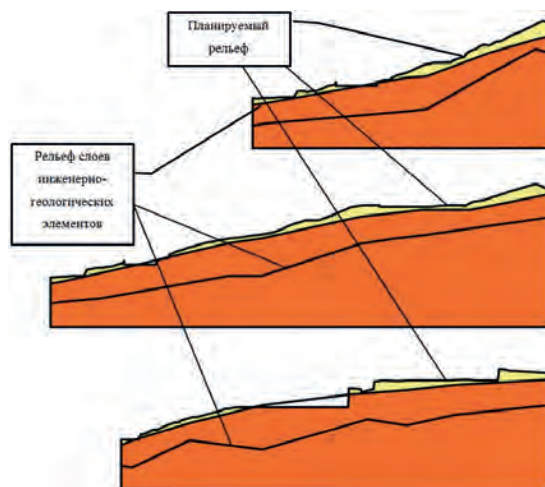


Рис. 9. Сечения подошв слоев ИГЭ и планировочной поверхности, подготовленные для импорта в «Plaxis 2D»

Используя изополя относительной оползневой опасности, были определены наиболее опасные локальные участки территории, через которые по линии наискорейшего спуска были построены расчетные сечения для проверки устойчивости в расчетном комплексе. При этом снижается «человеческий фактор» при выборе наиболее опасных сечений для проведения расчетов устойчивости, поскольку наиболее опасные участки определяются расчетом.

Следующая часть оптимизации процесса заключалась в автоматизации процесса построения геометрии задачи в расчетном комплексе. Современные расчетные комплексы позволяют осуществлять автоматический ввод геометрической модели как по координатам, так и путем импорта специального файла.

В режиме 3D моделирования в программном комплексе по имеющейся поверхности рельефа и построенным по инженерно-геологическим скважинам поверхностям подошв инженерно-геологических элементов (рисунок 8) были проведены секущие плоскости для получения геометрии плоских расчетных сечений. Ввиду того, что рельеф может иметь сильную локальную неравномерность, например мелкие ямы или бугры, каждое полученное сечение проверялось и, при необходимости, вручную корректировалось. Сформированные расчетные сечения передавались в качестве исходных данных в расчетную программу «Plaxis 2D» (рисунок 9).

Указанный подход позволил **кратно** сократить время, необходимое на формирование расчетных сечений для выполнения комплекса расчетов устойчивости.

### Выводы

1. Разработана и апробирована технология выполнения комплексных расчетов, включающая в себя применение алгоритма оценки оползневой опасности с визуальным отображением матрицы оползневой опасности для рассматриваемой площадки строительства.

2. Необходимо учитывать местные условия строительной площадки, для того чтобы не упустить какой-либо существенный для обеспечения устойчивости склона фактор. Методика полуколичественной оценки оползневой опасности может быть дополнена путем введения дополнительных факторов оползневого риска.

3. Применение автоматизации в данной и аналогичных задачах в любом случае требует личного контроля расчетчика и возможной корректировки результатов.

4. Возможно оптимизировать некоторые проектные решения, если имеется плотное взаимодействие с участниками строительного процесса. Существенным достигнутым результатом авторы считают то, что были реализованы оптимальные конструктивные решения, сочетающие в себе как повышение глобальной устойчивости склона, так и функции ограждения котлованов на время строительного периода для возведения подземных сооружений открытым способом и снижения негативного влияния на существующую застройку. Так, например, реализовано устройство котлована глубиной 12 м под защитой из консольного ограждения из буровых свай с контрфорсами. Такие решения трудновыполнимы без непосредственного научного сопровождения строительства и соблюдения четких временных рамок строительства.

5. Возможна кратная оптимизация трудозатрат при сопряженном применении современных программных графоаналитических, графопостроительных и расчетных комплексов.

### Библиографический список

1. Лужецкий А.Н., Ерыш И.Ф., Коджаспиров А.А., Науменко П.Н. Оползни Черноморского побережья Украины. Москва, изд. «НЕДРА», 1977 г.

2. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов / ред. Производственного и научно исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС). – М.: Стройиздат, 1984. – 80 с.

3. СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия». Актуализированная редакция СНиП 2.01.07 СНиП 2.01.07 СНиП 2.01.07 -85\*

4. СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения». Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003

### Авторы:

Данил Дмитриевич ЖДАНОВ, младший научный сотрудник лаборатории механики грунтов НИИОСП им. Н. М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Danil ZHDANOV, junior research associate of the Laboratory of Soil Mechanics NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: danil-27@yandex.ru

тел.: +7 (926) 672-73-77

Игорь Алексеевич БОКОВ, научный сотрудник лаборатории механики грунтов НИИОСП им. Н. М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Igor Bokov, research associate of the Laboratory of Soil Mechanics NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: igor.bokov@gmail.com

тел.: +7 (499) 170-27-26

Виктор Григорьевич ФЕДОРОВСКИЙ, канд. техн. наук, заведующий лабораторией механики грунтов НИИОСП им. Н. М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Victor Federovskiy, Ph.D. (Engineering), the Head of the Laboratory of Soil Mechanics NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: geconltd@mail.ru

тел.: +7 (499) 170-69-41