

УДК 551.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ
ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА ОПОЛЗНЕВОЙ
ОПАСНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРНОЛЫЖНОГО
КОМПЛЕКСА «КАЗАНЬ» И г. ИННОПОЛИС**

А.И. Латыпов, Н.И. Жаркова, И.С. Нуриев, Г.А. Черныйчук

Аннотация

Выполнен региональный краткосрочный прогноз оползневой опасности с использованием цифровой модели геологической среды с применением метода инженерно-геологической аналогии: проведено инженерно-геологическое районирование; с использованием эталонных участков рассчитаны критические значения уклонов поверхности для выделенных типов грунтовых толщ и разных режимов влажности; выполнена экстраполяция полученных данных с последующей верификацией и коррекцией прогноза. Установлено, что наибольшая предполагаемая поражённость оползневыми процессами характерна для весны 2014 г. (2.46 км², 5.37%), наименьшая – для лета (0.36 км², 1.58%). Оползневые деформации будут подвержены преимущественно нижние части склонов. Преобладающий тип оползней – вязкопластические, с глубиной заложения до 1.5 м. Вероятны единичные оползни скольжения, суффозионные оползни и оползни-обвалы.

Ключевые слова: прогноз оползневой опасности, моделирование оползневых процессов, устойчивость склонов и откосов.

Введение

В настоящее время идёт активное освоение приустьевой части р. Свияги, расположенной в пределах Верхнеуслонского района Республики Татарстан: начиная с 2005 г. здесь создан и постоянно реконструируется уникальный горнолыжный комплекс «Казань», летом 2012 г. началось строительство города-спутника Иннополис.

Исследуемая территория характеризуется весьма сложными инженерно-геологическими условиями. Это обусловлено наличием мощной толщи глинистых грунтов, непростыми гидрогеологическими условиями, а также большой расчленённостью рельефа, что предопределило развитие склоновых процессов.

Летом – осенью 2013 г. сотрудниками Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета на основании договора с Министерством экологии и природных ресурсов Республики Татарстан (МЭПР РТ) была выполнена комплексная оценка оползневой опасности на территории г. Иннополис и горнолыжного комплекса, включающая большой объем полевых и лабораторных исследований.

Одной из задач, поставленных геологическим заданием, являлся прогноз развития оползневых процессов в ближайшей перспективе, а также разработки системы мониторинга за склоновыми процессами.

Учитывая сжатые сроки и ограниченный объем исследований, решение подобной задачи было возможно только с использованием моделирования развития оползневых процессов, основанном на построении цифровой модели геологической среды.

1. Геоморфологические и геолого-гидрогеологические условия

Территория расположена в приустьевой части правого коренного берега р. Свияги (абсолютные отметки уреза – 53 м), в пределах древнего эрозионно-денудационного плато с максимальными абсолютными отметками 215 м. Её поверхность глубоко расчленена речными долинами, балками и оврагами, поэтому здесь широко развиты склоны различной формы (выпукло-вогнутые, прямые, ступенчатые), высотой от первых метров до 50÷75 м, крутизной 20°÷45°, в редких случаях до 75°÷85° [1, 2].

Верхняя часть геологического разреза имеет двухчленное строение. Нижняя часть представлена отложениями пермской системы, а именно чередованием карбонатных и карбонатно-терригенных пород казанского P₂kz (известняки, доломиты, реже мергели), уржумского P₂ug и северодвинского P₃sd ярусов (преобладают аргиллитоподобные глины, реже песчаники, алевролиты, мергели, известняки) [3]. На пермских пестроцветных отложениях с размывом залегает сложноорганизованный комплекс четвертичных отложений: элювиальные eQ_E и делювиальные dQ₂₋₄ супесчано-суглинистые грунты и глины с дресвой и щебнем известняков и мергелей, пролювиальные суглинки pQ₃₋₄ и коллювиальные дресвяно-щебнистые грунты с глинистым заполнителем cQ₄, мощность которых составляет, как правило, не более 10 м. На юго-западе исследуемой территории выделяется мощная толща деляпсивных отложений dpQ₃₋₄, представленных дислоцированными наклонно залегающими карбонатными породами (нередко разрушенными до состояния дресвяно-щебнистой массы), алевролитами и песчаниками смятыми в микроскладки, разбитыми микрозеркалами скольжения, а также разуплотненными и перемятыми аргиллитоподными глинами с сохранившейся стратиграфической последовательностью.

Подземные воды в пределах рассматриваемой территории развиты практически повсеместно, что подтверждается большим количеством родников (пластовых выходов) преимущественно нисходящего характера, с дебитом 0.01÷0.1 л/с (реже 0.2÷0.25 л/с). Они приурочены к песчаникам и трещиноватым известнякам средне- и верхнепермского возраста, а также к четвертичным суглинкам. Воды преимущественно безнапорные, субнапорные, глубина залегания уровня подземных вод от 0 до 15 м, с абсолютными отметками 55.0÷155.0 м. Питание подземных вод происходит главным образом за счет инфильтрации атмосферных осадков по всей площади распространения водоносных горизонтов. Разгрузка совершается на склонах оврагов и долины р. Свияги и ручья Морквашка, а также за счет перетоков в нижележащие водоносные горизонты.

2. Методика исследований

Согласно геологическому заданию, выданному МЭПР РТ, краткосрочный прогноз развития склоновых процессов (на весну, лето и осень 2014 г.) должен был основываться на результатах оползневой съёмки масштаба 1:10 000. При выполнении прогноза такого уровня обычно используют детерминированный или стохастический подходы [4–6]. В нашем случае выполнению классического детерминированного прогноза не способствовали, с одной стороны, громоздкость расчётной схемы, предполагающая последующую трудность практического применения, с другой – невозможность учёта всего многообразия факторов формирования оползней на столь значительной площади. Следует также отметить незначительный объём горнопроходческих и геофизических работ, предусмотренный геологическим заданием, не позволивший изучить геологическое строение и физико-механические свойства грунтов с необходимой детальностью. Выполнению стохастического прогноза препятствовало отсутствие сколь-нибудь представительных данных мониторинга, так как многолетние режимные наблюдения за склоновыми процессами выполнялись локально и весьма непродолжительное время (с 2011 г. на отдельных участках территории горнолыжного комплекса). Поэтому нами в качестве основного метода был выбран прогноз на основе прямых инженерно-геологических аналогов, но с детерминированным прогнозированием на локальном уровне [4]. В качестве аналогов использовались эталонные участки, на которых последовательно выполнялся локальный количественный детерминированный прогноз с последующим переносом данных на всю исследуемую территорию.

В связи с нехваткой данных для осуществления количественного прогноза нами использовалась качественная оценочная шкала с использованием категорий «неизбежно», «возможно», «маловероятно». При этом прогнозируемая вероятность принималась достоверной при условии неизменности таких параметров, как уклон земной поверхности и строение грунтовой толщи.

Прогнозирование оползневой опасности осуществлялось поэтапно.

1 этап. В рамках полевого периода выявлялись границы развития склоновых процессов, устанавливались вид оползней, тип и положение поверхности скольжения, основные факторы и механизм оползания, выполнялся комплекс геофизических и горнопроходческих работ с отбором образцов грунта. Затем проводились лабораторные исследования состава, строения и физико-механических свойств грунтов, необходимых для расчёта параметров устойчивости склонов.

2 этап. По результатам полевых и лабораторных исследований в среде ESRI – ArcGis была создана цифровая модель геологической среды масштаба 1:10 000. Одна из задач созданной модели – отражать основные компоненты геологической среды, такие как рельеф, строение верхней части геологического разреза, состав и физико-механические свойства грунтов, глубина залегания уровня грунтовых вод, в той или иной степени необходимые для оценки и прогноза оползневой опасности. Дополнительно была также создана база данных, в которую вносились сведения о типе оползней, фазе оползневого цикла, геометрические параметры оползневых тел.

3 этап. На основе двухмерной многослойной модели геологической среды посредством анализа баз данных была проведена типизация по грунтовым условиям.

Табл. 1

Схема типизации грунтовых толщ

Верх	Четвертичные суглинки и глины (A)			Четвертичные суглинки и глины с дресвой и щебнем < 10% (B)			Четвертичные суглинки и глины с дресвой и щебнем > 10% (C)			Техногенные глинистые грунты с дресвой и щебнем (D)		
	Мощность, м											
	< 1.5	1.5-4.0	> 4.0	< 1.5	1.5-4.0	> 4.0	< 1.5	1.5-4.0	> 4.0	< 1.5	1.5-4.0	> 4.0
Низ	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
P ₂ kz (I)	-	-	A ³ _{I-III}	-	-	-	C _I ¹	C _I ²	-	-	-	-
P ₂ ur (II)	-	-		B _{II} ¹	B _{II} ²	-	C _{II} ¹	-	-	-	D _{II-III} ²	D _{II-III} ³
P ₃ sd (III)	-	-		B _{III} ¹	B _{III} ²	-	-	-	-	-		
dp Q ₃₋₄ (IV)	-	-	-	B _{IV} ¹	-	-	-	-	-	-	D _{IV} ²⁻³	

При типизации учитывались состав и мощность четвертичных и техногенных отложений, тип и мощность подстилающей толщи дочетвертичных образований. В первую очередь акцентировалось внимание на наличии глинистых отложений, а также крупнообломочных грунтов с глинистым заполнителем, поскольку присутствие грунтов такого типа зачастую является необходимым условием для развития оползней (табл. 1). Дополнительно проводилась типизация территории по положению уровня грунтовых вод в течение года.

4 этап. В границах исследуемой территории было выбрано 29 эталонных участков, в пределах которых численно оценивалась устойчивость склонов. При выборе участков использовались следующие критерии:

- наличие склоновых процессов с ясным механизмом в недалёком прошлом, настоящем или в будущем (начальная или подготовительная стадия оползания);
- типичное геологическое строение (наиболее представительные участки для того или иного таксона, выделенного при типизации по грунтовым условиям);
- типичный режим увлажнения грунтового массива, без периодов аномального увлажнения (постоянно увлажнённый, увлажнённый только весной и осенью).

Основным количественным показателем, используемым при локальной оценке и прогнозе устойчивости склонов, является коэффициент устойчивости K_y , представляющий собой отношение суммы удерживающих и сдвигающих сил, действующих по поверхности предполагаемого смещения оползневого тела (при круглоцилиндрической поверхности смещения отношение сил заменяется отношением моментов тех же сил).

На каждом эталонном участке был построен расчетный створ, представляющий собой геометрическую модель природного рельефа, дополненную информацией о геологическом строении и гидрогеологических условиях.

Пример построения расчетного створа приведен на рис. 1.

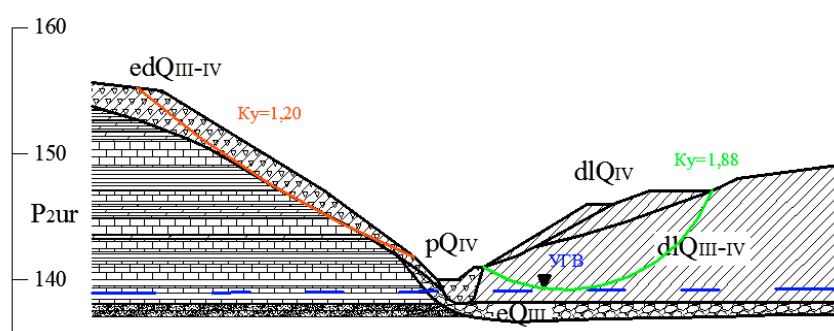


Рис. 1. Пример построения расчетного створа (красной линией показана вероятная поверхность скольжения потенциально неустойчивого склона, зеленой – потенциально устойчивого)

Расчет устойчивости был выполнен с помощью программного комплекса GEO 5 FINE (Чехия) на основании построения расчетной модели (рис. 2), полученной добавлением к геометрической модели информации о физико-механических свойствах грунтов, положении уровня грунтовых вод. Далее в зависимости от особенностей геологического строения выбиралась предполагаемая форма поверхности скольжения (круглоцилиндрическая или многоугольная) и метод расчета (Бишопа (Bishop simplified), Феллениуса – Петтерсона (Fellenius–Peterson), Спенсера (Spencer), Ямбу (Janbu simplified) или Morgenштерна – Прайса (Morgenstern–Price)).

Это позволило для каждого расчетного створа получить наиболее вероятные поверхности скольжения и значения коэффициентов устойчивости K_y в природном состоянии, а также при прогнозируемом водонасыщении.

Вероятностный прогноз развития оползневых смещений для каждого участка оценивался в зависимости от того, в какой диапазон попадало значение коэффициента устойчивости (табл. 2).

Граничные значения коэффициентов устойчивости были приняты на основании нормируемой надежности для объектов второго уровня ответственности (жилые и общественные здания) [7].

5 этап. На этом этапе на основании расчетов устойчивости на эталонных участках был произведен численный подбор критических уклонов поверхности для каждого из выделенных типов грунтовых толщ. Подбор заключался в вычислении граничных значений углов, соответствующих переходу от одной вероятностной стадии смещения к другой (согласно табл. 2).

6 этап. На основе созданной на втором этапе двухмерной многослойной модели геологической среды проводилось инженерно-геологическое районирование, которое выполнялось посредством анализа ранее сформированных баз данных. При районировании учитывались результаты типизации по грунтовым условиям и режиму сезонной увлажнённости грунтов. В рамках районирования была также введена типизация территории по уклону поверхности земли с шагом в 2° , что позволило снизить погрешность при расчетах коэффициента устойчивости ΔK_y до 0.1.

Дополнительно для каждой «элементарной ячейки» полученной модели помимо стандартного набора признаков, необходимых для реализации прогноза

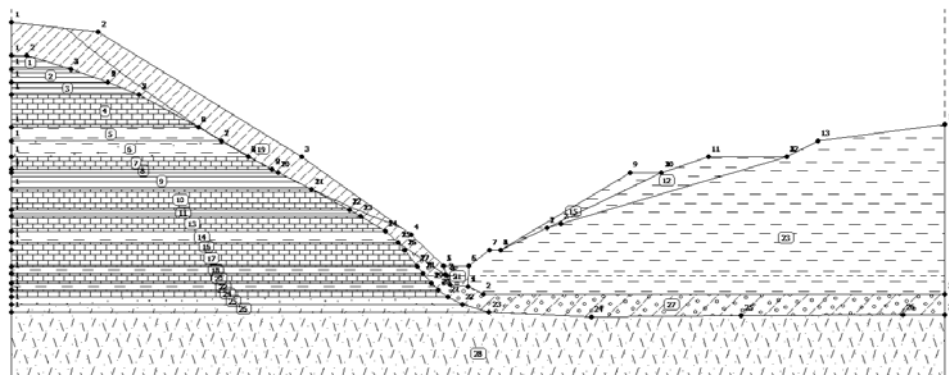


Рис. 2. Пример построения расчетной модели в ПК GEO 5 FINE

Табл. 2

Вероятность оползневых смещений в зависимости от значений коэффициента устойчивости склона

Вероятность смещения			Коэффициент устойчивости K_v	
Весна	Лето	Осень	При естественной влажности грунтов	При полном водонасыщении грунтов
неизбежно в течение всего года			$K_v \leq 1.0$	
неизбежно	возможно	неизбежно	$1.0 \leq K_v < 1.1$	$K_v \leq 1.0$
неизбежно	маловероятно	возможно	$1.1 \leq K_v < 1.2$	$1.0 \leq K_v < 1.1$
возможно	невозможно	маловероятно	$1.2 \leq K_v < 1.3$	$1.1 \leq K_v < 1.2$
маловероятно	невозможно	невозможно	$K_v \geq 1.3$	$1.2 \leq K_v < 1.3$
невозможно в существующих инженерно-геологических условиях			$K_v \geq 1.3$	

(уклона, типа грунтовой толщи, режима увлажнённости), прописывалось наличие водотока в основании склона и его тип (постоянный или временный), наличие и свежесть техногенной подрезки основания склона (этого года или ранее).

На заключительном этапе осуществлялся перенос данных с аналога на объект прогноза путём экстраполяции значений коэффициента устойчивости, полученного на предыдущем этапе: каждому минимальному таксону присваивались K_v , соответствующие характеру перечисленных выше признаков. Все логические операции осуществлялись в атрибутивной таблице цифровой модели, там же выполнялась увязка значений «коэффициент устойчивости – вероятность возникновения процесса» согласно табл. 2.

7 этап. В заключительной части осуществлялся анализ несоответствия результатов полевых наблюдений и результатов прогноза на основе прямых инженерно-геологических аналогов, индивидуально выявлялся недоучёт факторов формирования.

Для верификации полученного прогноза использовались следующие независимые данные:

1) информация о фазе (стадии) оползневого смещения, основанная на анализе как прямых (свежие трещины отрыва, проседание и пр.) так и косвенных (свежая подрезка основания, наклон деревьев и пр.) признаков активизации или стабилизации процесса, оцениваемых нами в ходе проведения визуального обследования склонов;

2) результаты сезонных инструментальных геодезических измерений, по которым можно оценить активность склоновых процессов (только для территории горнолыжного комплекса);

3) результаты дешифрирования космоснимков за последние несколько лет, которые, к сожалению, тоже не имеют высокую достоверность в связи с весьма сложной диагностикой свежих оползневых форм рельефа на залесённых территориях.

Далее, после совместного анализа нескольких вариантов прогноза и выявления причин их несоответствия, осуществлялась коррекция прогнозной карты. В крайне сложных случаях в середине осени осуществлялось повторное визуальное обследование, в процессе которого уточнялись инженерно-геологические условия, а также оценивалось изменение активности процесса по сравнению с летним периодом. При невозможности повторного обследования прогнозирование осуществлялось по принципу наилучшего сценария.

3. Результаты

3.1. Критические значения уклонов поверхности. На основании методики, описанной выше, для каждого типа грунтовой толщи были получены критические значения уклонов поверхности, приведенные в табл. 3.

Первичный анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы (оценивалась возможность образования оползневых смещений на естественных территориях в ближайший весенний период при водонасыщении).

1. Наиболее низкие значения критических углов, соответствующих переходу из устойчивого в неустойчивое состояние, имеют участки, на поверхности которых есть мощные (более 4 м) толщи глинистых грунтов (A_{I-III}^3). В этом случае возможно образование смещения по круглоцилиндрической поверхности глубиной заложения до 3 м уже при уклонах более 16° .

2. Практически невозможно образование оползневых смещений на территориях, сложенных породами средней перми и перекрытых маломощными четвертичными отложениями (менее 1.5 м). Эти типы грунтовых толщ (C_I^1 , C_{II}^1) имеют предельные углы 54° и 40° соответственно.

3. При уклонах более 26° – 30° неустойчивыми можно считать участки, на которых северодвинские и уржумские породы перекрываются естественными и техногенными глинистыми грунтами с включениями дресвы и щебня мощностью более 1.5 м (B_{II}^2 , B_{III}^2 , C_{II}^2 , D_{II-III}^2 , D_{II-III}^3). Глубина заложения оползней определяется мощностью отложений и может достигать 3–6 м. Такие же критические углы имеют отложения типа B_{III}^1 – глинистые грунты с дресвой и щебнем до 10% мощностью до 1.5 м по северодвинским породам. Оползневые смещения в этом случае имеют локальный характер с глубиной заложения до 1.2 м.

4. При углах менее 34° – 36° устойчивыми могут считаться участки, сложенными маломощными (менее 1.5 м) глинистыми отложениями с дресвой и щебнем до 10%, покрывающие породы уржумского яруса (B_{II}^1) или деляпсивные отложения dpQ_{3-4} (B_{IV}^1), сохранившие характер напластования и литологические

Табл. 3

Значения критических уклонов поверхности для различных типов грунтовых толщ при природной влажности (W_n) и полном водонасыщении (W_{sat})

Тип грунтовой толщи	Коэффициент устойчивости									
	< 1.0		1.0÷1.1		1.1÷1.2		1.2÷1.3		> 1.3	
	W_n	W_{sat}	W_n	W_{sat}	W_n	W_{sat}	W_n	W_{sat}	W_n	W_{sat}
A_{I-III}^3	21°	19°	20°	18°	19°	17°	18°	16°	16°	14°
B_{II}^1	39°	37°	38°	37°	37°	36°	35°	34°	32°	31°
B_{II}^2	36°	33°	34°	31°	33°	30°	32°	29°	30°	27°
B_{III}^1	36°	34°	35°	33°	32°	30°	32°	30°	30°	27°
B_{III}^2	34°	32°	33°	30°	32°	30°	30°	28°	28°	26°
B_{IV}^1	43°	40°	41°	39°	40°	38°	37°	36°	35°	33°
C_I^1	63°	59°	62°	58°	60°	56°	57°	54°	52°	50°
C_{II}^1	47°	44°	46°	43°	45°	42°	43°	40°	41°	38°
C_{II}^2	35°	34°	34°	33°	33°	32°	31°	30°	30°	29°
D_{II-III}^2	32°	31°	32°	30°	30°	29°	28°	26°	25°	23°
D_{II-III}^3	28°	27°	27°	26°	27°	25°	26°	24°	25°	22°
D_{IV}^{2-3}	32°	31°	32°	30°	30°	29°	28°	26°	25°	23°

особенности уржумских красноцветов. Отличие лишь в том, что в первом случае возможно образование плоской поверхности скольжения по контакту четвертичных и коренных пород глубиной заложения 1.5–2 м, а во втором – круглоцилиндрической глубиной заложения более 10 м.

Основные характеристики оползневых тел для каждого типа грунтовой толщи приведены в табл. 4.

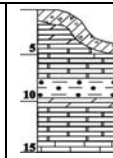
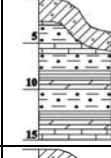
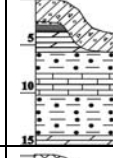
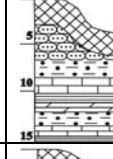
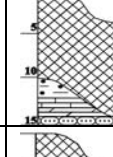
3.2. Устойчивость склонов и откосов. Совместный анализ типов грунтовых толщ и уклонов поверхности в рамках созданной модели позволил оценить устойчивость склонов в пределах г. Иннополис и горнолыжного комплекса «Казань».

С точки зрения оползневой опасности большая часть правого коренного склона р. Свяги (северо-западная граница г. Иннополис), особенно участки, приуроченные к верхней части, в целом является устойчивой ($K_y > 1.3$).

Верхние и средние части склонов многочисленных оврагов и балок, повсеместно расчленяющих территорию, в большинстве случаев характеризуются достаточной устойчивостью ($K_y > 1.3$). Участки с более низкими значениями K_y сосредоточены, как правило, у основания склонов, где оползневым деформациям подвергаются колювиальные, пролювиальные и делювиальные четвертичные отложения мощностью 2.0÷5.0 м (круглоцилиндрическая, реже полигональная поверхность скольжения, глубина заложения – 1.5÷8.0 м, $K_y \sim 1.0÷1.1$). Основная причина потери устойчивости – наличие водотоков, подрезающих склоны, пластовые выходы подземных вод, приводящие к избыточному увлажнению грунтов, реже – суффозионное разуплотнение.

Табл. 4

Характеристики оползневых тел в зависимости от типа грунтовой толщи

Тип грунтовой толщи	Поверхность скольжения (глубина заложения, м)	Тип грунтовой толщи	Поверхность скольжения (глубина заложения, м)
A_{I-III}^3	 Круглоцилиндрическая, по четвертичным породам (3.0 м)	C_I^1	 Плоская, по пермским породам (5.0÷6.0 м)
B_{II}^1	 Плоская, по контакту четвертичных и пермских отложений (1.5÷3.0 м)	C_{II}^1	 Плоская, по пермским породам (более 10 м)
B_{II}^2	 Плоская, по контакту четвертичных и пермских отложений (1.7 м)	C_{II}^2	 Круглоцилиндрическая, по четвертичным породам (3.0 м)
B_{III}^1	 Плоская, по контакту четвертичных и пермских отложений (1.2 м)	D_{II-III}^2	 Круглоцилиндрическая, по контакту техногенных и пермских отложений (2.5 м)
B_{III}^2	 Круглоцилиндрическая, по четвертичным породам (3.0 м)	D_{II-III}^3	 Круглоцилиндрическая, по техногенным отложениям (6.0÷7.0 м)
B_{IV}^1	 Круглоцилиндрическая, по дислоцированным породам (более 10 м)	D_{IV}^{2-3}	 Круглоцилиндрическая, по техногенным отложениям (3÷4 м)

Примечание: штриховка – литологическая характеристика грунтов согласно [8, 9].

Более низкими значениями K_y по сравнению с ранее приведёнными территориями характеризуются приустьевые части балок и оврагов коренного склона р. Свяги, а также склоны левой дочерней овражно-балочной системы большого Введенского оврага ($K_y \sim 1.0 \div 1.25$). Это связано с преобладанием слабых пролювиально-делювиальных суглинков и крутизной склонов (до 32°) при высоте 10÷15 м. Наиболее вероятные поверхности скольжения – круглоцилиндрические и полигональные, глубина заложения – до 6÷8 м.

Коэффициенты устойчивости склонов правобережья р. Сулицы изменяются от 0.92 до 1.45, редко более. В целом указанная территория характеризуется пониженной устойчивостью по сравнению с ранее приведёнными участками (доля склонов с K_y более 1.3 незначительна). Последнее объясняется большой крутизной склонов (на некоторых участках более 60°) и наличием слабых сильно дислоцированных карбонатно-терригенных пород dpQ_{3-4} , характеризующихся меньшей плотностью и более низкой прочностью по сравнению с ненарушенными

аналогами. Не последнее значение имеет интенсивное техногенное воздействие, которое выражается в подрезке оснований склонов, поливе, сбросе сточных вод и т. п. Так, например, склон, расположенный вдоль северо-восточного края гольф-поля, характеризуется $K_y \sim 1.0 \div 1.1$ (при полном водонасыщении). Предполагаемая поверхность скольжения – круглоцилиндрическая или очень близкая к ней с глубиной заложения – $5 \div 20$ м.

Низкой устойчивостью характеризуются откосы насыпей на территории горнолыжного комплекса ($K_y \sim 1.1 \div 1.3$). Локально здесь выделены три наиболее опасных участка, где расчётные низкие значения K_y подтверждаются неоднократным смещением насыпных глинистых грунтов по круглоцилиндрической поверхности с глубиной заложения до 8 м:

– средняя часть «Зелёной» трассы (K_y чуть больше 1.1 при полном водонасыщении);

– южный склон «Красной» горнолыжной трассы ($K_y \sim 0.45$ при полном водонасыщении);

– северный склон «Чёрной» горки ($K_y \sim 0.95$ при полном водонасыщении).

Основная причина низкой устойчивости указанных участков – недостаточная плотность грунтов насыпи.

Минимальными значениями K_y характеризуются также подмываемые постоянными водотоками края насыпей дорожного полотна на юго-востоке г. Иннополис, суммарной протяжённостью 1.2 км – K_y не более 1.0 (наиболее вероятная поверхность скольжения – прямая, реже – круглоцилиндрическая, глубина заложения – до 2.0 м).

3.3. Прогноз оползневой опасности на 2014 г. Итоговая комплексная прогнозная схема развития склоновых процессов в 2014 г. на территории горнолыжного комплекса «Казань» и г. Иннополис приведена на рис. 3.

Весной 2014 г. согласно проведённым расчётам оползневыми процессами (без учёта солифлюкции) неизбежно будут затронуты 0.36 км^2 исследуемой территории (1.58%), возможно развитие процессов на локальных участках суммарной площадью 0.48 км^2 (2.09%), низкая вероятность развития оползней (маловероятно) характерна для 1.62 км^2 (0.7%), (рис. 4).

Наиболее подвержены оползневым деформациям будут нижние части склонов оврагов и балок, реже срединные и верхние части (привершинные части оврагов на северо-западе г. Иннополис, перепланированные и вновь созданные склоны на территории горнолыжного комплекса).

Подавляющее большинство оползней будет представлено вязкопластическими разностями, относительно небольшими по размеру (до 100 м^2) с глубиной заложения, редко превышающей 1.5 м. Оползни скольжения будут развиваться весьма локально: преимущественно в приустьевых частях больших балок на северо-западе г. Иннополис, в центральной части овражно-балочной системы Введенский овраг, а также в пределах правого коренного склона р. Сулицы. Суффозионные оползни и оползни-обвалы будут развиваться весьма локально, в пределах небольших участков.



Рис. 3. Комплексная прогнозная схема развития склоновых процессов в 2014 г. на территории горнолыжного комплекса «Казань» и г. Иннополис. Условные обозначения: 1 – неизбежно в течение всего года, 2 – неизбежно весной и осенью, возможно летом, 3 – неизбежно весной, возможно осенью, маловероятно летом, 4 – возможно весной, маловероятно осенью, невозможно летом, 5 – маловероятно весной, невозможно осенью и летом, 6 – невозможно в существующих инженерно-геологических условиях

Летний период 2014 г. будет характеризоваться весьма низкой активностью склоновых процессов. Неизбежно склоновые процессы будут развиваться только в пределах 0.1 км^2 (0.44%), тем не менее возможно развитие процессов на локальных участках общей площадью 0.06 км^2 (0.26%), маловероятно – для 0.20 км^2 (0.88%) (рис. 4).

В большинстве случаев развитию оползней будут подвержены локальные участки с неглубоким залеганием уровня грунтовых вод, а также нижние части склонов малых эрозионных форм, для которых характерно наличие постоянных водотоков большого расхода (срединные, реже привершинные части оврагов и балок).

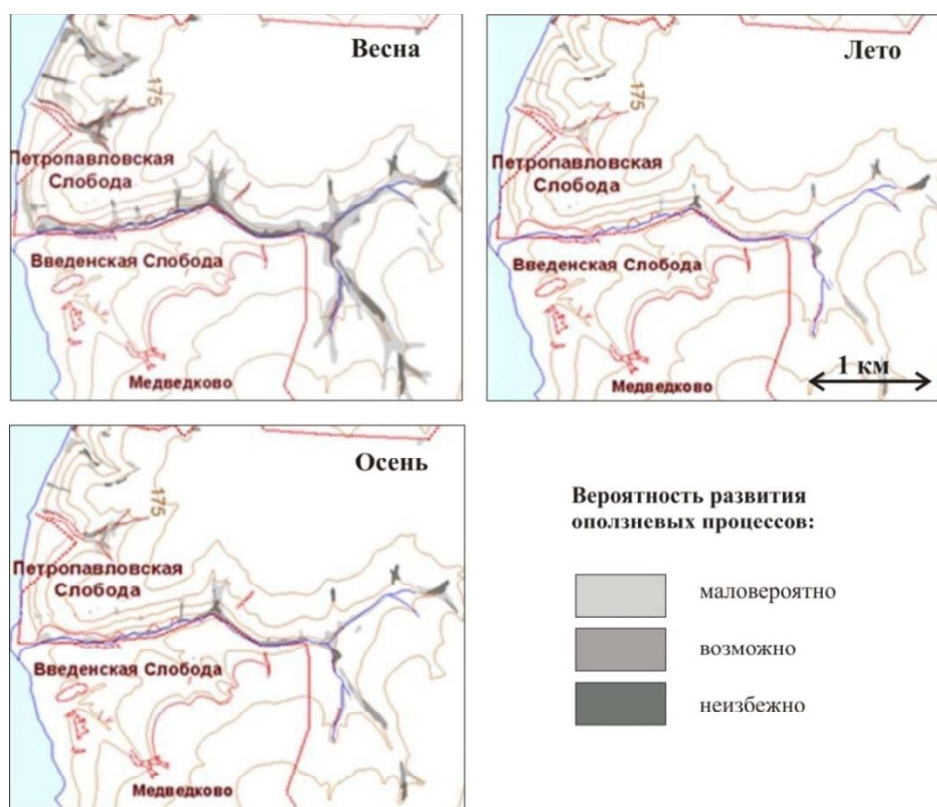


Рис. 4. Краткосрочный прогноз развития склоновых процессов (на 2014 г.) для северо-западной части г. Иннополис

Наиболее вероятный преобладающий тип оползней – вязкопластические небольшого размера (до 70 м^2) с глубиной заложения не более 1.5 м. Будут наблюдаться единичные оползни скольжения, суффозионные оползни и оползни-обвалы.

Осень 2014 г. будет характеризоваться большей активностью склоновых процессов по сравнению с летним периодом: оползни будут неизбежны для 0.16 км^2 (0.7%), возможны на локальных участках общей площадью 0.20 км^2 (0.88%), низкая вероятность развития оползней будет характерна для 0.48 км^2 (2.09%). Подвержены развитию оползневых процессов будут преимущественно нижние части склонов оврагов, реже балок (рис. 4).

Будут наблюдаться незначительные вязкопластические оползни (до 100 м^2) с глубиной заложения, как правило, не более 1.5 м. Оползни скольжения, так же как и летом, будут развиваться лишь на незначительных участках: нижние части склонов некоторых оврагов и балок на северо-западе, юго-востоке и центральной части г. Иннополис и территории горнолыжного комплекса. Суффозионные оползни и оползни-обвалы будут развиваться только в пределах небольших участков.

Согласно СНиП 22-01-95 [10] в весенний и осенний период по категории опасности оползневые процессы на исследуемой территории характеризуются как опасные, в летний период – умеренно опасные. Наибольшие оползневые

деформации склонов и откосов будут наблюдаться в весенний период (начиная с периода снеготаяния), наименьшие – летом. Наибольшее число оползней, предположительно, будет сосредоточено в нижней части склонов. Территории с неглубоким залеганием грунтовых вод при прочих благоприятных условиях будут характеризоваться развитием оползней на протяжении весны, лета и осени.

Заключение

Проведённые исследования показали, что при отсутствии достаточных сведений по геологическому строению и физико-механическим свойствам грунтов, а также недостаточности данных многолетних режимных наблюдений региональный прогноз оползневой опасности возможно осуществлять в рамках двухуровневого моделирования: сначала в границах локальных участков с использованием программ по расчёту устойчивости откосов, затем на всю территорию путём переноса и коррекции данных в рамках цифровой двухмерной модели геологической среды.

На основе проведённого прогноза оползневой опасности нами составлен перечень первоочередных противооползневых мероприятий, даны рекомендации для дальнейшего освоения, а также была разработана схема организации мониторинга склоновых процессов, что без сомнения имеет большую практическую значимость, учитывая масштаб и короткие сроки строительства нового города. При накоплении достаточного количества временных рядов наблюдений в рамках такого мониторинга возможно осуществление стохастического прогноза на базе уже существующей модели геологической среды, что позволит выявить недостатки и возможно дополнить и откорректировать используемый в предлагаемой работе метод инженерно-геологической аналогии.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. Овражная эрозия Востока Русской равнины / Под ред. А.П. Дедкова, В.И. Мозжерина, Ф.Ф. Бойко. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1990. – 140 с.
2. Средняя Волга: геоморфологический путеводитель / Науч. ред. А.П. Дедков. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1991. – 147 с.
3. Геология Татарстана: Стратиграфия и тектоника / Под ред. Б.В. Бутова. – М.: ГЕОС, 2003. – 402 с.
4. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярз Л.А. Инженерная геодинамика. – М.: КДУ, 2007. – 327 с.
5. ГОСТ Р 22.1.06-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных геологических явлений и процессов. Общие требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 16 с.
6. Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика. – СПб.: Наука, 2001. – 416 с.

7. ГОСТ 20522-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 28 с.
8. ГОСТ 21.302-96 СПДС. Условные графические обозначения в документации по инженерно-геологическим изысканиям. – М., 1996. – 19 с.
9. Инструкция по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000. – М.: Роскомнедра, 1995. – 244 с.
10. СНИП 22-01-95 «Геофизика опасных природных воздействий». – М., 1996. – 7 с.

Поступила в редакцию
15.01.14

Латыпов Айрат Исламгалиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры общей геологии и гидрогеологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: airatlat@mail.ru

Жаркова Надежда Ивановна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры общей геологии и гидрогеологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: kazannad@rambler.ru

Нурiev Ильдар Саяхович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры общей геологии и гидрогеологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: nuriev_ild@mail.ru

Чернийчук Глеб Александрович – аспирант кафедры общей геологии и гидрогеологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: glebkazan@mail.ru

* * *

MODELLING OF LANDSLIDE PROCESSES FOR LANDSLIDE HAZARD FORECASTING WITHIN THE TERRITORY OF “KAZAN” SKI COMPLEX AND THE CITY OF INNOPOLIS

A.I. Latypov, N.I. Zharkova, I.S. Nuriev, G.A. Cherniichuk

Abstract

A regional short-term landslide hazard forecast was performed using a digital model of geological medium and the method of engineering-geological analogy: an engineering-geological zoning was conducted; using data from standard areas, the critical values of surface slopes were calculated for the identified types of soils and different types of humidity; the obtained data was extrapolated, verified and corrected. It was established that the highest level of forecasted landslide susceptibility is typical for spring 2014 (2.46 km², 5.37%), the lowest – for the summer (0.36 km², 1.58%). The lower parts of the slopes will be mainly exposed to landslide deformations. Earthflow is the predominant type of landslides, with rupture surface up to 1.5 m. There is a probability of occurrence of single slides, suffusion landslides and soil-falls.

Keywords: landslide hazard forecasting, modelling of landslide processes, stability of slopes.

References

1. Dedkova A.P., Mozzherina V.I., Boiko F.F. (Eds.) Ravine Erosion in the East of the Russian Plain. Kaza, Izd. Kazan. Univ., 1990. 140 p. (In Russian)

2. The Middle Volga: Geomorphological Guide (Ed. by A.P. Dedkov). Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1991. 147 p. (In Russian)
3. Geology of Tatarstan: Stratigraphy and Tectonics (Ed. by B.V. Burov). Moscow, GEOS, 2003. 402 p. (In Russian)
4. Bondarik G.K., Pendin V.V., Yarg L.A. Engineering Geodynamics. Moscow, KDU, 2007. 327 p. (In Russian)
5. State Standard R 22.1.06-99. Security in emergency situations. Monitoring and forecasting of dangerous geological phenomena and processes. Moscow, IPK Izd. standartov, 1999. 16 p. (In Russian)
6. Ivanov I.P., Trzhtsinskii Yu.B. Engineering Geodynamics. Saint Petersburg, Nauka, 2001. 416 p. (In Russian)
7. State Standard 20522-96. Soils. Methods of statistical processing of test results. Moscow, IPK Izd. standartov, 1997. 28 p. (In Russian)
8. State Standard 21.302-96. Design Documentation for Construction. Graphical symbols in documentation on engineering and geological investigations. Moscow, 1996. 19 p. (In Russian)
9. Instruction on compilation and pre-publishing preparation of the sheets of the State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200 000. Moscow, Roskomnedra, 1995. 244 p. (In Russian)
10. Construction Regulation 22-01-95. Geophysics of dangerous natural impacts. Moscow, 1996. 7 p. (In Russian)

Received
January 15, 2014

Latypov Airat Islamgalievich – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of General Geology and Hydrogeology, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: airatlat@mail.ru

Zharkova Nadezhda Ivanovna – PhD in Geology and Mineralogy, Associate Professor, Department of General Geology and Hydrogeology, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: kazannad@rambler.ru

Nuriev Ildar Sayakhovich – PhD in Geology and Mineralogy, Associate Professor, Department of General Geology and Hydrogeology, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: nuriev_ild@mail.ru

Cherniichuk Gleb Aleksandrovich – PhD Student, Department of General Geology and Hydrogeology, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: glebkazan@mail.ru