

УДК 624.131

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОСТА ЧЕРЕЗ Р. ПОШНАРКУ В ЧУВАШИИ

Сахаровский Александр Владимирович<sup>1</sup>,  
sakharovskiy\_sgt@bk.ru

Строкова Людмила Александровна<sup>2</sup>,  
sla@tpu.ru

<sup>1</sup> ОАО «Сибгипротранс»,  
Россия, 630099 г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 15.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** изучения оползневых процессов заключается в том, что они приводят к чрезвычайным ситуациям с угрозой разрушения сооружений, использования земель, безопасности людей. Особые трудности при изучении оползней вызывают вопросы прогнозирования активизации оползневого процесса.

**Целью** данного исследования является оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий площадки мостового перехода и прогноз развития оползневого процесса на склонах с помощью моделирования методом конечных элементов.

**Объектом** исследования является геологическая среда района проектируемого мостового перехода в пределах Приволжской возвышенности. Рассмотрены основные факторы, влияющие на развитие оползневого процесса: геоморфологические и тектонические условия; литологический состав; физико-механические свойства пород, гидрологические и гидрогеологические условия района.

**Методы:** краткий обзор литературы; анализ информации, полученной из фондов изыскательской компании, расчет устойчивости склонов, моделирование поведения грунтового массива методом конечных элементов.

**Результаты.** Дана характеристика основных факторов оползневого процесса данной территории, приведены результаты расчета устойчивости склонов по опасным сечениям различными методами. Склон является неустойчивым в целом. При сезонном повышении уровня подземных вод моделирование показало расширение зоны оползневых деформаций по левому борту до 107 м, по правому берегу реки до 10 м от русла.

**Выводы.** Основными причинами деформаций являются: слабоплатифицированные юрские глины, слагающие весь склон; подземные воды, формирующиеся в пределах плато и разгружающиеся в оползневые накопления, поддерживая в них высокую влажность. В качестве несущего слоя для опор моста рекомендуется использовать слой пермских глинистых отложений с высокими физико-механическими характеристиками.

### Ключевые слова:

Инженерно-геологические условия, региональные факторы, грунт, оползень, расчет устойчивости склона, расчетная модель.

### Введение

Оползни широко распространены в мире, затрагивают многие виды хозяйственной деятельности, являются источником материального ущерба, иногда с угрозой жизни людей. Трасса новой железной дороги Москва–Казань проходит через Среднее Поволжье, издавна известное широким развитием оползневых и эрозионных процессов. Изучением оползней здесь занимались многие знаменитые инженеры-геологи: А.П. Павлов (1903, 1935), А.Н. Семихатов (1914), Н.Ф. Погребов (1915), М.И. Декабрун и П.П. Быков (1926), Л.Н. Бернацкий (1935) [1], Г.С. Золотарев (1949–1959) [2], Е.П. Емельянова (1972) [3]. Для изучения оползней были созданы оползневые станции: Горьковская и Нижневолжская в 1946 г., Ульяновская – в 1961 г. В 1963 г. состоялось оползневое совещание, на котором были подведены итоги работы оползневых станций, рассмотрены факторы развития и механизмы волжских оползней, опыт применения противооползневых мероприятий и оценка их эффективности.

В кандидатской диссертации Г.А. Голодковской [4], а также в работах В.Г. Камышева-Елпатьевская и

др., 1960; В.И. Бутаков, (1970) рассмотрены вопросы палеогеографии правобережья Волги и закономерности формирования склонов. В работе Т.С. Хромовой и др. (1980) рассмотрены вопросы пространственной обусловленности распространения оползней в связи с характером новейших тектонических движений. Имеются единичные работы по оценке напряженного состояния оползневых берегов р. Волги на основе моделирования с использованием метода конечных элементов (И.И. Каменкова и др., 1975), исследованиям ползучести склонов (Е.Г. Качугин, 1976). В последние годы появился ряд статей по результатам применения различных методов расчета устойчивости склонов и откосов в условиях региона (А.Н. Богомоллов и др., 2004; Р.И. Кашлев, 2004; и др.) [5].

Изучению основных закономерностей формирования оползней, их пространственного распределения в связи с гидрометеорологическими условиями посвящены работы [6–9], моделированию их активности – [10–15], роли техногенных факторов в развитии и активизации оползней, контролем их состояния и разработкой защитных мероприятий – [15–22].

Целью данного исследования является оценка инженерно-геологических и гидрогеологических условий на площадке мостового перехода через р. Пошнарку в Чувашии и прогноз развития оползневого процесса на склонах с помощью моделирования на базе метода конечных элементов.

#### Методы исследования и эксперимент

Исследование включало анализ литературных и фондовых материалов, полученных при инженерно-геологических изысканиях, проведенных в период с августа 2015 по июнь 2017 г.; моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива при изменении уровня подземных вод, проведенное осенью 2019 г. в отделении геологии ТПУ.



Рис. 1. Приволжская эрозионная возвышенность

Fig. 1. Volga erosion upland

В инженерно-геологическом отношении участок мостового перехода через р. Пошнарку изучен достаточно подробно в 2015–2018 гг. Были выполнены следующие виды работ: изучение материалов региональных геологических фондов; инженерно-геологическая съемка участка в полосе до 300 м; геодезические работы со стационарными наблюдениями; бурение 26 скважин глубиной 20–80 м, проходка 3 шурфов; полевое определение механических свойств грунтов методом среза целиков грунта и dilatометром; опробование и лабораторные исследования порядка 350 образцов грунта и 5 проб воды; камеральная обработка материалов и расчёты устойчивости склонов.

По результатам инженерных изысканий построена карта инженерно-геологических условий оползневого склона с элементами геоморфологических таксонов М1:1000 и указанием расчетных сечений устойчивости склонов (рис. 2) [23].

Оползневой процесс охватывает склоны р. Пошнарка с удалением пограничной бровки срыва до 160 м от местного базиса эрозии. По крутизне склоны относятся к пологим и средней крутизны от 10 до 25° на оползневых ступенях, а также крутым и очень крутым (30°...50°, редко до 60°) на стенках отрыва (рис. 3).

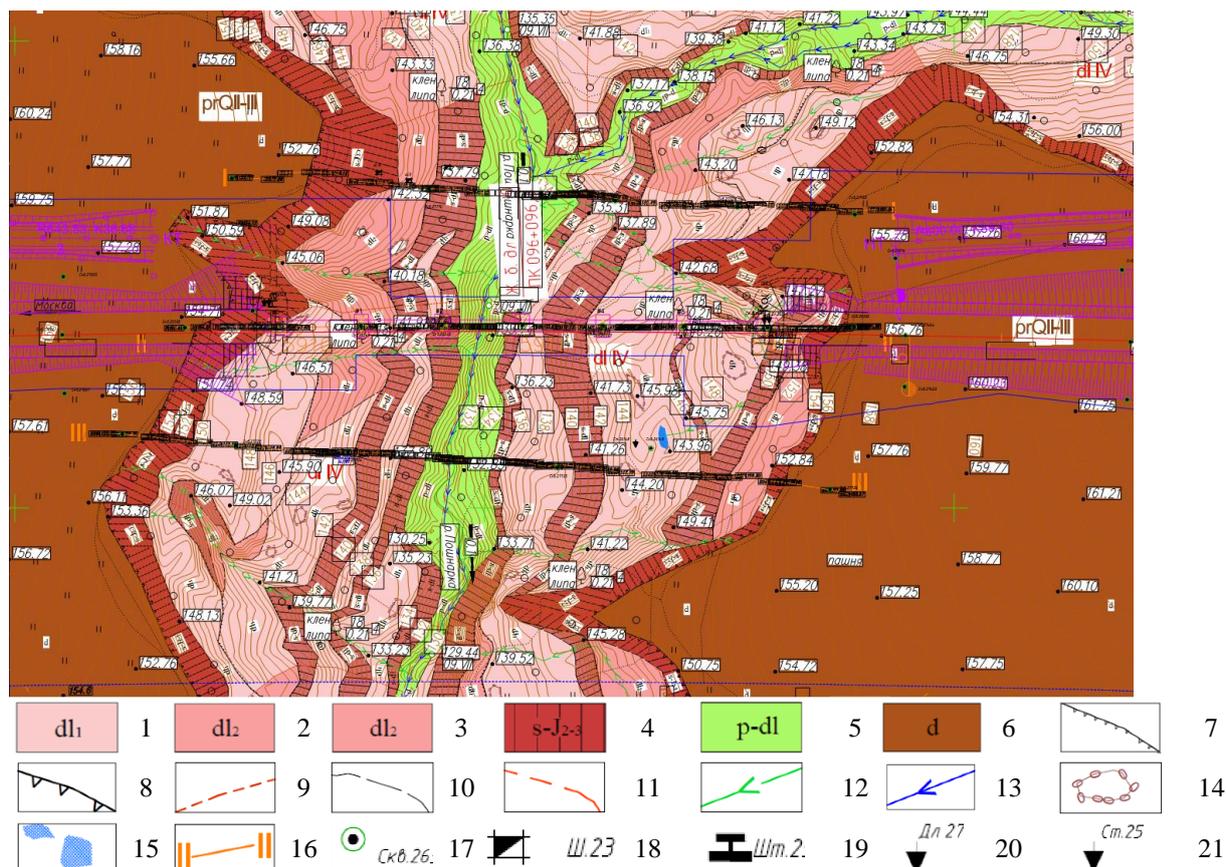
#### Характеристика инженерно-геологических условий

Исследуемый участок расположен в пределах северной части Приволжской эрозионной возвышенности, которая крутым уступом обрывается к р. Волге. Это волнистая равнина с абсолютными высотами 160...190 м, в результате длительного эрозионного процесса сильно расчленена сетью рек, балок и оврагов на изолированные водоразделы с уклонами 1...1,5° (рис. 1). Густота овражного расчленения составляет в среднем 0,27 км/км<sup>2</sup>, балочного – 1,31 км/км<sup>2</sup>. Формами эрозионного расчленения являются ложбины, балки, овраги, вложенные друг в друга. Здесь имеются все условия для возникновения оползней.

Поверхность склона густо залесена и задернована, поросшая древесной растительностью (осина, дуб, липа) с признаками саблевидного изгибания стволов деревьев (рис. 4). Ближе к базису эрозии реки отмечаются поверхности, заросшие кустарником.

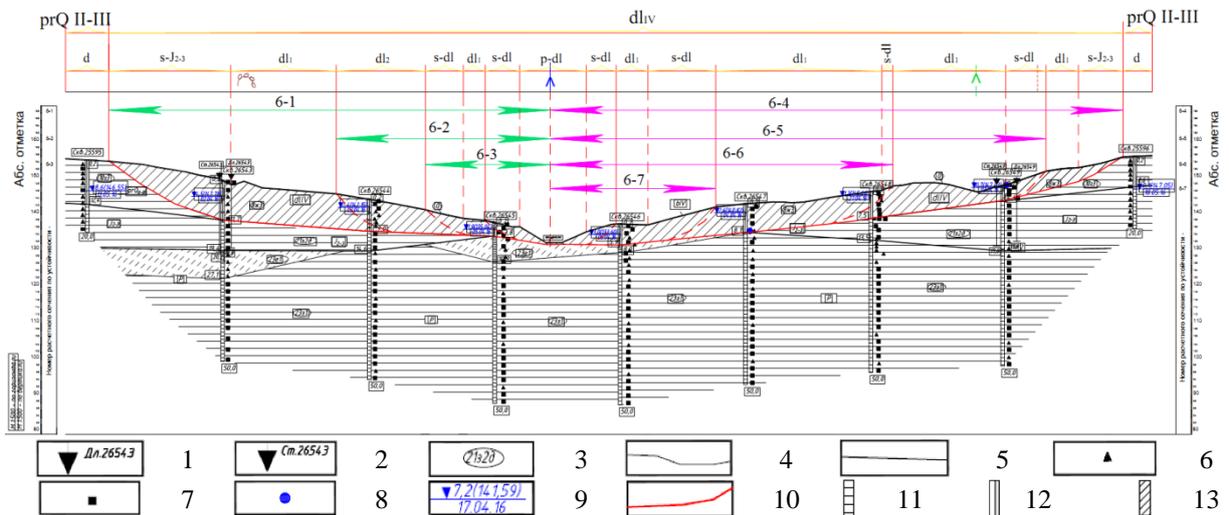
На левом борту, в пределах 1-й и 2-й террасированной поверхности оползневых тел (ступеней) от пограничной стенки отрыва (s-J<sub>2-3</sub>), отмечаются выположенные поверхности с признаками длительной задержки поверхностного стока. Аналогичная ситуация, за исключением направления тальвегов временных водотоков, отмечается со стороны правого борта ручья в пределах 1-й и 2-й оползневой ступени.

Высота пограничных стенок отрыва правого борта с формированием инсеквентного среза в средневерхнеюрских отложениях (J<sub>2-3</sub>) и современных четвертичных отложениях покровного генезиса (rgQ<sub>II-III</sub>) составляет 3...8 м, со стороны левого борта – 2...5 м. Также отмечаются вторичные бровки и стенки отрыва высотой до 3...4 м (рис. 5). Юрские отложения представлены глиной полутвердой (ИГЭ-21з2д), с примесью органических веществ 6,4 %. Покровные отложения представлены глиной полутвердой и глиной тугопластичной. Простираение пограничных бровок срыва преимущественно параллельно руслу постоянного водотока.



**Рис. 2.** Карта инженерно-геологических условий долины р. Пошнарка с геоморфологическими элементами М1:1000 и указанием расчетных сечений устойчивости склонов. Условные обозначения: Геоморфологические элементы зон: развития дельтаэвских отложений (1–5): 1 – пологие и средней крутизны (1...15°) террасированные поверхности оползневых тел с бугристо-западинным микрорельефом; 2 – средней крутизны и крутые (15...25°, реже до 30°) поверхности оползневых тел с бугристо-западинным микрорельефом; 3 – стенки отрыва и транспортировки вторичных оползней в четвертичных отложениях. Крутые и очень крутые до 30...45° местами обрывистые поверхности (до 60°); 4 – пограничные стенки отрыва, с формированием инсеквентного среза в средне-верхнеюрских отложениях (J<sub>2-3</sub>). Крутые и очень крутые (30...50°), местами обрывистые поверхности (до 60°); 5 – пологие и средней крутизны (5...20°) поверхности постоянных и временных водотоков на оползневых склонах, с активной донной и боковой эрозией; 6 – покровных отложений. Пологие и средней крутизны (1...10°) денудационно-аккумулятивные поверхности (делювиального генезиса). Микрорельеф преимущественно выровненный. Другие знаки: 7 – бровки срыва в четвертичных отложениях; 8 – бровки срыва в средне-верхнеюрских отложениях (J<sub>2-3</sub>); 9 – гребни оползневые; 10 – тыловой шов и граница геоморфологических структур; 11 – линия базиса оползневой денудации; 12 – тальвег временных водотоков со слабо выработанными руслами; 13 – тальвег постоянных и временных водотоков с хорошо выработанным руслом; 14 – вал выпирания на оползневых ступенях и границах смежных структур; 15 – мочажина, выявленная на момент обследования; 16 – линия инженерно-геологического разреза и расчетного сечения; 17 – скважина на плане, ее номер; 18 – шурф на плане и его номер. Точки испытания грунтов и ее номер: 19 – штампом; 20 – dilatометром; 21 – статическим зондированием

**Fig. 2.** Map of engineering-geological conditions of the valley of the river Poshnarka with geomorphological elements M1:1000 and indication of calculated sections of slope stability. Legend: Geomorphological elements of zones: development of landslide deposits (1–5): 1 – flat and average steepness (1...15°) terraced surfaces of landslide bodies with a hummock-and-hollow microrelief; 2 – average steepness and steep (15...25°, less often up to 30°) surfaces of landslide bodies with a hummock-and-hollow microrelief; 3 – scarps in quaternary sediments. Steep and very steep to 30...45° sometimes steep surfaces (up to 60°); 4 – scarps in the middle-upper Jurassic sediments (J<sub>2-3</sub>). Steep and very steep (30...50°), sometimes steep surfaces (up to 60°); 5 – gentle and medium steepness (5...20°) surfaces of permanent and temporary watercourses on landslide slopes, with active bottom and lateral erosion; 6 – cover deposits. Flat and medium steepness (1...10°) denudation-accumulative surfaces (deluvial genesis). The microrelief is predominantly aligned. Other signs: 7 – top in quaternary sediments; 8 – top in the middle-upper Jurassic sediments (J<sub>2-3</sub>); 9 – landslide ridges; 10 – head and boundary of geomorphological structures; 11 – basis line of landslide denudation; 12 – thalweg of temporary streams with poorly developed channels; 13 – thalweg of permanent and temporary watercourses with a well-developed channel; 14 – ridges on landslide benches and boundaries of adjacent structures; 15 – swamp identified at the time of survey; 16 – line of engineering-geological section and design section; 17 – borehole on the plan, its number; 18 – pit on the plan and its number. Soil test points and its number: 19 – plate loading test; 20 – dilatometer; 21 – cone penetration test



**Рис. 3.** Геологический разрез. Условные обозначения: Точка испытания грунтов и ее номер: 1 – dilatометром; 2 – статическим зондированием; 3 – номер инженерно-геологического элемента; 4 – граница инженерно-геологического элемента; 5 – стратиграфическая граница; 6 – образец грунта нарушенной структуры; 7 – образец грунта ненарушенной структуры; 8 – проба воды; 9 – установившийся уровень грунтовых вод, в числителе – глубина и абсолютная отметка, м, в знаменателе – дата замера; 10 – поверхность скользящей оползня. Консистенция глинистых грунтов: 11 – твердые, полутвердые; 12 – тугопластичные; 13 – мягкопластичные

**Fig. 3.** Geological section. Legend: Soil test point and its number: 1 – dilatometer; 2 – cone penetration test; 3 – number of engineering-geological unit; 4 – boundary of engineering-geological unit; 5 – stratigraphic boundary; 6 – disturbed soil sample; 7 – undisturbed soil sample; 8 – sample of water; 9 – ground water level, depth and absolute mark, m – in the numerator, the date of measurement – in the denominator; 10 – surface of rupture. Consistency of clay soils: 11 – very stiff, stiff; 12 – firm-stiff; 13 – soft-firm



**Рис. 4.** Ступенчатая структура поверхности оползневых тел на левом борту реки

**Fig. 4.** Step structure of the surface of landslides on the left side of the river



**Рис. 5.** Вторичная бровка срыва со стенкой отрыва (правый борт реки)

**Fig. 5.** Secondary edge of the break with the wall of separation (right side of the river)

На поверхности оползневого массива по обоим бортам отмечаются пересекающиеся в крест простирацию оползневых структур русла действующих на момент обследования (май 2017 г.) временных водотоков с дебитами более 0,1 л/с.

Оползневые отложения в водораздельных зонах подвержены вторичным инсеквентным деформациям. Поверхность склона имеет бугристо-западинный микрорельеф с отдельными валами выпирания на разных уровнях оползневых тел, а также протяженными до основания склона оползневыми гребнями. Количество оползневых ступеней со стороны двух бортов р. Пошнарки составляет от трех до пяти.

Деляписивные отложения представлены: глиной тяжелой полутвердой с примесью органических веществ 6,2 %, суглинком тугопластичным (табл. 1). Зональность распространения деляписивных отложений следующая: суглинки тугопластичные распространены преимущественно со стороны левого борта р. Пошнарки, а также в центральной части оползневого массива, глины полутвердые распространены по большей части со стороны правого борта реки. Мощность деляписивных отложений на склонах составляет от 3,7 до 11,7 м.

Таблица 1. Сводная характеристика инженерно-геологических элементов (ИГЭ)  
Table 1. Summary characteristics of engineering-geological units

Стратиграфогенетический комплекс	Максимальная мощность ИГЭ, м	Минимальная мощность ИГЭ, м	Средняя мощность ИГЭ, м	Average thickness, m	Номер ИГЭ	Описание грунтов Soil description	Инженерно-геологическая колонка Engineering geological column	Грунтовая вода Groundwater	Показатели выделения инженерно-геологических элементов Indicators of soil characteristics for the allocation of engineering and geological units	Расчетные значения характеристик грунтов, рекомендуемые для проектирования оснований и фундаментов Calculated values of soil characteristics recommended for the design of foundations
bQIV	0,2	0,2	0,2	0,2	0	Почвенно-растительный слой с корнями трав, деревьев Soil-vegetable layer with roots of grasses, trees		Установившийся уровень зафиксирован на глубинах 0,7–1,1, 1,7 м. Сезонное колебание ±1,0 м Steady-state level was recorded at depths of 0,7–1,1, 1,7 m. Seasonal variation ±1,0 m	–	–
	9,0	1,9	6,2	6,2	8э2д	Глина тяжелая полутвердая бурая, с прослоями суглинка полутвердого, с содержанием органических веществ 6,2 % Fat clay stiff brown, with layers of lean clay – stiff, with an organic content of 6,2 %			$\rho=1,93 \text{ т/м}^3$ $W=0,272$ , $I_p=0,31$ , $I_L=0,10$ , $e=0,797$ , $Sr=0,93$	$\rho=1,88 \text{ т/м}^3$ , $\rho_H=1,90 \text{ т/м}^3$ , $\gamma=18,4 \text{ кН/м}^3$ , $\gamma_H=18,6 \text{ кН/м}^3$ , $c_t=12 \text{ кПа}$ , $c_H=13 \text{ кПа}$ , $\phi_H=4^\circ$ , $\phi_H=5^\circ$ , $E=14,0 \text{ МПа}$
dlQIV	11,5	6,0	7,5	7,5	8ж3	Суглинок тяжелый пылеватый тугопластичный, бурый, с прослоями мягкой-, текучепластичного, супеси пластичной, глины тугопластичной Lean clay firm – stiff brown, with layers of very soft-firm, soft-firm, very soft-stiff silty clay, firm-stiff fat clay			$\rho=1,98 \text{ т/м}^3$ , $W=0,256$ , $I_p=0,14$ , $I_L=0,47$ , $e=0,732$ , $Sr=0,95$	$\rho=1,96 \text{ т/м}^3$ , $\rho_H=1,97 \text{ т/м}^3$ , $\gamma=19,2 \text{ кН/м}^3$ , $\gamma_H=19,3 \text{ кН/м}^3$ , $c_t=8 \text{ кПа}$ , $c_H=9 \text{ кПа}$ , $\phi_H=6^\circ$ , $\phi_H=7^\circ$ , $E=7,0 \text{ МПа}$
	11,0	8,4	10,0	10,0	10э2	Глина легкая пылеватая полутвердая, бурая, местами ожелезненная, с единичными включениями дресвы и щебня осадочных пород низкой прочности Clay stiff, brown, sometimes ferruginous, with single inclusions of crushed stone of the sedimentary rocks of low strength			$\rho=1,98 \text{ т/м}^3$ , $W=0,228$ , $I_p=0,21$ , $I_L=0,18$ , $e=0,693$ , $Sr=0,90$	$\rho=1,97 \text{ т/м}^3$ , $\rho_H=1,97 \text{ т/м}^3$ , $\gamma=19,3 \text{ кН/м}^3$ , $\gamma_H=19,3 \text{ кН/м}^3$ , $c_t=45 \text{ кПа}$ , $c_H=47 \text{ кПа}$ , $\phi_H=19^\circ$ , $\phi_H=20^\circ$ , $E=17,0 \text{ МПа}$
prQII-III	12,2	5,6	9,1	9,1	10э3	Глина легкая пылеватая тугопластичная бурая с единичными включениями дресвы очень низкой прочности Fat clay brown firm-stiff with single inclusions of fine gravel very low strength			$\rho=1,94 \text{ т/м}^3$ $W=0,249$ , $I_p=0,19$ , $I_L=0,36$ , $e=0,751$ ; $Sr=0,90$	$\rho=1,90 \text{ т/м}^3$ , $\rho_H=1,91 \text{ т/м}^3$ , $\gamma=18,6 \text{ кН/м}^3$ , $\gamma_H=18,7 \text{ кН/м}^3$ , $c_t=31 \text{ кПа}$ , $c_H=34 \text{ кПа}$ , $\phi_H=17^\circ$ , $\phi_H=18^\circ$ , $E=8,8 \text{ МПа}$
	13,8	2,6	8,6	8,6	21э2д	Глина легкая пылеватая полутвердая, серого цвета, с прослоями суглинка твердого, полутвердого и тугопластичного, с примесью органических веществ 5,0 % Fat clay stiff, gray, with layers of lean clay very stiff, stiff and firm-stiff, with an admixture of organic substances 5,0 %			$\rho=1,97 \text{ т/м}^3$ , $W=0,258$ , $I_p=0,24$ , $I_L=0,16$ , $e=0,743$ , $Sr=0,95$ , $I=0,050$	$\rho=1,96 \text{ т/м}^3$ , $\rho_H=1,96 \text{ т/м}^3$ , $\gamma=19,2 \text{ кН/м}^3$ , $\gamma_H=19,2 \text{ кН/м}^3$ , $c_t=48 \text{ кПа}$ , $c_H=52 \text{ кПа}$ , $\phi_H=13^\circ$ , $\phi_H=14^\circ$ , $E=17,2 \text{ МПа}$
J <sub>2,3</sub>	7,7	2,1	5,6	5,6	23е1	Супесь песчаная твердая, красная, с прослоями пластичной, суглинка твердого Silty clay very stiff, red, with layers of very soft-stiff lean clay			$\rho=2,09 \text{ т/м}^3$ , $W=0,164$ , $I_p=0,06$ , $I_L<0$ , $e=0,515$ , $Sr=0,87$	$\rho=2,07 \text{ т/м}^3$ , $\rho_H=2,08 \text{ т/м}^3$ , $\gamma=20,3 \text{ кН/м}^3$ , $\gamma_H=20,4 \text{ кН/м}^3$ , $c_t=41 \text{ кПа}$ , $c_H=44 \text{ кПа}$ , $\phi_H=24^\circ$ , $\phi_H=25^\circ$ , $E=4,2 \text{ МПа}$
	42,0	17,3	26,7	26,7	23с1	Глина легкая пылеватая твердая красно-бурого цвета с прослоями полутвердой, местами с примесью органических веществ, с включениями дресвы и мелкого щебня осадочных пород низкой средней прочности Fat clay very stiff red-brown with layers of stiff, sometimes with an admixture of organic substances, with inclusions of gravel and fine crushed sedimentary rocks of low average strength			$\rho=2,04 \text{ т/м}^3$ $W=0,220$ , $I_p=0,24$ , $I_L<0$ , $e=0,639$ , $Sr=0,94$	$\rho=2,03 \text{ т/м}^3$ , $\rho_H=2,04 \text{ т/м}^3$ , $\gamma=19,9 \text{ кН/м}^3$ , $\gamma_H=20,0 \text{ кН/м}^3$ , $c_t=86 \text{ кПа}$ , $c_H=90 \text{ кПа}$ , $\phi_H=22^\circ$ , $\phi_H=22^\circ$ , $E=37,6 \text{ МПа}$

Основание склона подвержено активной боковой и донной эрозии реки, глубина эрозионного вреза от бровок примыкающих стенок отрыва составляет до 5 м. Глубина непосредственно эрозионного вреза реки от современных бровок русла составляет до 1,5 м.

Оползневой массив характеризуется как комбинированный, отнесен к оползням *сдвига* (подтип – инсеквентные), имеющего общую систему деляпсивных структур на склонах, в пределах каждого борта р. Пошнарки, а также оползням *вязкопластического* течения, приуроченным к пересекающим оползневой массив руслам временных водотоков (подтип оползней-потоки).

Оползневая поверхность сформирована на кровле юрских отложений, представленных глиной тяжелой полутвердой с примесью органических веществ более 5,0 %. В нижней части оползневого массива плоскость скольжения проходит по кровле пермских отложений, представленных супесью твердой консистенции. Поверхность скольжения находится ниже установившегося уровня грунтовых вод (под водой).

В целом оползневой массив находится в стадии временной стабилизации. Этому свидетельствует присутствие современных признаков деформаций: обрывистый характер пограничных бровок, активный размыв базиса денудации оползня, а также результаты расчетов устойчивости.

Источниками питания оползня водой служат поверхностные (дождевые и талые) и грунтовые воды. Установившийся уровень грунтовых вод зафиксирован на глубинах 0,7...11,7 м (абсолютные отметки 133,2...147,8 м). Сезонное колебание уровня грунтовых вод  $\pm 1,0$  м.

Сейсмичность района по карте ОСР-2015-В (СП 14.13330.2018) составляет 6 баллов, приращение балльности в пределах площадки по данным сейсмического микрорайонирования до +0,5 балла.

### Результаты

Расчеты устойчивости склонов выполнялись в программах GEO5 v.18 и Plaxis. Для расчетов выбирались наиболее характерные разрезы по линиям максимального уклона поверхности склонов. Положение расчетных сечений устойчивости склонов приведены на рис. 3.

Прочностные характеристики грунтов принимались по результатам сдвиговых испытаний методом «плашка по плашке» по подготовленной увлажненной поверхности. Нормативные и расчетные значения физических свойств, прочностных и деформационных характеристик глинистых грунтов приняты по лабораторным данным, с учетом полевых опытных испытаний грунтов.

Расчеты в программе GEO5 v.18 выполнены по заданной поверхности скольжения методами Сарма, Спенсера, Мергенштерна–Прайса, Янбу, Шахунянца. Данные методы применяются в случаях, когда откос сложен разнородными грунтами и смещение грунтовых масс происходит по известной полигональной произвольной поверхности. Предполагается, что эта поверхность (положение и очертание) уже установле-

на (как правило, совпадает с кровлей пермских и юрских отложений). Результаты расчетов приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Расчетные значения коэффициента устойчивости различными методами

**Table 2.** Calculated values of the stability coefficient by different methods

Номер расчетного сечения Number of the section	Методы расчета устойчивости Methods of calculation of stability				
	Сарма Sarma	Спенсера Spencer	Янбу Janbu	Мергенштерна– Прайса Morgenstern– Price	Шахунянца Shakhunyanets
5-1	1,06	1,11	1,11	1,11	1,1
5-2	0,98	0,98	0,98	0,98	0,93
5-3	1,04	1,03	1,02	1,02	1,01
5-4	1,09	1,08	1,07	1,07	1,06
5-5	1,52	1,5	1,54	1,47	1,45
6-1	0,71	0,72	0,73	0,71	0,69
6-2	0,65	0,64	0,62	0,62	0,60
6-3	0,91	0,92	0,92	0,92	0,86
6-4	1,02	1,00	–	1,00	0,99
6-5	0,85	0,89	89	0,87	0,87
6-6	0,77	0,75	0,74	0,74	0,71
6-7	0,78	0,73	0,73	0,73	0,67
7-1	0,90	0,91	0,9	0,90	0,9
7-2	0,70	0,69	0,69	0,69	0,67
7-3	0,97	0,97	0,97	0,97	0,88
7-4	1,1	1,09	–	1,09	1,09
7-5	0,93	0,93	–	0,91	0,9
7-6	1,03	1,02	1	1	0,98

Как видно из таблицы, практически весь склон характеризуется как неустойчивый (Куст изменяется от 0,60 до 1,13), за исключением расчетного сечения 5-5, где склон устойчивый (Куст = 1,45 > 1,33) в статическом состоянии.

В программе Plaxis реализована процедура вычисления коэффициента устойчивости методом снижения параметров прочности грунта  $\phi$ , с « $\phi$ -reduction». Коэффициент устойчивости определяется отношением реального сопротивления грунта сдвигу к минимальному сопротивлению сдвигу, обеспечивающему предельное равновесие [24–28]. Графический вывод деформированного состояния расчетной области представлен на рис. 6 в виде полных перемещений.

Склон является неустойчивым в левобережной части разреза, на расстоянии 76 м от русла, коэффициент устойчивости, определенный по графику  $\text{Sum-Msf}=f(U)$ , равен 0,74, в остальной части разреза склон находится в предельно-устойчивом состоянии ( $K_{уст} \leq 1$ ). При сезонном повышении уровня подземных вод на 1 м моделирование показало расширение зоны оползневых деформаций по левому борту до 107 м, по правому берегу реки до 10 м от русла.

### Выводы

1. В статье приведена инженерно-геологическая оценка территории, представлена карта инженерно-геологических условий долины реки с элемен-

- тами геоморфологических таксонов М1:1000, расчеты устойчивости склонов. В целом инженерно-геологические условия площадки являются достаточно сложными, оба склона реки подвержены оползневому процессу. Имеются как древние, так и современные оползни.
- Основными причинами деформаций являются: слаблитифицированные юрские глины, слагающие весь склон; подземные воды, формирующиеся в пределах плато и разгружающиеся в

оползневые накопления, поддерживая в них высокую влажность.

- В качестве несущего слоя опор моста рекомендуется использовать слой пермских глинистых отложений с высокими физико-механическими характеристиками.

*Исследование выполнено в Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета (средства ВИУ).*

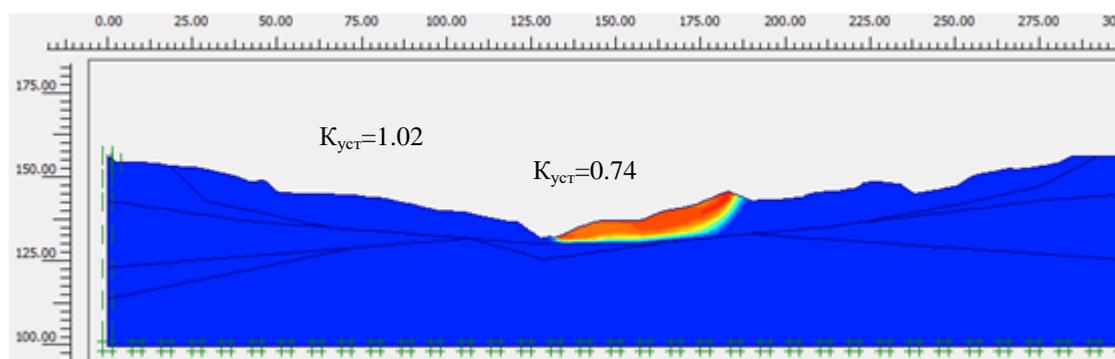


Рис. 6. Распределение общих перемещений по разрезу II-II  
Fig. 6. Distribution of total displacements by section II-II

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Оползни Среднего и Нижнего Поволжья, и меры борьбы с ними / под ред. Е.В. Милановского, М.П. Семенова. – М.: Стройиздат, 1935. – 252 с.
- Золотарев Г.С. Генетические типы оползней, их развитие и изучение // Матер. сов. по изучению оползней и мер борьбы с ними. – Киев: Изд-во КГУ, 1964. – С. 165–170.
- Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. – М.: Недра, 1972. – 310 с.
- Голодковская Г.А. Геологическая история формирования оползневых склонов Горьковско-Чебоксарского правобережья р. Волги и их инженерно-геологическая характеристика: автореф. дис... канд. геол.-минер. наук. – М., 1958. – 16 с.
- Оползни и устойчивость склонов. Библиографический указатель. – М.: Геоинформмарк, 2010. – 528 с.
- Characteristics of rainfall-induced landslides in Miocene formations: a case study of the Shennu watershed, Central Taiwan / S.-C. Chen, H.-T. Chou, S.-C. Chen, C.-H. Wu, B.-S. Lin // Engineering Geology. – 2014. – V. 169. – P. 133–146. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.11.020
- Fan L., Lehmann P., Or D. Effects of soil spatial variability at the hillslope and catchment scales on characteristics of rainfall-induced landslides // Water Resources Research. – 2016. – V. 52 (3) – P. 1781–1799. DOI: 10.1002/2015WR017758. URL: [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1944-7973](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1944-7973) (дата обращения 12.10.2019).
- Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau / W.-Z. Guo, L. Luo, W.-L. Wang, Z.-Y. Liu, Z.-X. Chen, H.-L. Kang, B. Yang // Geomorphology. – 2019. – V. 337. – P. 69–78. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.04.006. URL: [www.elsevier.com/locate/geomorph](http://www.elsevier.com/locate/geomorph) (дата обращения 12.10.2019).
- Minder J.R., Roe G.H., Montgomery D.R. Spatial patterns of rainfall and shallow landslide susceptibility // Water Resources Research. – 2009. – V. 45 (4). – Article no. W04419. DOI: 10.1029/2008WR007027.
- Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes // Special Report – National Research Council, Transportation Research Board. – 1996. – V. 247. – P. 36–75.
- Dai F.C., Lee C.F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong // Geomorphology. – 2002. – V. 42 (3–4). – P. 213–228. DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00087-3. URL: [www.elsevier.com/locate/geomorph](http://www.elsevier.com/locate/geomorph) (дата обращения 12.10.2019).
- Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy / F. Guzzetti, F. Ardizzone, M. Cardinali, M. Galli, P. Reichenbach, M. Rossi // Geomorphology. – 2008. – V. 96 (1–2). – P. 105–122. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.07.015.
- Keefer D.K., Larsen M.C. Assessing landslide hazards // Science. – 2007. – V. 316 (5828). – P. 1136–1138. DOI: 10.1126/science.1143308.
- Evaluating factors for controlling sediment connectivity of landslide materials: a flume experiment / H.S. Kharismalatri, Y. Ishikawa, T. Gomi, R.C. Sidle, K. Shiraki // Water (Switzerland). – 2017. – V. 11 (1). – Article no. 17. DOI: 10.3390/w11010017. URL: <http://www.mdpi.com/2073-4441/11/1/17/pdf> (дата обращения 12.10.2019).
- Landslides on the Loess Plateau of China: a latest statistics together with a close look / X.-Z. Xu, W.-Z. Guo, Y.-K. Liu, J.-Z. Ma, W.-L. Wang, H.-W. Zhang, H. Gao // Natural Hazards. – 2017. – V. 86 (3). – P. 1393–1403. DOI: 10.1007/s11069-016-2738-6. URL: [www.wkap.nl/journalhome.htm/0921-030X](http://www.wkap.nl/journalhome.htm/0921-030X) (дата обращения 12.10.2019).
- Experimental studies of soil base deformations under the mode of flexible bottom of steel vertical tanks / R.A. Mangushev, V.V. Konyushkov, R.A. Usmanov, V.M. Kirillov // Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations. Proceedings of the International Conference. – St-Petersburg, 2019. – P. 165–171.
- Конюшков В.В., Веселов А.А., Кондратьева Л.Н. Комплексный анализ результатов инженерных изысканий для проектирования, строительства и эксплуатации сооружений на территориях со склоновыми процессами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 11. – С.111–125.
- Short-term forecast of landslide processes development using the method of engineering-geological analogy on the territory of Innopolis city (Russia) / N. Zharkova, A. Latypov, I. Nuriev, G. Chernychuk // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – Albena, Bulgaria, 2015. – V. 2 (1). – P. 649–656.

19. Voznesenskii E.A., Latypov A., Zharkova N. Seismic fluidification of soil in the bed of the Kazanskaya Riviera Tower // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2016. – V. 53. – Iss. 4. – P. 257–263.
20. Ильин В.В., Сахаров В.А. Расчет устойчивости склонов на участках строительства объектов спортивно-туристического комплекса «Горный воздух» (гора Большевик, г. Южно-Сахалинск) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 208–216.
21. Мониторинг переноса придонного потока осадков в прибрежно-морской зоне шельфа для выявления основных параметров моделей состояния экосистем / В.В. Ильин, В.А. Мелкий, А.А. Верхотуров, А.А. Гальцев, О.М. Зарипов, Д.В. Долгополов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 105–115.
22. Результаты исследований природных условий и инженерно-геологического строения долины реки Большая Александровка (о. Сахалин) / В.А. Мелкий, В.В. Ильин, В.М. Пищальник, В.А. Сахаров, Н.С. Семенов, С.М. Первухин, А.А. Верхотуров, Я.П. Белянина, И.В. Еременко, О.М. Зарипов, А.А. Гальцев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 11. – С. 6–19.
23. Сахаровский А.В. и др. Технический отчет по инженерно-геологическим и геотехническим изысканиям. ВСМ Участок 573–630 км (Республика Чувашия). – Новосибирск: Сибгипротранс, 2018. – 135 с.
24. Строчкова Л.А., Ермолаева А.В. Районирование территории по степени опасности оседания земной поверхности при проектировании магистрального газопровода в южной Якутии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – №10. – С. 59–68.
25. Строчкова Л.А., Елифанова Е.А., Коржнева Т.Г. Численный анализ поведения основания опоры моста на старой железнодорожной линии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 5. – С. 125–139.
26. Strokova L.A., Teterin E.A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – 6 p. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012051.
27. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The investigation of dangerous geological processes resulting in land subsidence while designing the main gas pipeline in South Yakutia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 43. – 6 p. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012049.
28. Строчкова Л.А., Ермолаева А.В. Природные особенности строительства участка газопровода «Сила Сибири» на участке Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение – Ленск // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 4. – С. 41–55.

Поступила 17.10.2019 г.

#### Информация об авторах

**Сахаровский А.В.**, главный геолог, ОАО «Сибгипротранс».

**Строчкова Л.А.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 624.131

## DETERMINING LANDSLIDE SLOPE STABILITY WHEN DESIGNING A BRIDGE OVER THE RIVER POSHNARKA IN THE CHUVASH REPUBLIC

**Aleksandr V. Sakharovsky<sup>1</sup>,**  
sakharovskiy\_sgt@bk.ru

**Lyudmila A. Strokovaya<sup>2</sup>,**  
sla@tpu.ru

<sup>1</sup> OAO «Sibgiprotrans»,  
15, Vokzalnaya avenue, Novosibirsk, 630099, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

*The study is relevant due to the landsliding which lead to emergencies with the threat of building destruction, land use, and human safety. Special difficulties in the study of landslides are caused by forecasting the activation of landsliding.*

**The aim** of the study is to assess the engineering-geological and hydrogeological conditions at the site of the bridge crossing and forecast the development of the landslide process on the slopes using FEM modeling.

**Object** of the study is the geological medium of the area of the designed bridge within the Volga upland. The paper considers the main factors influencing the development of landslide: geomorphological and tectonic conditions; lithological composition; physical and mechanical properties of soils, hydrological and hydrogeological conditions of the area.

**Methods:** brief review of the literature; analysis of information obtained from the funds of the survey company, calculation of slope stability, modeling of the behavior of the soil massif FEM.

**The results.** We considered the main factors of the landslide process of this territory and calculated the stability of slopes on dangerous sections by various methods. The slope is unstable in general. The simulation showed the expansion of landslide deformation zone on the left side to 107 m, on the right bank of the river to 10 m from the bed with a seasonal increase in the level of groundwater.

**Summary.** The main causes of deformation are: weakly lithified Jurassic clay, composing the entire slope; groundwater formed within the plateau and discharged into landslide accumulations, maintaining high moisture in them. It is recommended to use a layer of Permian clay deposits with high physical and mechanical characteristics as a bearing layer for bridge supports.

### Key words:

Engineering and geological conditions, regional factors, soil, landslide, slope stability assessment, simulation model.

*The research was carried out at Tomsk Polytechnic University within the Program of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement (VIU funds).*

### REFERENCES

1. *Opolzni Srednego i Nizhnego Povolzhya i mery borby s nimi* [Landslides of the Middle and Lower Volga region and measures to combat them]. Ed. by E.V. Milanovskiy, M.P. Semenov. Moscow, Stroyizdat Publ., 1935. 252 p.
2. Zolotarev G.S. Geneticheskie tipy opolzney, ikh razvitiye i izucheniye [Genetic types of landslides, their development and study]. *Materialy soveshchaniya po izucheniyu opolzney i mer borby s nimi* [Proc. of the meeting on the study of landslides and landslide control measures]. Kiev, KGU Publ., 1964. pp. 165–170.
3. Emelyanova E.P. *Osnovnye zakonornosti opolznevykh protsessov* [The main regularities of landslide processes]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 310 p.
4. Golodkovskaya G.A. *Geologicheskaya istoriya formirovaniya opolznevykh sklonov Gorkovsko-Cheboksarskogo pravoberezhya r. Volgi i ikh inzhenerno-geologicheskaya kharakteristika*. Dis. Kand. nauk [Geological history of formation of landslide slopes of the Gorky-Cheboksary right Bank of the Volga river and their engineering-geological characteristics. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 1958. 16 p.
5. *Opolzni i ustoychivost sklonov. Bibliograficheskiy ukazatel* [Landslides and slope stability. Bibliographic index]. Moscow, Geoinformmark Publ., 2010. 528 p.
6. Chen S.-C., Chou H.-T., Chen S.-C., Wu C.-H., Lin B.-S. Characteristics of rainfall-induced landslides in Miocene formations: a case study of the Shenmu watershed, Central Taiwan *Engineering Geology*, 2014, vol. 169, pp. 133–146. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.11.020
7. Fan L., Lehmann P., Or D. Effects of soil spatial variability at the hillslope and catchment scales on characteristics of rainfall-induced landslides. *Water Resources Research*, 2016, vol. 52 (3), pp. 1781–1799. DOI: 10.1002/2015WR017758 Available at: [http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/\(ISSN\)1944-7973](http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/(ISSN)1944-7973) (accessed 12 October 2019).
8. Guo W.-Z., Luo L., Wang W.-L., Liu Z.-Y., Chen Z.-X., Kang H.-L., Yang B. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 2019, vol. 337, pp. 69–78. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.04.006. Available at: [www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/](http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/) (accessed 12 October 2019).
9. Minder J.R., Roe G.H., Montgomery D.R. Spatial patterns of rainfall and shallow landslide susceptibility. *Water Resources Research*, 2009, vol. 45 (4), article no. W04419. DOI: 10.1029/2008WR007027
10. Cruden D.M., Varnes D.J. Landslide types and processes. *Special Report – National Research Council, Transportation Research Board*, 1996, vol. 247, pp. 36–75.
11. Dai F.C., Lee C.F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 2002, vol. 42 (3–4), pp. 213–228. DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00087-3. Available at: [www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/](http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/3/3/3/4/) (accessed 12 October 2019).
12. Guzzetti F., Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., Reichenbach P., Rossi M. Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy. *Geomorphology*, 2008, vol. 96 (1–2), pp. 105–122. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.07.015

13. Keefer D.K., Larsen M.C. Assessing landslide hazards. *Science*, 2007, vol. 316 (5828), pp. 1136–1138. DOI: 10.1126/science.1143308
14. Kharismalatri H.S., Ishikawa Y., Gomi T., Sidle R.C., Shiraki K. Evaluating factors for controlling sediment connectivity of landslide materials: a flume experiment. *Water (Switzerland)*, 2018, vol. 11 (1), article no. 17. DOI: 10.3390/w11010017 Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/1/17/pdf> (accessed 12 October 2019).
15. Xu X.-Z., Guo W.-Z., Liu Y.-K., Ma J.-Z., Wang W.-L., Zhang H.-W., Gao H. Landslides on the Loess Plateau of China: a latest statistics together with a close look. *Natural Hazards*, 2017, vol. 86 (3), pp. 1393–1403. DOI: 10.1007/s11069-016-2738-6. Available at: [www.wkap.nl/journalhome.htm/0921-030X](http://www.wkap.nl/journalhome.htm/0921-030X) (accessed 12 October 2019).
16. Mangushev R.A., Konyushkov V.V., Usmanov R.A., Kirillov V.M. Experimental studies of soil base deformations under the mode of flexible bottom of steel vertical tanks. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations. Proc. of the International Conference*. – St-Petersburg, 2019. pp. 165–171.
17. Konyushkov V.V., Veselov A.A., Kondratyeva L.N. Comprehensive analysis of the results of engineering surveys for design, construction and exploitation of structures in the areas with landslide processes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 11, pp. 111–125. In Rus.
18. Zharkova N., Latypov A., Nuriev I., Cherniychuk G. Short-term forecast of landslide processes development using the method of engineering-geological analogy on the territory of Innopolis city (Russia). *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. Albena, Bulgaria, 2015. Vol. 2, no. 1, pp. 649–656.
19. Voznesenskii E. A., Latypov A., Zharkova N. Seismic fluidification of soil in the bed of the Kazanskaya Riviera Tower. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2016, vol. 53, no. 4, pp. 257–263.
20. Ilin V.V., Sakharov V.A. Calculation of stability of slopes in the areas of construction of sports and tourist complex «Gorny Vozdukh» (Mountain Bolshevik, Yuzhno-Sakhalinsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 208–216. In Rus.
21. Ilin V.V., Melkiy V.A., Verkhoturov A.A., Zariyov O.M., Dolgoplov D.V. Monitoring of transfer of the near-bottom flow of the sediments in coastal zone of the shelf to identify the main parameters of the models of the ecosystems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 105–115. In Rus.
22. Melkiy V.A., Ilin V.V., Pishchalnik V.M., Zariyov O.M., Galtsev A.A. Results of studies of natural conditions and engineering-geological structure of the valley of the River Bolshaya Aleksandrovka (Sakhalin Island). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 11, pp. 6–19. In Rus.
23. Sakharovsky A.V. *Tekhnicheskii otchet po inzhenerno-geologicheskim i geotekhnicheskim izyskaniyam. VSM Uchastok 573–630 km (Respublika Chuvashija)* [Technical report on engineering-geological and geotechnical surveys. VSM Section 573–630 km (Republic of Chuvashia)]. Novosibirsk, Sibgiprotrans Publ., 2018. 135 p.
24. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Zoning according to the hazard level of earth surface subsidence when designing the main gas pipeline in south Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 10, pp. 59–68. In Rus.
25. Strokova L.A., Epifanova E.A., Korzhneva T.G. Numerical analysis of bridge foundation behaviour on the old railway line. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 5, pp. 125–139. In Rus.
26. Strokova L.A., Teterin E. A. Identification, diagnosis and ranking of risks of geohazard in pipeline and urbanized territories. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no. 012051. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012051.
27. Strokova L.A., Ermolaeva A.V., Golubeva V.V. The Investigation of Dangerous Geological Processes Resulting In Land Subsidence While Designing the Main Gas Pipeline in South Yakutia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, 6 p. DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012049.
28. Strokova L.A., Ermolaeva A.V. Natural features of construction of the main gas pipeline «The Power of Siberia» on a site Chayandinskoye oil and gas field – Lensk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 4, pp. 41–55. In Rus.

Received: 17 October 2019.

#### Information about the authors

**Aleksandr V. Sakharovsky**, chief geologist, OAO «Sibgiprotrans».

**Lyudmila A. Strokova**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.