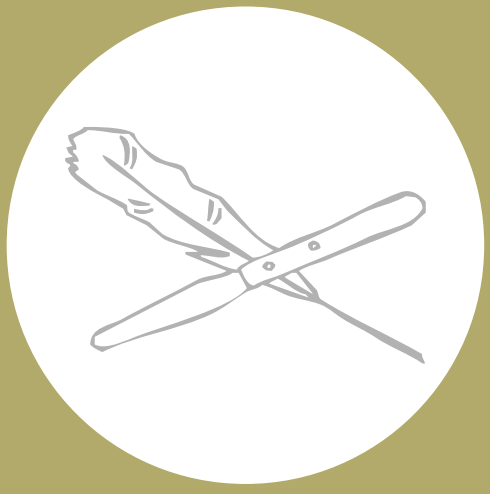
ISSN 2306-9139, e-ISSN 2687-0541

ГРУНТОВЕДЕНИЕ

№ 1(18)
2022



ООО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

ООО НПП «ГЕОТЕК» - ВЕДУЩИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ, МЕРЗЛЫХ, КРУПНООБЛОМОЧНЫХ И СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ.

- АДАПТИРУЕМОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ
- ВЫГОДНАЯ ЦЕНА
- НАДЕЖНЫЙ СЕРВИС
- ЭКОНОМИЯ БЮДЖЕТА

УСТАНОВКА ДЛЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА СРЕЗ ГТ 1.2.15

Комплексная установка предназначена для определения параметров прочности дисперсных грунтов (крупнообломочных)

- автоматизированный режим испытания;
- испытания на одноплоскостой срез и простой сдвиг;
- испытания на срез на контакте грунт-грунт, грунт-геосинтетика;
- испытания в соответствии с ASTM;
- испытания по схемам НН, КД, КН;
- консолидации с водонасыщением непосредственно в приборе;
- статический и кинематический режим силового воздействия, с контролем напряжений и деформаций;
- измерение вертикальных деформацийи деформаций среза;
- удобное формирование образца непосредственно в приборе.

Оснастка для испытания на одноплоскостной срез

Оснастка для испытания на срез по геосинтетике

Оснастка для испытания на простой сдвиг

440004, Россия, г. Пенза, ул. Центральная, строение 1М,
+7(8412) 999-189, 8-800-200-16-05 (звонок по России бесплатный),
sales@npp-geotek.ru, npp-geotek.com

*На правах рекламы

Охотинское общество грунтоведов

ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Gruntovedenie

№ 1(18)
2022

Журнал основан в 2012 г.

Главный редактор
Е. А. Вознесенский

Редакционная коллегия:
Е. А. Вознесенский, А. А. Лаврусевич, В. А. Королев, Б. Ф. Апарин, Г. Г. Болдырев, Л. П. Норова, А. В. Русаков, А. А. Свертилов, Л. К. Семенова, Л. А. Строкова, Н. С. Никифорова, А. И. Попов, Г. П. Постоев, С. В. Сольский

Зав. редакцией Ю. Ю. Соколова
Адрес редакции: 199034, Санкт-Петербург, 7-ая линия ВО, д. 2/1
тел.: +7 921 986 51 06
www.okhotin-grunt.ru
E-mail: gruntovedenie@mail.ru
okhotin-grunt@mail.ru

Санкт-Петербург

© Редакция журнала «Грунтоведение», 2022

УДК 624.131.1
ББК 26.3

СОДЕРЖАНИЕ

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДИНАМИКА — ОСОБОЕ МНЕНИЕ

О. В. Зеркаль
ОПОЛЗНИ ТЕЧЕНИЯ: РОЛЬ СТРОЕНИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ В ИХ ФОРМИРОВАНИИ, ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ И ТИПИЗАЦИЯ **3**

МЕХАНИКА ГРУНТОВ

А. Ю. Мирный
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДОМ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ **24**

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

А. И. Латыпов, А. Н. Гараева, О. В. Лунева
ХАРАКТЕРИСТИКА СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ БУГУЛЬМИНСКОГО ПЛАТО БУГУЛЬМИНСКО-БЕЛЕБЕЕВСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ **31**

МЕТОДИКА И МЕТОДОЛОГИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

А. С. Мосина
ГРУНТОВЫЕ ТОЛЩИ ХАРАСАВЭЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАК ОБЪЕКТ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ХРАНИЛИЩ БУРОВЫХ ОТХОДОВ **43**

Е. В. Дробинина
ИЗМЕНЧИВОСТЬ СВОЙСТВ КОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ ФОРМ В ОБСТАНОВКЕ РАЗВИТИЯ КАРБОНАТНО-СУЛЬФАТНОГО КАРСТА **50**

ХРОНИКА СЕРГЕЕВСКИХ ЧТЕНИЙ **58**

https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-1-18-3-23
УДК 624.131.543

ОПОЛЗНИ ТЕЧЕНИЯ: РОЛЬ СТРОЕНИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ В ИХ ФОРМИРОВАНИИ, ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ И ТИПИЗАЦИЯ

FLOW SLIDES: THE ROLE OF THE COMPOSITION OF SOIL MASSIF IN THEIR FORMATION, DEVELOPMENT FEATURES AND TYPICAL TYPES

О. В. Зеркаль
Oleg V. Zerkal

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия
Lomonosov Moscow State University, Bld. 1, Leninsky Gory, Moscow, 119991, Russia

igzov@mail.ru

Аннотация: Течение («сухое», пластическое, вязкопластическое, вязкое) является одним из основных механизмов смещения оползней. В статье рассмотрены особенности формирования и развития оползней, смещение которых происходит в виде течения, обусловленного обводнением грунтов. Формирование оползней течения связано с превышением порога ползучести действующими в склоновом массиве сдвиговыми напряжениями с переходом деформаций из затухающих в необратимые, прогрессирующие. При классифицировании склоновых процессов большинство исследователей оползни течения (под различными наименованиями) выделяет в отдельный класс. К оползням течения обычно относят смещение (в субаэральных или субаквальных условиях) массы увлажненного или переувлажненного глинистого, песчано-глинистого или щебенисто-глинистого грунта, которая движется по наклонной поверхности. Показано, что формирование оползней течения может происходить либо длительно, с постепенным развитием пластических деформаций, либо очень быстро — с практически мгновенным переходом грунтов в текучее состояние (разжижением). Основными признаками, на основе которых проводится типизация оползней течения, являются: 1) глубина захвата массива оползневыми деформациями и местоположение зоны течения; 2) морфометрические характеристики, в т. ч. форма оползневого тела (в плане); 3) тип грунтов, вовлекаемых в смещение, и механизм перехода грунтов в «текучее» состояние; 4) особенности механизма смещения, в т. ч. в зависимости от консистенции оползневых масс, обусловленной соотношением в составе движущейся массы твердой (обломочной, глинистой) составляющей и водного компонента. Охарактеризованы особенности развития и отличия поверхностных и глубоких оползней течения, включая особенности их смещения, морфологии и строения. Описана последовательность развития оползневых деформаций. Рассмотрены существующие подходы к типизации оползней течения. Предложена сводная типизация оползней течения по механизму их формирования и развития. Сделан вывод о необходимости учета особенностей и различий оползней течения при их изучении.

Abstract: The flow («dry», plastic, viscoplastic, viscous) is one of the main mechanisms of landslide displacement. The paper discusses the features of the formation and development of landslides, the displacement of which occurs in the form of a flow caused by soils saturated. The flow slides formation is associated with the excess of the creep threshold by the shear stresses acting in the slope massif with the transition of deformations from decaying to irreversible, progressive ones. When classifying slope processes, most researchers classify flow slides (under various names) into a separate class. Flow slides usually refer to the displacement (in subaerial or subaqueous conditions) of the moist mass or saturated clay, sandy-clay or rubble-clay soil, which moves along an inclined surface. It is shown that the formation of flow slides can occur either for a long time, with the gradual development of plastic deformations, or very quickly, with an almost instantaneous transition of soils to a fluid state (liquefaction). The main features with reference to which typical types of the flow slides is carried out are: 1) the capture depth of the massif by landslide deformations and the location of the flow zone; 2) morphometric characteristics, including the shape of the landslide body (in plan); 3) the type of soils involved in displacement and the mechanism of the transition of soils into a «fluid» state; 4) features of the displacement mechanism, including depending on the

consistency of the landslide masses, due to the ratio in the composition of the moving mass of the solid (debris, clay) component and the water component. The features of the development and differences of surface landslides and «deep» flow slides, including the features of their displacement, morphology and structure, are characterized. The sequence of the landslide deformations development is described. The existing approaches to the typification of flow slides are considered. Summary typical types of flow slides of a current on the initiation and mechanism of displacement is prepared. It is concluded that it is necessary to take into account the features and differences of flow slides in the course of their study.

Ключевые слова: оползень течения, оплывина, сплыв, оползень-поток, оползень внезапного разжижения, оползень выдавливания, механизм смещения, типизация

Keywords: flow slide; mudflow; earthflow; flow-like landslides; lateral spread; extrusion; displacement mechanism; typing

Введение

Классификация различных типов гравитационных смещений на склонах на основе механизма перемещения оползневых масс является наиболее распространенным подходом при рассмотрении оползней. Большинство специалистов, изучающих деформации склонов, течение грунтов («сухое», пластическое, вязкопластическое, вязкое) относит к одному из основных механизмов смещения оползней, выделяя гравитационные смещения на склонах в виде их течения в отдельный класс оползневых процессов. Особенностью такого рода деформаций (на макроуровне) является перемещение грунтов, ведущих себя подобно жидкости, что отмечалось уже на самых ранних этапах изучения оползней А. Бальтцером (1875), А. Геймом (1882), А. А. Иностранцевым (1885), А. П. Павловым (1903) и др. [16, 29, 49, 60]. При этом перемещение грунтов, вовлеченных в деформации под воздействием гравитационных сил, также как и для рассмотренных ранее оползней скольжения и сдвига [11], происходит в виде движения с сохранением непосредственного контакта с неподвижной частью склонового массива. Этот важнейший признак — гравитационное смещение на склоне с сохранением контакта с неподвижной частью подстилающих отложений — и позволяет столь разные по своему механизму развития процессы (с одной стороны — скольжение и сдвиг, с другой стороны — течение) относить к одной группе геологических процессов — оползням.

Оползневые процессы, развивающиеся в виде течения грунтов, являются одними из наиболее многочисленных проявлений склоновых деформаций. Они встречаются повсеместно — как на равнинных территориях (в платформенных условиях, в т. ч. в регионах развития многолетнемерзлых грунтов), так и в горно-складчатых областях, характеризующихся контрастным рельефом, а также в подводных (субаквальных) условиях. В ряде регионов, особенно в тех, где в верхней части геологического разреза доминируют глинистые грунты, оползни течения являются преобладающим типом склоновых деформаций. Так, по данным Р. А. Ниязова, из 6632 оползней, зарегистрированных в Центральной Азии в области распространения лессовых толщ, на долю оползней течения (оплывин, сплывов, оползней-потоков) приходится 4648 случаев, т. е. более 70% [27]. Следует отметить, что в областях с широким развитием глинистых отложений в приповерхностной части геологического разреза интенсивное аномальное выпадение осадков, как правило, сопровождается массовой активизацией склоновых деформаций, среди которых преобладают именно смещения в виде течения переувлажненных грунтов (рис. 1).

Оползневые процессы, развивающиеся в виде течения грунтов, могут носить катастрофический характер (рис. 2) как по своему масштабу, так и скорости смещения. Одним из примеров катастрофического проявления оползней течения является формирование серии оползней внезапного разжижения (с последующим течением грунтов) при Гиссарском землетрясении (1989 г.) с общим объемом до 65 млн. м3 [10, 13, 76]. Скорость смещения оползня «Окули», образовавшегося в эпицентральной зоне Гиссарского землетрясения, составляла до 4 м/сек, а оползня «Шарора» достигала 6 м/с. Крупнейший в мире подводный оползень Стуреrг (Норвежское море), протяженность которого по направлению смещения составляет до 800 км, а общий объем перемещенных масс оценивается в 5580 км3, также может быть отнесен к оползням, движение которых происходило в виде течения грунтов в субаквальных условиях [59].

В настоящей работе будут охарактеризованы особенности развития и отличия оползней, смещение которых происходит в результате течения увлажненных и водонасыщенных грунтов, а также рассмотрены существующие подходы к типизации таких оползневых процессов. За рамки настоящего обсуждения вынесены склоновые деформации,

Рис. 1. Общий вид многочисленных деформаций склонов (преимущественно в виде оползней течения) в покровных и делювиальных отложениях левобережья р. Баксан, активизация которых связана с интенсивными осадками в весенне-летний период 2005 г.

развивающиеся в виде «сухого» течения грунтов (каменные и сухие суглинистые лавины, сухие песчаные и обломочные потоки), которым присуща определенная специфика, что требует отдельного, самостоятельного анализа.

Начало смещений такого рода оползней обусловлено тем, что в грунтах склона создаются напряжения, в первую очередь сдвиговые (τ), величина которых больше, чем порог ползучести (τ_{lim}).

Оползни течения. Определение

Оползни течения представляют собой отдельный класс склоновых деформаций, развивающихся под действием гравитационных сил, выделение которого предопределяется особенностями механизма смещения. Ведущим (первичным) механизмом смещения рассматриваемого класса оползней является течение грунтов в зоне основных деформаций. Иные типы деформаций, фиксируемые при смещении оползней течения (на его поверхности, во фланговых частях и т. д.), в этом случае развиваются как вторичные, т. е. следующие за основными, без которых их образование было бы невозможным. В случае, если ведущим (первичным) механизмом смещения является не течение грунтов, то такой оползень следует относить к иному классу оползней, в соответствии с их классификацией.

Начало смещения оползней течения обусловлено тем, что в грунтах склона создаются напряжения, в первую очередь сдвиговые (τ), величина которых больше, чем порог ползучести (τ_{lim}), т. е. в условиях перехода деформаций из затухающих в необратимые, прогрессирующие, которые в дальнейшем могут протекать значительное время (до снижения напряжений ниже порога ползучести). Таким образом, условием образования оползней течения (в количественном выражении) является превышение расчетного коэффициента устойчивости для рассматриваемого класса оползней ($К_{уст}^{оп\ теч}$) величины «1,0» в соотношении «действующие напряжения» / «значение порога ползучести»:

$$К_{уст}^{оп\ теч} = \frac{\tau}{\tau_{\lim}} .$$

Рис. 2. Оползень-поток в лессах (Таджикистан)

В зависимости от консистенции грунтов (в субаэральных условиях) или соотношения твердой составляющей и воды (в субаквальных условиях) смещение будут происходить в виде пластического, вязкопластического или вязкого течения, скорость которого будет зависеть от вязкости оползневых масс.

В отличие от оползней скольжения, когда оползнеобразование, в первую очередь, сопровождается нарушением сплошности склонового массива с формированием новой поверхности геологического раздела — поверхности скольжения [11][1], смещение оползней течения в целом происходит в результате развивающихся пластических, вязкопластических деформаций, сопровождающихся изменением формы залегания грунтов, их структуры и текстуры в определенном интервале геологического разреза (как правило, без нарушения сплошности массива в этом интервале). Наиболее удачным термином для такого интервала геологического разреза может быть термин «основной деформируемый горизонт» (ОДГ), ранее предложенный специалистами института ВСЕГИНГЕО в несколько более широкой трактовке. При этом для строения «глубоких» оползней течения, более подробно рассматриваемых в разделе «Механизм смещения оползней течения», характерно наличие в верхней части оползневого тела горизонта более «сухих» и/или более прочных грунтов, в котором пластические, вязкопластические деформации не развиваются. При такого рода смещениях происходит разрушение горизонта грунтов, перекрывающего ОДГ. Образующиеся при этом блоки в дальнейшем могут транспортироваться на поверхности оползневого языка при его движении подобно льдинам при ледоходе. Наблюдаемые в этом случае нарушения сплошности верхней части склонового массива следует рассматривать как вторичные, т.к. они образуются вследствие происходящих деформаций ОДГ. Отдельно следует отметить, что при смещении «глубоких» оползней течения во многих случаях сохраняется первоначальный порядок залегания отложений, но в трансформированном виде.

Первоначально считалось, что деформации течения при развитии склоновых смещений характерны исключительно для водонасыщенных грунтов, движение которых происходит по наклонной поверхности или в вырабатываемом ложе. В дальнейшем, по мере накопления знаний о механизмах гравитационных склоновых процессов, были описаны не только вязкопластические деформации в виде течения оползневых масс по наклонной поверхности, но и смещения, происходящие в результате выжимания или выдавливания. Помимо этого, было выявлено, что смещения в форме течения присущи не только водонасыщенным грунтам, но также могут развиваться в сухих песчаных и обломочных грунтах[2]. Как следствие, к настоящему времени рассматриваемый класс оползней имеет множество наименований, предложенных различными исследователями для такого рода склоновых деформаций как в субаэральных (табл. 1), так и в субаквальных (табл. 2) условиях.

Как видно из приведенной таблицы 1, многими исследователями для выделения того или иного типа склоновых деформаций в составе оползней течения (как класса) используются в качестве признака классифицирования не только механизм смещения (в виде течения), но и другие особенности, такие как механизм перехода грунтов в вязкопластическое, текучее состояние (оползни внезапного разжижения, суффозионные оползни) или форма развития деформаций (выпор, выдавливание, латеральное растекание). При этом течение грунтов как механизм развития оползневых деформаций подразумевается как бы «по умолчанию».

Недоучет (или недопонимание) единства механизма смещения таких типов оползней приводит к появлению нестрогих, порой сумбурных классификационных схем. Примером такой нестрогой классификации оползней, при построении которой были «перемешаны» признаки выделения типов склоновых деформаций, является «Классификация оползневых процессов» в составе СП 420.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов. Общие требования». Например, в этой «классификации» выделены как отдельные типы оползней одного классификационного уровня «оползни вязкопластические» (по механизму смещения), так и «оползни внезапного разжижения» (по механизму перехода грунтов в вязкопластическое состояние). При этом абсолютно не было учтено, что собственно смещение «оползней внезапного разжижения» после фазы «разжижения» происходит в виде вязкопластического течения, т. е. они одновременно должны быть отнесены и к «оползням вязкопластическим». Такую ситуацию (возможность отнесения одного явления одно-

[1] Смещение оползней сдвига происходит по существующим в массиве поверхностям раздела (напластованию, сланцеватости, трещиноватости) [11].

[2] В настоящей статье склоновые деформации, развивающиеся в виде «сухого» течения грунтов, не рассматриваются.

временно к различным таксонам) следует рассматривать как грубое нарушение научных принципов классифицирования, ставящее под сомнение успешность практического применения этой «классификации».

Таблица 1. Наименование склоновых деформаций, развивающихся в виде течения (в субаэральных условиях), предложенное в различных классификациях оползней

№ п/п	Наименование	Автор(ы) классификации
1	Грязевой поток (Schlammströme)	A. Baltzer, 1875 [49]
2	Оплывины (или глинисто-каменные потоки = muren/murbrüche)	А. А. Иностранцев, 1885 [16]
3	Оползни-сплывы или оползни деляпсивные	А. П. Павлов, 1903 [29]
4	Поверхностные потоки. Глубокие и масштабные оползни течения	R. Almagia, 1910 [47]
5	Муры	J. Stiny, 1910 [72]
6	Деформации откосов, вызванные свойствами пород, в особенности в присутствии грунтовых вод	Л. Н. Бернацкий, 1915 [2]
7	Движение мягких пластичных масс	K. Terzaghi, 1925 [73]
8	Оплывины и грязевые потоки, как переходные стадии к массовым перемещениям под влиянием различных транспортирующих сил	П. А. Двойченко, И. В. Мушкетов, 1926 [25]
9	Пластические оползни (преимущественно деляпсивные). Суффозионно-пластические оползни (рис. 3)	Ф. П. Саваренский, 1935 [38]
10	Движение без разрыва сплошности масс. Движение пластических масс	А. П. Нифантов, 1935 [26]
11	Деляпсивный поток (щебенистая река). Оплывины	В. Ф. Пчелинцев, Н. Ф. Погребов, 1936 [34]
12	Группа II. Тип III. Оплывание склонов. Группа III. Тип A. Смещение, вызванное гидростатическим давлением. Тип D. Смещение глинистых масс	В. Е. Родионов, 1937 [36]
13	Движение в виде течения, включая солифлюкцию, земляные (earthflow) и грязевые (mudflow) потоки	C. F. S. Sharpe, 1938 [71]
14	Консистентные оползни. Оплывины	Н. В. Родионов, 1939 [37]
15	Оползни глетчерного типа	С. К. Абрамов, О. Б. Скиргелло, 1948 [1]
16	Оползни-сили (сели) рыхлых обломочных песчано-глинистых и щебеночных пород (оплывины, слюдянский тип). Оползни-сплывы глинистых пород (сухумский тип). Оползни при чередовании водоупорных пластов с водопроницаемыми (волжский тип)	С. С. Буцько, 1951 [3]
17	Пластический оползень. Оползень-поток	М. Е. Кнорре, С. К. Абрамов, И. О. Рогозин, 1951 [19]
18	Класс I. Оползни пластического течения	Е. Е. Минервина, 1953 [24]
19	Сплыв. Пластическая и вязкая деформация	Н. Н. Маслов, 1955, 1977 [22, 23]
20	Оползни-потоки (рис. 4). Оплывины	А. М. Дранников, 1956 [8]
21	Оползни выдавливания. Оползни оплывания	П. Н. Панюков, 1956 [31]
22	Оползни глетчерообразные. Оползни ложкообразные. Оплывины	Е. П. Емельянова, 1963 [9]
23	Пластические (консистентные) (рис. 5). Оползни-потоки и сплывы (оплывины). Структурно-пластические оползни (оползни выдавливания) (рис. 6)	И. А. Клевцов, 1964 [17]
24	Оплывание (деформации, происходящие при отсутствии поверхностей разрушения). Вязкопластическое течение	А. М. Демин, 2009 [7]
25	Пластично-плывущие оползни	В. Н. Славянов, 1964 [39]
26	Рукавообразные или глетчеровидные оползни. Оползни-сплывы	Г. Г. Великий, 1968 [6]
27	I. Оползневые деформации в лессовидных четвертичных породах (поверхностные сплывы, оплывины, оползни-потоки, суффозионные оползни). II. Оползневые деформации в смешанных породах (щебнисто-глинистые потоки)	Г. Л. Круковский, М. Г. Хаджаев, 1968 [20]
28	Оползни, связанные с выдавливанием глинистых пород из основания склона (откоса) под весом вышележащей толщи. Оползни, представляющие собой вязкое или вязкопластическое течение глинистого грунта (обычно вследствие увлажнения). Оползни, связанные с выплыванием водоносных песков из основания склона. Оползни, вызванные внезапным разжижением выщелоченных глинистых пород	М. К. Рзаева, И. О. Тихвинский, 1971 [35]

Окончание таблицы 1

29	Детрузивные оползни (выдавливания, глубокой ползучести). Деляпсивные оползни («вязкого течения» водонасыщенных масс — сплывы, оползни-потоки, оползни «внезапного разжижения»). Солифлюкционные (медленное течение поверхностного слоя — оплывины, натечные террасы)	Г.С. Золотарев, 1969, 1980 [14, 15]
31	Оползни течения, включая А — пластические, Б — оползни-потоки, В — оплывины, Г — сплывы	С.С. Орлов, Т. А. Тимофеева, 1974 [28]
32	Оплывины. Поверхностные сплывы. Оползни-потоки	Р.А. Ниязов, 1974 [27]
33	Выдавливание (рис. 7, a, c). Латеральное растекание (lateral spread) (рис. 7, b). Течение (flow) (рис. 7, d-h)	D.J. Varnes, 1978 [74], D. M. Cruden, D. J. Varnes, 1996 [54], R. Dikau, 1996 [56]
34	Оползни выдавливания. Оползни выплывания. Оползни-потоки. Оползни разжижения	В.В. Кюнцель, 1985 [21]
35	Оползни выдавливания (рис. 8, a). Оползни выплывания (рис. 8, b). Оползни течения (пластические) (рис. 8, c). Оползни-потоки, оползни-оплывины (рис. 8, d, e)	А.И. Клименко (ред.), 1983 [18]
36	Оползни-потоки	К.Ш. Шадунц, 1983 [46]
37	Оползни выдавливания. Оползни течения (вязкого, пластического и вязкопластического течения). Оползни особенные (выплывания, разжижения)	Н.Ф. Петров, 1988, 2006 [32, 33]
38	Оползни выдавливания (оползни глубинной ползучести, структурно-пластические). Оползни вязкопластические/консистентные (оползни-потоки, сплывы, оплывины). Оползни гидродинамического разрушения/выплывания (оползни суффозионные, оползни гидродинамического выпора). Оползни внезапного разжижения	И.О. Тихвинский, 1988, 2002 [41, 42]
39	Деляпсивные: оползни-потоки, оползни внезапного разжижения, оползни-глетчеры, сплывы. Оплывины солифлюкционные	В.С. Федоренко, 1988 [43]
40	Смещение обломочного материала подобно течению — грязевой оползень (mudslide), оползень-поток (flow slide), обломочный поток — чрезвычайно быстрый поток увлажненных обломков (extremely rapid flow of wet debris)	J.N. Hutchinson, 1988 [63]
41	Оползни течения	P. Antoine, 1992 [48]
42	Движение в виде потока (неограниченный, канализированный)	D. Brunsden, 1993 [50]
43	Оползень потоковый	Ю.П. Смирнов, И. А. Булавин, 1999 [40]
44	Потокообразные оползни (flow-like landslides) — неограниченные, канализированные/русловые, смешанные	G.Di Crescenzo, A. Santo, 2005 [55], O. Mavrouli, et al., 2014 [66]
45	Грязевой оползень (mudslide). Латеральное растекание (lateral spread). Выдавливание и выпор (extrusion and cambering)	A.I.F. Welbon, et al., 2007 [75]
46	Оползни течения, оползни разжижения подразделяемые: — оползни в несвязных водонасыщенных грунтах; — оползни в переуплотненных связных грунтах; — оползни в чувствительных глинах; — быстрые оползни в расширяющихся грунтах — при трансформации оползней сдвига в связных грунтах (от высокопластичных глин до низкопластичных глинистых песков) при движении	R. Fell, J. Glastonbury, G. Hunter, 2007 [58]
47	Потокообразные оползни (flow-like landslides), включающие оползни потоки (flow slide), латеральное растекание (lateral spreading), обломочные потоки (debris flow), оползни потоки в чувствительных глинах (sensitive clay flow slide), грязевые потоки (mud flow), земляные потоки (earth flow), торфяные потоки (peat flow)	O. Hungr, S. Leroueil, L. Picarelli, 2012 [62]

Таблица 2. Наименования склоновых деформаций, разв ивающихся в виде течения (в субаквальных условиях), предложенные в различных классификациях оползней

№ п/п	Наименование	Автор(ы) классификации
1	Подводный грунтовый поток. Подводный турбидитный (мутьевой) поток	R.H. Dott (Jr.), 1963 [57]
2	Перемещение подвижного илистого осадка. Перемещение пластической вязкой массы. Перемещение пластической вязкой массы с компетентными слоями	Б.Г. Васин, 1968 [5]
3	Подводный инерционный поток. Подводный турбидитный (мутьевой) поток	R.M. Carter, 1975 [51]
4	Обломочный поток — связный обломочный поток, гранулированный поток. Разжиженный (текучепластичный) поток, занимающий промежуточное положение. Флюидальный поток — флюидизированный поток, турбидитный (мутьевой) поток	D.R. Lowe, 1979 [64]

Окончание таблицы 2

5	Грунтовые потоки, включающие обломочные, грязевые, гранулированные потоки. Флюидальные потоки, включающие разжиженные (текучепластичные), флюидизированные, турбидитные (мутьевые) потоки	T.R. Nardin, et al., 1979 [68]
6	Гравитационные потоки осадков (подводные), включая: — течение вещества в виде вязких и дисперсионных потоков высокой плотности; — перемещение материала в виде несвязных жидких высокоплотностных потоков	А.А. Чистяков, Ф. А. Щербаков, 1984 [45]
7	Гранулированный поток. Суспензионный поток. Флюидальный поток (нормальный, гиперконцентрированный)	T.C. Pierson, J. E. Costa, 1987 [69]
8	Пастообразные потоки пластично-вязкой консистенции. Зерновые потоки. Разжиженные потоки (удерживаемые движением флюида). Суспензионные потоки	И.В. Хворова, 1989 [44]
9	Гравитационные потоки, включая: — ламинарные потоки (матриксные — обломочные потоки, флюидные — гранулированные потоки); — турбидитные (мутьевые) потоки (низкоплотностные потоки, высокоплотностные потоки)	D.G. Masson, et al., 2006 [65]

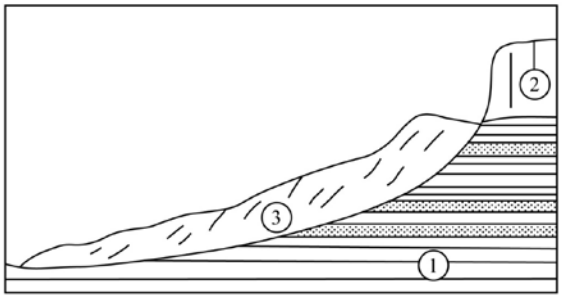


Рис. 3. Инсеквентный оползень суффозионно-пластического образования, по Ф. И. Саваренскому (приведено по [38]). Обозначения: 1 — глины, чередующиеся с водоносными песками; 2 — суглинки; 3 — оползневые массы

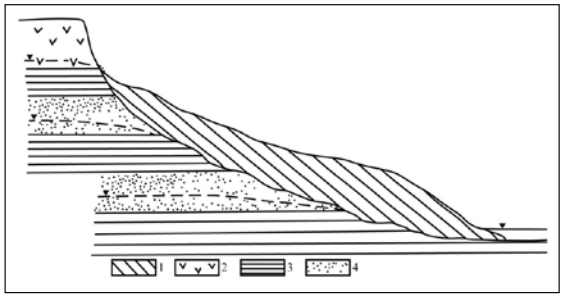


Рис. 4. Оползень-поток (по А. М. Дранникову (приведено по [8])). Обозначения: 1 — оползневые накопления (земляной поток), 2 — суглинки, 3 — глины, 4 — пески

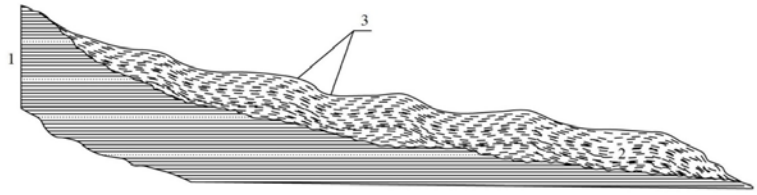


Рис. 5. Пластический оползень (по И. А. Клевцову (приведено по [17])). Обозначения: 1 — дочетвертичные тонкослоистые (сланцевые) глины с ненарушенной структурой и текстурой; 2 — элювиальные пластичные глины, находящиеся в движении; 3 — поверхность пластического оползня, оползневые бугры, валы и западины

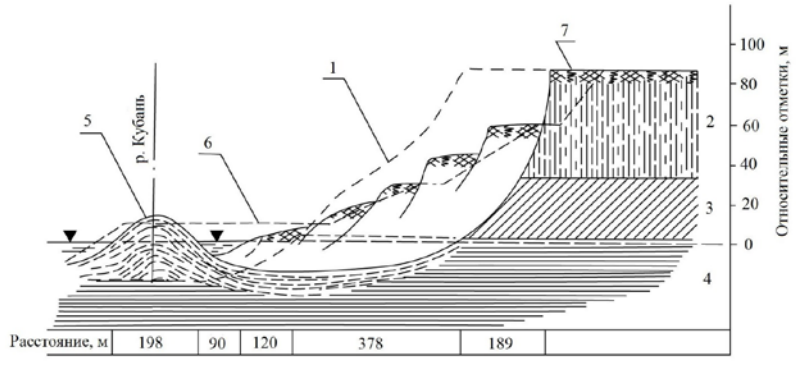


Рис. 6. Структурно-пластический оползень (по И. А. Клевцову (приведено по [17]), на примере Большого Григориполисского оползня на правом берегу р. Кубани в районе станицы Григорполисской). Обозначения: 1 — конфигурация склона до образования Большого Григориполисского оползня; 2 — лессы и лессовидные суглинки; 3 — суглинки и глины с прослоями и линзами водоносного песка; 4 — кирпично-красные глины армавирской свиты; 5 — дно р. Кубани, выдавленное оползнями на высоту до 8 м выше уреза воды; 6 — проектируемая «призма противодавления» (пригрузочный контрбанкет); 7 — проектируемая разгрузка оползневого склона с устройством берм (террас)

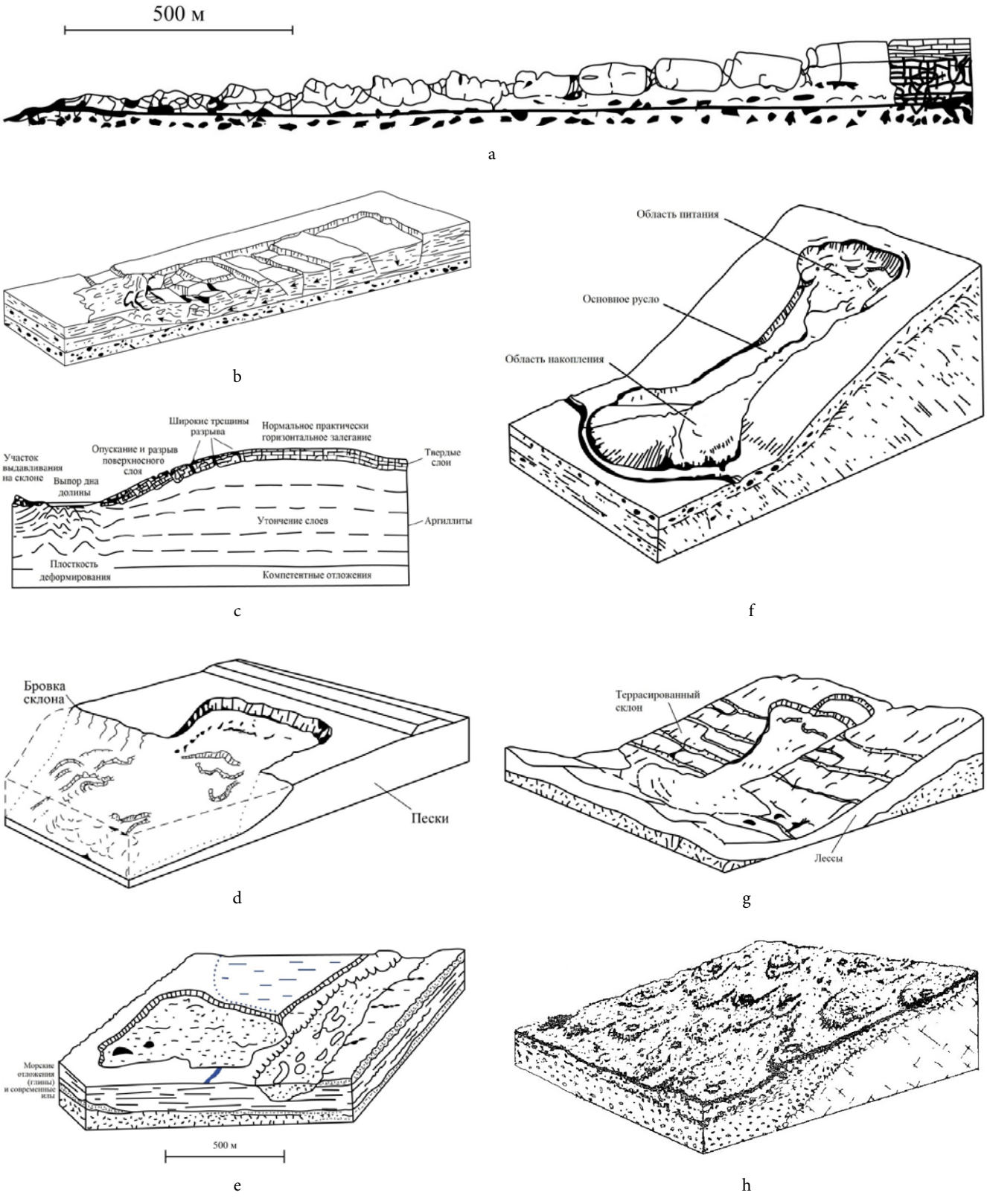


Рис. 7. Типы оползней, смещение которых происходит в виде течения (по Д. Д. Варнсу (приведено по [4], за исключением оползней «сухого» течения): a — оползень выдавливания (расползание блоков скальных и рыхлых грунтов, обусловленное пластическими деформациями подстилающих отложений); b — оползень выдавливания глинистых грунтов (с последующим растеканием), очень быстрый; c — оползень выдавливания с подъемом дна долины; d — оползень-поток водонасыщенного песка или ила, от быстрого до очень быстрого; e — быстрый оползень-поток глинистых масс («подвижные» глины), очень быстрый; f — оползень-поток глинистых масс, от очень медленного до быстрого; g — оползень-поток во влажных или водонасыщенных лессах, очень быстрый, а также оползень-поток в сухих лессах, вызванный землетрясением; h — солифлюкция

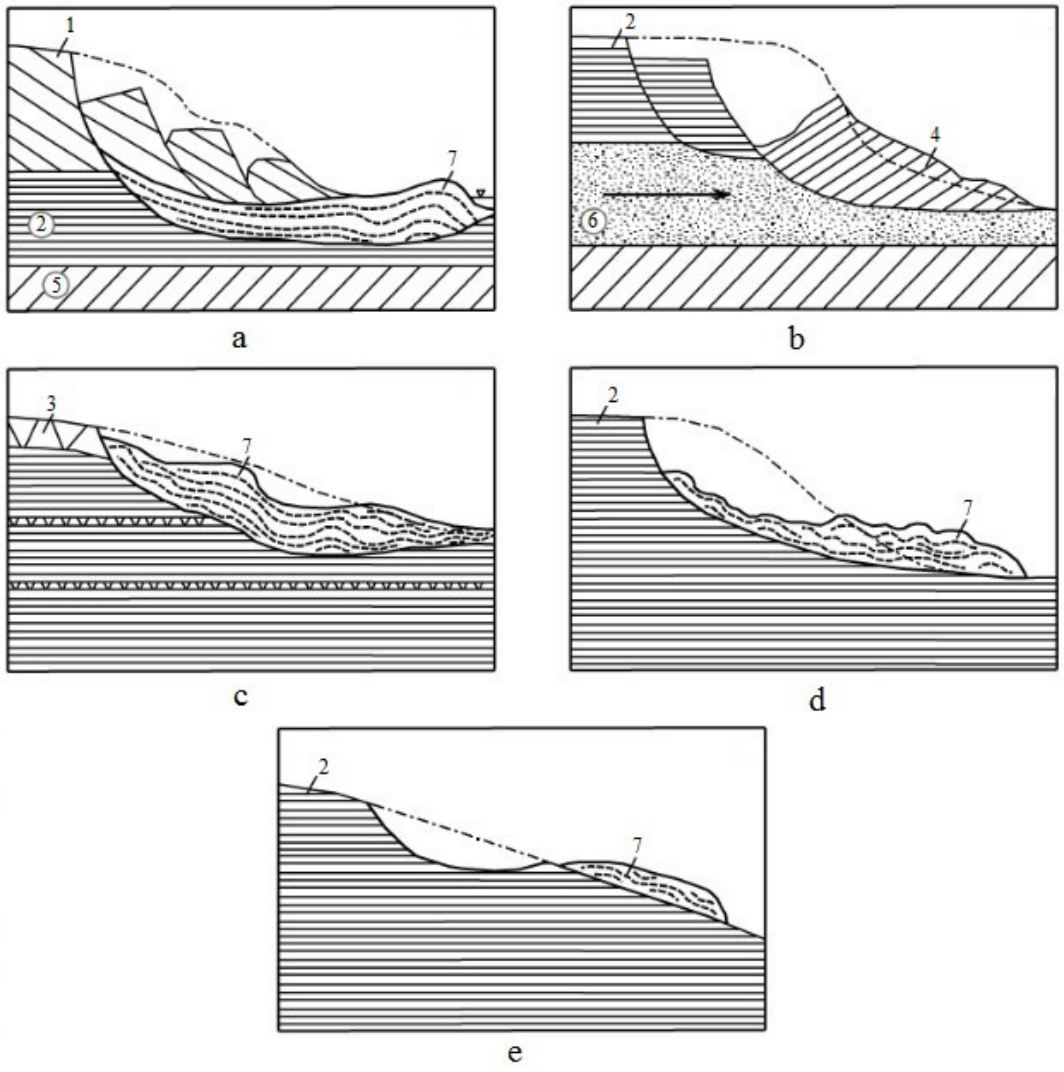


Рис. 8. Типы оползней, смещение которых происходит в виде течения (по А. И. Клименко с соавторами (приведено по [18])):
a — оползень выдавливания — смещение блоков «жестких» пород вследствие вязкопластического течения подстилающего относительно слабого пласта с его выдавливанием под весом вышележащих отложений; b — оползень выплывания — смещение блоков пород вследствие суффозионного выноса-выплывания песчаных или пылеватых отложений при высоких градиентах фильтрационного потока подземных вод; c — пластический оползень — смещение в виде медленного пластического течения всей толщи переувлажненных глинистых пород; d — оползень-поток — смещение в виде преимущественно быстрого вязкопластического течения всей толщи переувлажненных песчано-глинистых, пылеватых глинистых отложений, иногда с грубообломочным материалом; e — оплывина — смещение в виде быстрого вязкого течения грунтов деятельного слоя.
Обозначения: 1 — «жесткие» грунтовые массы (скальные, полускальные и твердые связные); 2 — глинистые (суглинистые) грунты; 3 — глинистые (суглинистые) грунты в твердом и полутвердом состоянии; 4 — смещенные блоки «жестких» грунтовых масс; 5 — скальные, полускальные грунты; 6 — водонасыщенные песчаные или пылеватые отложения; 7 — оползневые отложения, формирование которых произошло в результате течения (пластичного, вязкопластичного, вязкого)

Механизм смещения оползней течения

В основных чертах механизм формирования и смещения оползней течения представляется в следующем виде. Первичному оползню обычно предшествует процесс увлажнения грунтов — длительный (как правило, для глубоких горизонтов) или достаточно быстрый (нередко наблюдается для приповерхностной части склонового массива в условиях интенсивных осадков или быстрого снеготаяния). Следующей существенной стадией формирования оползней течения (начальная фаза оползнеобразования) является начало развития в грунтах необратимых деформаций под действием существующих в склоновом массиве напряжений. Переход к фазе течения (стадия основных смещений) может происходить:

1. постепенно, при накоплении напряжений с преодолением порога ползучести (на длительный период или периодически) с переходом грунтов (в интервале «основного деформируемого гори-

зонта») в пластическое состояние с развитием течения, как правило, с невысокими или относительно высокими скоростями перемещения оползня (от см/год до м/сут). В случае преодоления порога ползучести в течение длительного времени оползневые деформации переходят в стадию основных смещений, а в условиях периодического превышения действующих напряжений порога ползучести, смещения оползня носят импульсный, а при ведущей роли климатического фактора — сезонный, характер.

2. очень быстро (практически мгновенно) в условиях разрушения структуры грунтов (в интервале «основного деформируемого горизонта» — ОДГ) при резком возрастании порового давления в водонасыщенных разностях (например, при динамическом /сейсмическом воздействии), когда существующие напряжения в склоновом массиве скачкообразно преодолевают порог ползучести, многократно превышая его, что сопровождается переходом грунтов в текучее состояние, при котором грунты, претерпевшие разжижение, приобретают свойства, более типичные для жидкости. Такого рода оползни характеризуются очень высокими скоростями смещения (до первых м/сек), а уклоны поверхности, по которой они движутся, могут составлять всего 1–2°.

Таким образом, особенностью формирования «быстрых» оползней течения является скачкообразное (в разы) снижение величины порога ползучести (например, при разрушении структуры грунта в интервале ОДГ при динамическом воздействии), что сопровождается резким изменением соотношения «действующие напряжения» / «значение порога ползучести», в условиях практически мгновенного снижения значений последнего.

На практике, при развитии оползней течения может наблюдаться комбинация описанных сценариев оползнеобразования, когда собственно начало смещения вызвано преодолением порога ползучести длительно действующими в склоновом массиве напряжениями с последующим (в процессе оползания) разрушением структуры грунтов, что, в свою очередь, приводит к снижению величин напряжений, необходимых для развития необратимых, прогрессирующих деформаций, и сопровождается ускорением движения оползневых масс с трансформацией пластического течения в вязкопластическое.

Важным фактором, определяющим особенности смещения оползней в виде течения грунтов, является характер расположения в разрезе ОДГ, который может находиться как в приповерхностной части склонового массива, так и на некоторой глубине, перекрываясь горизонтом, в котором пластические, вязкопластические деформации не развиваются. В первом случае, речь идет о формировании неглубоких оползней течения (см. рис. 2–4), а во втором — глубоких (см. рис. 5). Идею различать «поверхностное течение», приуроченное к зоне сезонных колебаний температуры и влажности, и течение масс, происходящее под действием силы тяжести, которое представляет собственно явление ползучести, впервые в 1846 г. высказал A. Collin [52]. При этом совершенно неважными являются абсолютные величины глубины захвата оползневыми деформациями склонового массива, т.к. ключевым критерием разделения оползней течения на неглубокие и глубокие служит именно наличие/отсутствие горизонта грунтов, перекрывающих ОДГ.

Для неглубоких оползней течения следующая стадия оползнеобразования — собственно смещение оползневых масс в виде течения — является основной и завершающей. Эпюры распределение скоростей смещения оползневых масс в разрезе при смешении неглубоких оползней течения показаны на рис. 9. Развитие глубоких оползней течения носит более сложный характер. Определяющую роль в форме дальнейших деформаций глубоких оползней течения играет горизонт грунтов, перекрывающих ОДГ, в котором пластические, вязкопластические деформации не происходят.

В случае незначительной мощности и/или недостаточно высокой прочности грунтов перекрывающего горизонта, смещения, развивающиеся в основном деформируемом горизонте, приведут к его разрушению и дезинтеграции (вторая фаза оползнеобразования) с последующим прорывом грунтов, находящихся в вязкопластическом/вязком состоянии, и переходом к следующей стадии развития деформаций — стадии основных смещений. В дальнейшем, на стадии основных смещений, происходит образование, как правило, протяженного оползневого языка из вязкопластических масс, которые могут на своей поверхности транспортировать блоки грунтов перекрывающего горизонта (подобно льдинам при ледоходе) (рис. 10). В головной части такого глубокого оползня образуется оползневой цирк (в виде полукруглой депрессии), борта которого нередко осложнены локальными (вторичными) оползнями скольжения.

В случае значительной мощности и/или достаточно высокой прочности грунтов перекрывающего горизонта, смещения, развивающиеся в основном деформируемом горизонте, не приведут к его разрушению. При этом стадия основных смещений такого глубокого оползня завершится образова-

нием вала выпирания (или скорее — выжимания), в случае пригрузки пластичных грунтов отложениями перекрывающего горизонта, либо вала выдавливания (пластического выдавливания), если вязкопластичные грунты деформируют перекрывающий горизонт без его разрушения. Оползневые валы имеют, как правило, фронтальную форму, вытягиваясь вдоль основания склона. Головная часть такого глубокого оползня представляет собой полукруглую или трапециевидную (с закругленными краями) оползневую депрессию, борта которой зачастую осложнены блоками локальных (вторичных) оползней скольжения.

Следует отметить, что А. П. Павлов, описывая детрузивный тип оползней, в качестве примера приводит проявления оползневых процессов, в которых при смещениях произошло формирование вала выпирания [29, 30].

Примером глубокого оползня течения, при развитии которого проявились оба описанных механизма оползнеобразования, является оползень «Шарора», образовавшийся при Гиссарском землетрясении (1989). Западная и восточная части оползня «Шарора» имеют протяженные (до 380 и 470 м соответственно) языковые части, сформированные в виде потока вязкопластических масс,

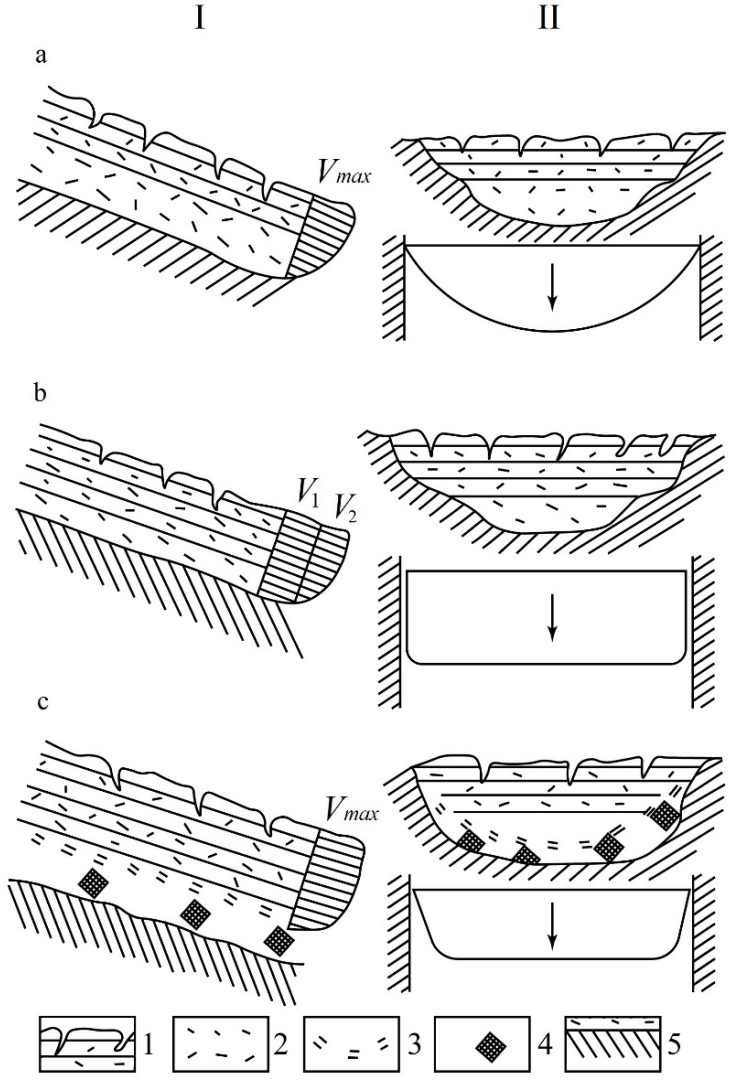


Рис. 9. Схема движения неглубокого (приповерхностного) оползня течения (приведено по [46]). Обозначения: I — продольный разрез оползня, II — поперечное сечение оползня и эпюра его смешения в плане; a — течение при «жестком закреплении» по ложу и бортам оползня, b — «проскальзывание» без закрепления в ложе и бортах оползня, c — течение при «упругом закреплении» по ложу и бортам оползня; 1 — обломочно-глинистые оползневые массы с трещинами усадки и растяжения; 2 — водонасыщенные глинистые массы градиентного слоя; 3 — прослой перемятых глин, по которому происходит смещение (смазка); 4 — пакеты и глыбы глинистых грунтов в оползне первой генерации; 5 — литифицированные глины (несмещенные), штриховка указывает на падение слоев, V1 — скорость движения основной части оползня, V2 — скорость движения фронтальной части оползня, Vmax — максимальная скорость движения оползня

Рис. 10. Вид поверхности оползня внезапного разжижения в лессах (Таджикистан), на которой хорошо видны многочисленные перемещенные фрагменты/блоки лессов в твердой консистенции, перекрывающих ОДГ в момент оползнеобразования (разжижения зоны обводненных лессов)

в то время как центральная часть оползня представляет собой вал выпирания высотой до 8 м, протягивающийся вдоль склона на 170 м [10, 13, 76].

Типизация оползней течения

Выделение типов, видов и разновидностей оползней течения в составе частных классификаций этого типа склоновых деформаций проводится:

— по морфометрическим характеристикам, в т. ч. форме оползневого тела (в плане), его местоположению на склоне;

— по типу грунтов, вовлекаемых в смещение;

— по механизму перехода грунтов в вязкопластическое, текучее состояние;

— по особенностям механизма смещения, в т. ч. в зависимости от консистенции оползневых масс.

Также важным признаком выделения типов оползней течения (неглубокие/приповерхностные и глубокие), как было показано выше, являются особенности геологического строения склонового массива.

Наиболее распространенной и простой типизацией неглубоких оползней, смещение которых происходит в виде течения, является выделение в их составе оплывин, сплывов и оползней-потоков (рис. 11) [8, 14, 15, 17, 20, 27, 28]. Оплывины определяются как небольшие (десятки, первые сотни м3) склоновые деформации, развивающиеся при существенном локальном обводнении (при инфильтрации дождевых и талых снеговых вод) приповерхностного слоя грунтов. К сплывам (рис. 11–13) относятся относительно изометричные по форме, разномасштабные (от сотен м3 до десятков тысяч м3) оползневые деформации, захватывающие приповерхностную часть склонового массива. По форме и характеру сплывы сходны с оплывинами, но отличаются большей глубиной захвата грунтов смещениями и более крупными размерами (см. рис. 11). Образование сплывов наблюдается на увлажненных достаточно крутых (15–45°) склонах. По мнению Р. А. Ниязова, сплывы приурочены в большинстве случаев к вогнутым формам рельефа [27]. В районах распространения многолетнемерзлых грунтов для описания такого типа склоновых деформаций нередко используют термин «быстрая солифлюкция». Оползни-потоки, в отличие от сплывов, могут иметь более значительные объемы и формируют вытянутые оползневые языки, протяженность которых существенно больше их ширины (см. рис. 12, 13).

По морфометрическим характеристикам, в первую очередь по форме в плане, среди неглубоких оползней, смещение которых происходит в виде течения, выделяют оползни ложкообразной (эллипсоидальной) (рис. 14), каплевидной, глетчеровидной и грушевидной (с суженной горловиной, по Е. П. Емельяновой) формы (рис. 15) [1, 4, 9, 54, 74]. В. Н. Славянов и Г. Г. Великий оползни глетчеровидной формы также предлагали определять как рукавообразные оползни [6, 39]. Формирование оползней глетчеровидной (рукавообразной) формы может происходить как на поверхности склонов, в т. ч. с выработкой собственного ложа при смещении (русловой оползень-поток (рис. 16)), так и быть приурочено к существующей эрозионной сети (оврагам, руслам мелких временных водотоков). Для последних разновидностей оползневых смещений в зарубежной практике зачастую используют термин «канализированные (или русловые) оползни» [50, 55, 66].

Нередко оползни-потоки глетчеровидной формы характеризуются сложным механизмом образования, формируясь на начальном этапе сме-

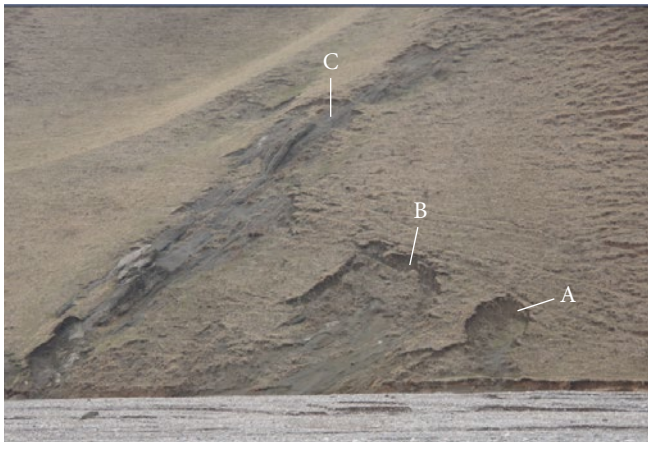


Рис. 11. Разновидности неглубоких оползней течения: A — оплывина, B — сплыв, C — оползень-поток

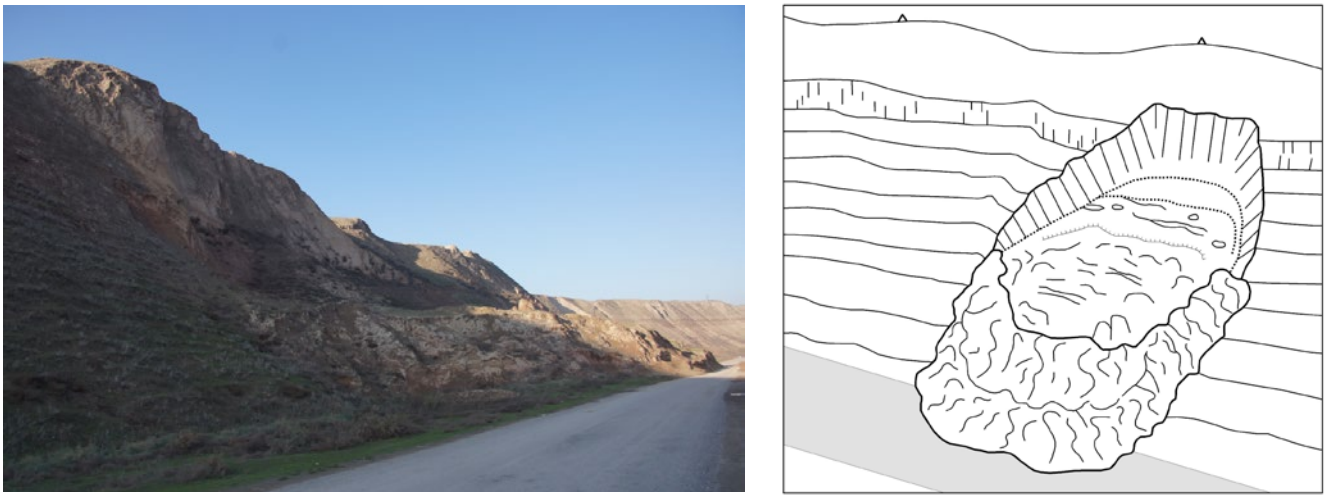


Рис. 12. Сплыв в борту долины р. Вахш (Таджикистан), частично перекрывший автодорогу, и его схема

щения как склоновые оползни, которые при смещении достигают локального эрозионного вреза и изменяют (во многих случаях достаточно резко, под углами до 90о) направление своего движения на вдольрусловое, следуя «каналу» эрозионного вреза (рис. 17). Другим сценарием образования масштабного оползня-потока глетчеровидной формы может являться слияние в его головной серии менее масштабных сплывов (начальный этап смещения склоновых оползней) с последующим формированием единого оползневого языка, смещающегося вниз по склону (рис. 18). В случае, если склон сложен достаточно устойчивыми грунтами, смещение оползня-потока возможно в виде серии рукавообразных оползней (рис. 19)

Рис. 13. Различие в форме (в плане) и объемах сплывов (A) и оползня-потока (B)

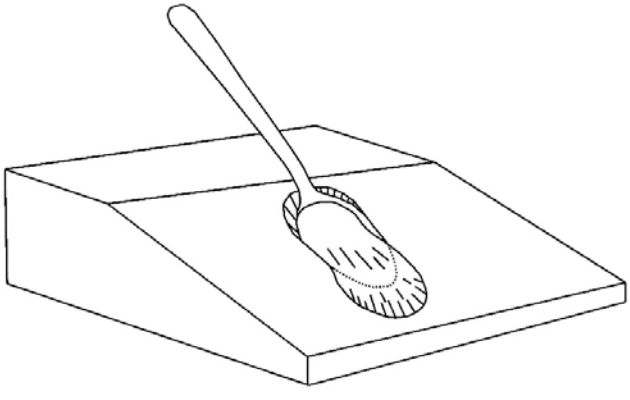


Рис. 14. Оползень ложкообразной формы (по Д. Д. Варнсу (приведено по [4] с изменениями))

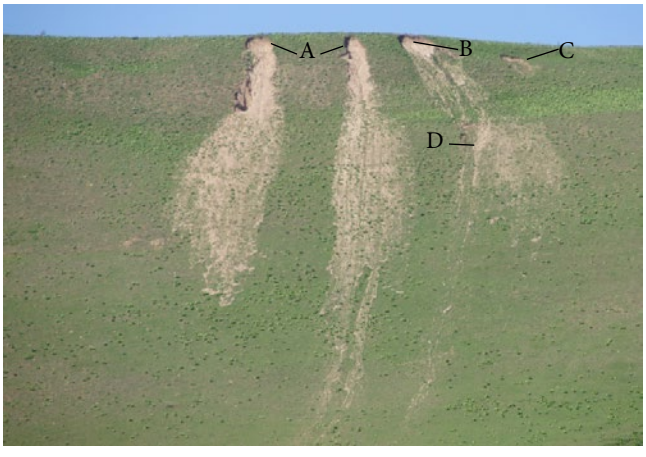


Рис. 15. Различные типы (по форме в плане) неглубоких оползней течения: A — грушевидные, B — каплевидный, C — оплывина, D — рукавообразный

Рис. 16. Русловой оползень-поток,
Западный Кавказ

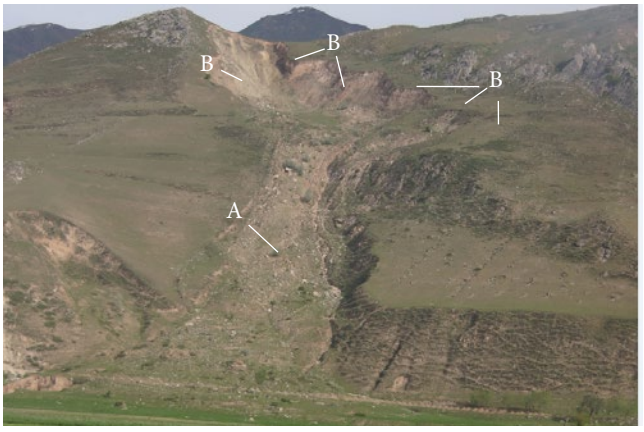


Рис. 18. Образование оползня-потока глетчеровидной формы (А) в результате слияние серии сплывов (В) в его головной части

Рис. 17. Оползень-поток глетчеровидной формы со сложным механизмом образования (склоновые оползни, трансформировавшиеся при смещении (при достижении эрозионного вреза) во вдольрусловой поток)

Рис. 19. Оползень-поток, смещение которого происходило в виде серии рукавообразных оползней (по В. Н. Славянову и Г. Г. Великому

Другой достаточно простой типизацией оползней, смещение которых происходит в виде течения, является их разделение по типу грунтов, вовлекаемых в движение. Такие идеи первоначально были высказаны C.F.S. Sharpe (1938), разделявшим смещения в связных грунтах и смещения в обломочных грунтах [71]. Дальнейшее развитие идеи учета при классификации оползней типов грунтов, вовлекаемых в смещения, находит в работах Д. Д. Варнса [4, 54, 74], который выделял (в качестве отдельных типов) оползни течения в обломочно-щебенистых грунтах, водонасыщенных песках, лессах, связных (суглинистых и глинистых) грунтах (см. рис. 7, *b*, *d-g*). В последние годы типизация оползней, смещение которых происходит в виде течения, учитывающая тип смещающихся грунтов, развивалась в работах O. Hungr, et al. [61, 62]. O. Hungr предложил в составе «потокообразных оползней» (= оползней течения) выделять обломочные потоки (debris flow), оползни-потоки в чувствительных глинах (sensitive clay flow slide), грязевые потоки (mud flow), земляные потоки (earth flow), торфяные потоки (peat flow). R. Fell, et al., вслед за J. N. Hutchinson, разделявшим оползни «потокообразных форм» в гляциальных (моренных) и перигляциальных суглинках [63], дополнительно предлагают выделять оползни в переуплотненных связных грунтах, а также учитывать различия в характере движения оползней течения в диапазоне от высокопластичных глин до низкопластичных глинистых песков [58].

В отечественной практике изучения и типизации оползней течения также предлагается учитывать тип грунтов, вовлекаемых в смещения — песчаные, пылеватые, глинистые. С. С. Буцько, выделяя региональные типы оползней течения, в частности, различал оползни в рыхлых обломочных песчано-глинистых и щебеночных грунтах (слюдянский тип), оползни-сплывы в глинистых грунтах (сухумский тип) [3]. Г. С. Золотарев, И. О. Тихвинский и другие указывали на необходимость отдельного рассмотрения оползней в слаболитифицированных морских глинах (норвежский тип оползней) и лессах, представляющих собой грунты, чувствительные к динамическому воздействию, а также оползней, формирующихся в песчаных (супесчаных) грунтах, обладающих плывунными свойствами [14, 15, 41, 42]. Однако в отличие

от зарубежных работ в отечественной практике при типизации неглубоких оползней течения учет типа грунтов, вовлекаемых в смещения, не рассматривается в качестве ведущего признака, а носит вспомогательный характер.

Вместе с тем, особенности геологического строения склонового массива, слагающих его типов грунтов, важны при характеристике глубоких оползней течения. Наиболее известным типом глубоких оползней течения, где значимо геологическое строение склона, являются оползни «одесского типа», описанные в многочисленных публикациях, посвященных изучению склоновых процессов. Образование оползней «одесского типа» обусловлено пластическими деформациями в увлажненных мэотических глинах, в т. ч. с формированием валов выпирания (или скорее — выжимания), под воздействием напряжений, возникающих от веса вышезалегающих понтических известняков и лессов. Д. Д. Варнс также обращает внимание на значимость для характеристики оползней выдавливания различных видов особенностей геологического строения склонового массива как фактора, предопределяющего специфику склоновых деформаций (см. рис. 7, *а-с*) [4, 54, 74].

При этом следует отметить, что оползни выдавливания (оползни «одесского типа», оползни выдавливания с подъемом дна долины (по Д. Д. Варнсу)), по существу, представляют собой переходный тип к разновидностям оползней сдвига, механизм развития которых заключается в смещении блоков прочных (как правило, скальных) грунтов по увлажненной поверхности аргиллитоподобных глин, но, как правило, не сопровождающихся их выдавливанием (например, оползни «ангарского типа» [11]).

Анализ типа грунтов, а также учет особенностей их поведения в условиях динамического воздействия важен при характеристике глубоких оползней течения, формирующихся в результате «внезапного разжижения». Способность грунтов при водонасыщении к динамическому разжижению, при котором происходит резкое снижение величин напряжений, необходимых для развития оползневых деформаций, является ведущим признаком для выделения оползней внезапного разжижения (по Г. С. Золотареву и И. О. Тихвинскому) или оползней латерального растекания в «подвижных» / «чувствительных» глинах (по D. J. Varnes, R. Dikau, A.I.F. Welbon, R. Fell, O. Hungr) [14, 15, 41, 42, 54, 56, 58, 62, 74]. Детальное описание механизма перехода грунтов в вязкопластическое, текучее состояние при образовании оползней внезапного разжижения в лессах, его моделирование приведено в [12, 13, 77]. Развитие этого достаточно специфического типа оползней течения описано в регионах распространения засоленных глин морского генезиса в Канаде, Норвегии, Российской Федерации (на Кольском п-ове), а также в областях широкого распространения лессов в Центральной Азии и Китае.

На основе систематизации и обобщения многочисленных существующих подходов к выделению различных типов оползней течения, может быть предложена сводная типизация оползней течения по механизму их формирования и развития (табл. 3.).

Особое внимание учету типов грунтов, вовлекаемых в смещение, соотношению твердой и водной составляющих уделяется при типизации склоновых деформаций в субаквальных условиях, в связи с тем, что основным источником информации об их развитии служат осадочные толщи, формирование которых произошло в результате подводного оползания. Одним из примеров классификации гравитационных потоков (для субаквальных условий) является классификация, предложенная S. Shanmugam (в виде треугольной диаграммы), в которой он провел типизацию подводных смещений с учетом соотношения в составе движущейся массы обломочной, глинистой составляющей грунтов и водного компонента (рис. 20) [70]. В работах R. V. Fisher, M. A. Hampton, T. C. Pierson, D. R. Lowe, K. J. Hsü и других также можно найти анализ роли соотношения твердой и водной составляющих в характере смещения гравитационных потоков как в субаквальных, так в субаэральных условиях [64, 67–69]. T. Mulder и J. Alexander предложили обобщенную типизацию смещений в виде течения (гравитационных потоков) в зависимости от концентрации твердой составляющей в составе движущихся масс (рис. 21) [67]. В приведенной схеме делается попытка представить в виде единой классификации склоновые деформации, развивающиеся как в субаквальных, так в субаэральных условиях.

Вместе с тем необходимо отметить, что к настоящему времени, несмотря на отдельные попытки, предпринятые T. C. Pierson и J. E. Costa [69], P. Coussot и M. Meunier [53], T. Mulder и J. Alexander [67], а также рядом других исследователей, не предложено единой классификации оползней, совместно рассматривающей и структурирующей типы склоновых гравитационных процессов, развивающихся как в субаэральных, так и субаквальных условиях,

Заключение

Деформации склонов в виде течения грунтов («сухого», пластического, вязкопластического, вязкого) под воздействием гравитационных сил являются одним из основных механизмов смещения оползней, формируя отдельный класс склоновых процессов, развитых повсеместно как в субаэральных, так и субаквальных условиях. В регионах, где

в верхней части геологического разреза доминируют глинистые грунты, оползни течения являются преобладающим типом склоновых деформаций.

Формирование оползней течения обусловлено превышением величин действующих в склоновом массиве сдвиговых напряжений порога ползучести, т. е. переходом деформаций из затухающих в необратимые. В зависимости от консистенции грунтов (в субаэральных условиях) или соотношения твердой составляющей и воды (в субаквальных условиях) смещение будет происходить в виде пластического, вязкопластического или вязкого течения, скорость которого будет зависеть от вязкости оползневых масс. В то же время оползневые смещения в форме течения присущи не только водонасыщенным грунтам, но также могут развиваться в сухих песчаных и обломочных отложениях, характеризуясь определенной спецификой, требующей отдельного рассмотрения. Смещение оползней течения в целом происходит без нарушения сплошности массива в основном деформируемом горизонте, а развивающиеся вязкопластические деформации приурочены, в отличие от оползней скольжения и сдвига, не к плоскости, а к интервалу геологического разреза — ОДГ.

Переход к фазе течения при развитии рассматриваемых оползней может происходить длительно, с постепенным преодолением порога ползучести при накоплении напряжений, или очень быстро в условиях разрушения структуры грунтов при динамическом (в т. ч. сейсмическом) воздействии с практически мгновенным переходом их в текучее состояние — разжижением. В первом случае оползневые деформации переходят либо в стадию основных смещений, либо носят импульсный (при ведущей роли климатического фактора — сезонный) характер, а смещение оползня происходит с невысокими или относительно высокими скоростями. Во втором случае деформации сразу переходят в стадию основных смещений, характеризуясь очень высокими скоростями смещения (до первых м/сек). На практике при развитии оползней течения может наблюдаться комбинация описанных сценариев.

Таблица 3. Типизация оползней течения по механизму формирования и развития

класс	тип		подтип			разновидность	
	признак выделения	наименование	признак выделения		наименование	признак выделения	наименование
ОПОЛЗНИ ТЕЧЕНИЯ	местоположение ОДГ	**неглубокие / приповерхностные**	масштабность		«пленочные»*		
					оплывины	форма в плане	каплевидная
					сплывы (для регионов распространения ММП — «быстрая солифлюкция»)		ложкообразная (эллипсоидальная)
							грушевидная
					оползни-потоки		глетчеровидная
							рукавообразная
		глубокие	состояние перекрывающего ОДГ горизонта	без разрушения	выжимания (вал формируется преимуществен-но грунтами ОДГ в пластичном состоянии)		
					пластического выдавливания (ядро вала фор-мируется ОДГ в пластичном / вязкопластичном состоянии, внешняя (приповерхностная) часть вала — грунтами неразрушенного горизонта, перекрывающего ОДГ)		
					выплывания (с растеканием грунтов ОДГ и оседанием/обрушением грунтов горизонта, перекрывающего ОДГ)		
				с разрушением	потокообразные («быстрые оползни-потоки»)		
	тип деформаций	**пластические**					
		вязко-пластические					
		вязкие					
		текучие					
	характер преодоления порога ползучести	**постепенный**					
		скачкообразный («внезапного разжижения»)					
	местоположение оползня	**склоновые**					
		«русловые» (канализированные)					
		трансформирующиеся					

* Характерны для регионов распространения ММП, формируются в результате ежесуточного смещения оттаявшего, приповерхностного слоя грунтов. Описание оползней этого подтипа можно найти в [78].

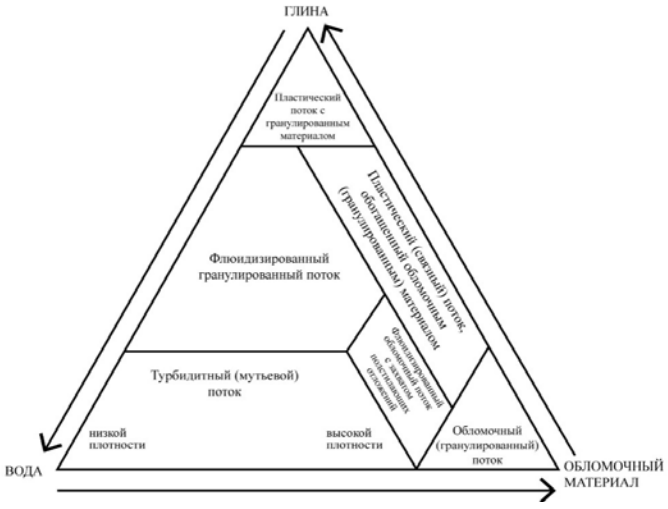


Рис. 20. Треугольная диаграмма классификации гравитационных потоков (в субаквальных условиях) (приведено по S. Shanmugam, с изменениями [70])

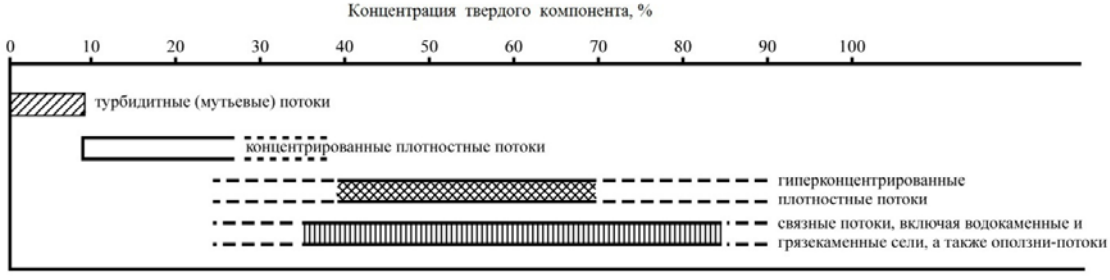


Рис. 21. Типизация гравитационных потоков (приведено по T. Mulder и J. Alexander, с изменениями [67])

По расположению в разрезе зоны деформаций — ОДГ — оползни течения подразделяются на поверхностные и глубокие. В первом случае ОДГ располагается в приповерхностной части склонового массива, а во втором — на некоторой глубине, перекрываясь горизонтом грунтов, в котором пластические, вязкопластические деформации не развиваются. При развитии глубоких оползней течения может происходить либо разрушение перекрывающего горизонта с прорывом грунтов, находящихся вязкопластическом /вязком состоянии, с образованием протяженных оползневых языков, либо наблюдаться образование вала выпирания или выдавливания — при значительной мощности и/или достаточно высокой прочности грунтов перекрывающего горизонта.

Выделение типов, видов и разновидностей оползней течения проводится:

— по морфометрическим характеристикам (форме оползневого тела и его местоположению на склоне);

— по типу грунтов, вовлекаемых в смещение;

— по механизму перехода грунтов в вязкопластическое, текучее состояние;

— по особенностям механизма смещения, в т. ч. в зависимости от консистенции оползневых масс.

Наиболее распространенной и простой типизацией неглубоких оползней, смещение которых происходит в виде течения, является их типизация по морфометрическим характеристикам с выделением оплывин, сплывов и оползней-потоков. По форме в плане неглубокие оползни течения подразделяются на оползни ложкообразной (эллипсоидальной), каплевидной, глетчеровидной (рукавообразной) и грушевидной (с суженной горловиной) формы. Смещение оползней глетчеровидной (рукавообразной) формы может происходить как по поверхности склонов, в т. ч. с выработкой собственного ложа, так и быть приурочено к существующей эрозионной сети («канализированные» оползни). Другой достаточно простой типизацией оползней течения является их разделение по типу грунтов, вовлекаемых в смещения (в обломочно-щебенистых образованиях, в водонасыщенных песках, лессах, связных (суглинистых и глинистых) грунтах, в торфяных отложениях). По особенностям поведения грунтов в условиях динамического воздействия и механизму их перехода в «текучее» состояние выделяется специфический тип склоновых смещений — оползни внезапного разжижения (по Г. С. Золотареву и И. О. Тихвинскому) или оползни латерального растекания в «подвижных» / «чувствительных» глинах (по Д. Д. Варнсу).

Систематизация и обобщение существующих подходов к выделению различных типов оползней течения позволили предложить сводную типизацию оползней течения по механизму их формирования и развития.

Предлагаемые типизации подводных смещений разрабатываются с учетом соотношения в составе движущейся массы твердого (обломочного, глинистого) и водного компонентов. Большинством исследователей среди склоновых деформаций в субаквальных условиях различаются обломочные связные потоки, гранулированные потоки, флюидальные (суспензионные) потоки, турбидитные (мутьевые) потоки, разделяя последние на низкоплотностные и высокоплотностные. Вместе с тем в природе наблюдается множество промежуточных, переходных, «сложных» типов оползней, совмещающих в своем развитии различные признаки склоновых деформаций.

Особенности и различия в формировании оползней течения, специфика образования зон основных деформаций при развитии такого рода склоновых деформаций (в сравнении с оползнями скольжения, сдвига и др.) определяют отличные от иных подходы и требования по изучению этих типов оползней. Вместе с тем большинство методов изучения оползневых и оползнеопасных участков, приведенных в составе СП 420.1325800.2018, а также в других нормативно-технических документах, ориентировано на оценку развития, в первую очередь, оползней скольжения и сдвига. Помимо этого, необходимо отметить, что в настоящее время практически отсутствуют методы количественных оценок устойчивости, которые бы позволяли проводить анализ возможности развития оползней течения.

Противооползневые мероприятия на участках существующего или потенциального развития оползней течения также имеют определенную специфику. Если противооползневые мероприятия в местах развития оползней скольжения/сдвига ориентированы в первую очередь на повышение удерживающих сил, то на участках развития оползней течения — на снижение обводнения склона и защиту от движущихся вязкопластических масс.

Рассмотренные в настоящей работе особенности и различия в формировании, смещении оползней течения, как самостоятельного класса склоновых деформаций, определяют различия в подходах и требованиях к изучению этих типов оползней, в т. ч. при инженерно-геологических изысканиях. При исследовании участков развития оползней течения требуется получение, как правило, более широкого набора показателей и характеристик, в определенной степени отличающихся от тех, которые необходимы при оценке оползней скольжения и сдвига. Кроме того, при анализе оползней течения важен учет применимости и ограничений тех или иных методов количественной оценки устойчивости склонов, а также предлагаемых к реализации противооползневых мероприятий, направленных на обеспечение безопасности территорий, зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов С.К., Скиргелло О. Б. Оползни глетчерного типа в Среднем Поволжье и борьба с ними. // Советская геология, 1948, № 35, с. 71–82.
2. Бернацкий Л. Н. Деформации земляного полотна и борьба с ними при постройке железных дорог. М.: Тов-во Печатня С. П. Яковлева, 1915, 105 с.
3. Буцько С. С. Классификация оползней. // Ученые записки Московского областного педагогического института. Труды кафедры географического факультета, 1951, Том 17, Вып. 5, с. 144–181.
4. Варнс Д. Д. Движение склонов, типы и процессы. // Оползни: исследование и укрепление / под ред. Р. Шустера, Р. Кризека, / пер. с англ. А. А. Варги, Р. Р. Тизделя, под ред. Г. С. Золотарева. М.: Мир, 1981, с. 32–85.
5. Васин Б. Г. Морфогенетическая классификация подводных оползней (на примере верхнемеловых отложений Дагестана). // Новые данные по нефтяной геологии, гидрогеологии, геотермии и геофизике Центрального и Восточного Кавказа, № 29. Грозный, Изд-во Грозненского нефтяного института, 1968, с. 56–61.
6. Великий Г. Г. Типы оползней Левобережья Среднего Приднепровья. // Материалы Харьковского отделения географического общества Украины, 1968, Вып. 5, с. 135–141.
7. Демин А. М. Оползни в карьерах: анализ и прогноз. М.: ГЕОС, 2009, 79 с.
8. Дранников А. М. Оползни: типы, причины, меры борьбы. Киев, Изд-во Укргипросельстроя, 1956, 102 с.
9. Емельянова Е. П. Морфологическая клас-

сификация оползневых явлений для целей инженерно-геологического картирования. // Вопросы региональной инженерной геологии и методики исследований. М.: Госгеолтехиздат, 1963, № 1, с. 82–100.
10. Зеркаль О. В. Сейсмогенные оползни Гиссарского землетрясения 1989 г., факторы их формирования и развития. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, 1994, № 2, с. 77–85.
11. Зеркаль О. В. Оползни скольжения и оползни сдвига: особенности развития и типизация. // Инженерная геология, 2012, Том XVI, № 1, с. 38–58, https://doi.org/10.25296/1993–5056–2021–16–1–38–58.
12. Зеркаль О.В., Соколов В. Н., 1995. Изменение микроструктуры пылеватых суглинков при формировании сейсмогенных оползней течения. Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, № 6, с. 67–73.
13. Золотарев Г.С., Гулакян К. А., Зеркаль О. В., Осиюк В. А. Механизм формирования сейсмогенных оползней в лессах плато Уртабоз (Таджикистан) и экспериментальное исследование их развития. // Геоэкология, 1994, № 6, с. 80–90.
14. Золотарев Г.С., Калинин Э. В., Шешеня Н. Л. и др. Инженерно-геологическое изучение обвалов и других гравитационных явлений на горных склонах. М.: Изд-во МГУ, 1969, 139 с.
15. Золотарев Г.С., Янич М. Методика инженерно-геологических исследований высоких обвальных и оползневых склонов. М.: Изд-во Московского университета, 1980, 184 с.
16. Иностранцев А. А. Геология. Общий курс. Том 1. Современные геологические явления (динамическая геология), петрография, стратиграфия. СПб.: Типография М. М. Стасюлевича, 1885, 592 с.
17. Клевцов И. А. Оползни Северного Кавказа, их типы, условия образования и меры борьбы с ними. // Оползни и борьба с ними. Тр. Северо-Кавказского научно-производственного семинара по изучению оползней и опыта борьбы с ними. Ставрополь, 1964, с. 85–130.
18. Клименко А.И., Царев В. П., Постоев Г. П. и др. Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям на оползневых склонах Северного Кавказа с целью их хозяйственного освоения. М.: Стройиздат, 1983, 68 с.
19. Кнорре М.Е., Абрамов С. К., Рогозин И. О. Оползни и меры борьбы с ними. М.: Стройиздат, 1951, 171 с.
20. Круковский Г.Л., Хаджаев М. Г. Оползни Узбекистана, их типы, причины образования. // Гидрогеология и инженерная геология аридной зоны СССР. Вып. 12. Материалы Среднеазиатского совещания по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними. Душанбе, 1968, с. 180–186.
21. Кюнтцель В. В. Классифицирование оползней по механизму / /Исследование механизма развития экзогенных геологических процессов и факторов, их обуславливающих. М.: ВСЕГИНГЕО, 1985, с. 39–45.
22. Маслов Н. Н. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве. Л.: Гос. энерг. изд-во, 1955. 467 с.
23. Маслов Н. Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). М.: Стройиздат, 1977, 320 с.
24. Минервина Е. Е. Принципы инженерной классификации оползней. // Известия Тбилисского НИИ сооружений и гидроэнергетики, 1953, Том V, с. 61–76.
25. Мушкетов И. В. Физическая геология. т. II. Денудационные процессы (геологическая деятельность атмосферы и подземной и проточной воды, озер, моря, снега и льда)/3е изд. М.-Л.: Гос. изд-во, 1926, 636 с.
26. Нифантов А. П. Оползни. Теория и практика их изучения. Л.-М.: Главная редакция геолого-разведочной и геодезической литературы, 1935, 204 с.
27. Ниязов Р. А. Оползни в лессовых породах. Ташкент, Фан, 1974. 148 с.
28. Орлов С.С., Тимофеева Т. А. Геодинамические процессы в Молдавии и борьба с ними. Кишинев, Изд-во «Штиинца», 1974, 71 с.
29. Павлов А. П. Оползни Симбирского и Саратовского Поволжья. М.: Университетская тип., 1903, 124 с.
30. Павлов А. П. Оползни около Батраков, на правом берегу р. Волги. М.: Типография товарищества А. И. Мамонтова, 1907
31. Панюков П. Н. Краткий курс инженерной геологии. М.: Углетехиздат, 1956, 156 с.
32. Петров Н. Ф. Оползневые системы. Сложные оползни (аспекты классификации). Кишинев: Штиинца, 1988, 225 с.
33. Петров Н. Ф. Прикладные проблемы таксономии оползней. // Вестник Чувашского университета, 2006, № 2, с. 171–182.
34. Пчелинцев В.Ф., Погребов Н. Ф. Оползневые явления на южном берегу Крыма. Сб. работ Оползневой станции № 3. Л.-М.: Главная редакция геолого-разведочной и геодезической литературы, 1936, 196 с.
35. Рзаева М.К., Тихвинский И. О. О требованиях к изысканиям, проводимым для оценки устой-

чивости оползневых склонов. // Проблемы грунтоведения и инженерной геодинамики. Тр. ПНИИИС, т. VII. М., 1971, с. 210–220
36. Родионов В. Е. Схема классификации оползневых явлений Черноморского побережья Кавказа по морфолого-генетическим признакам. // Разведка недр, 1937, № 22, с. 19–34.
37. Родионов Н.В. К вопросу о классификации оползневых явлений. // Труды Московского геолого-разведочного института, 1939, т. 15, с. 197–205.
38. Саваренский Ф. П. Инженерная геология. М.-Л.: Главная редакция горно-топливной и геолого-разведочной литературы, 1937, 422 с.
39. Славянов В. Н. Инженерно-геологические прогнозы устойчивости откосов. М.: Госстройиздат, 1964, 155 с.
40. Смирнов Ю.П., Булавин И. А. К проблеме классификаций континентальных оползней. // Вопросы географии и геоэкологии. Материалы 44-й научно-методической конференции «Университетская наука — региону», Ставрополь, 1999, с. 18–21.
41. Тихвинский О. И. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. М.: Наука, 1988, 144 с.
42. Тихвинский И. О. Типизация оползней. Примеры проявления оползней разного механизма. // Природные опасности России. Том 3. Экзогенные геологические опасности. М.: КРУК, 2002, с. 265–276.
43. Федоренко В. С. Горные оползни и обвалы, их прогноз. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988, 214 с.
44. Хворова И. В. Фации подводных гравититов // Генезис осадков и фундаментальные проблемы литологии. М.: Наука, 1989, с. 37–58
45. Чистяков А.А., Щербаков Ф. А. Осадконакопление на подводных окраинах материке. Итоги науки и техники. Сер. Общая геология, т. 18. М., ВИНИТИ, 1984, 135 с.
46. Шадунц К. Ш. Оползни-потоки. М.: Недра, 1983, 120 с.
47. Almagia R. Studi geografici sulle frane in Italia. // Memorie della Società Geografica Italiana, 1910, Vol. 14, № 2, pp. 4–433.
48. Antoine P. Les problèmes posés par l'instabilité des versants de grande ampleur — aspects géologiques. // Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1992, № . 45, pp. 9–22, https://doi.org/10.1007/BF02594900.
49. Baltzer A. Über bergstürze in den Alpen. Zürich, Caesar Schmidt, 1875, 50 s.
50. Brunsden D. Mass movement: the research frontier and beyond: a geomorphological approach. // Geomorphology, 1993, Vol. 7, No. 1–3, pp. 85–128, https://doi.org/10.1016/0169–555X(93)90013-R.
51. Carter R.M. A discussion and classification of subaqueous mass-transport with particular application to grain-flow, slurry-flow, and fluxoturbidites. // Earth-Science Reviews, 1975, Vol. 11, № 2, pp. 145–177, https://doi.org/10.1016/0012–8252(75)90098–7.
52. Collin A. Landslides in clays/trans. by W. R. Schriever. Toronto: University of Toronto Press, 1956, 160 p. (оригинальная работа — Collin A. Recherches expérimentales sur les glissements spontanés des terrains argileux, accompagnés de considerations sur quelques principles de la mécanique terrestre. Paris, Carilian-Goeury&Damont, 1846, 168 p.)
53. Coussot P., Meunier M. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. // Earth-Science Reviews, 1996, Vol. 40, № 3–4, pp. 209–227, https://doi.org/10.1016/0012–8252(95)00065–8.
54. Cruden D.M., Varnes D. J. Chapter 3. Landslide types and processes. Landslides: investigation and mitigation. A. K. Turner, R.L.E. Schuster (eds). Transportation Research Board, Special Report № 247. Washington: National Academy Press, 1996, pp. 36–75.
55. Di Crescenzo G., Santo A. Debris slides-rapid earthflows in the carbonate massifs of the Campania region (Southern Italy): morphological and morphometric data for evaluating triggering susceptibility. // Geomorphology, 2005, Vol. 66, № 1–4, pp. 255–276, https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2004.09.015.
56. Dikau R., Brunsden D., Schrott L., Ibsen M.-L. et al. Landslide recognition: identification, movement and causes. Chichester: John Wiley and Sons, 1996, 274 p.
57. Dott R. H. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes. // Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 1963, Vol. 47, № 1, pp. 104–128, https://doi.org/10.1306/BC743973–16BE-11D7–8645000102C1865D.
58. Fell R., Glastonbury J., Hunter G. Rapid landslides: the importance of understanding mechanisms and rupture surface mechanics. // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2007, Vol. 40, № 1, pp. 9–27, https://doi.org/10.1144/1470–9236/06–030.
59. Hampton M.A., Lee H. J., Locat J. Submarine landslides. Reviews in Geophysics, 1996, Vol. 34, № 1, pp. 33–59, https://doi.org/10.1007/978–3–319–57852–1_13.
60. Heim A. Über Bergstürze. Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft, Zürich, 1882, 31 s.

61. Hungr O., Evans S. G., Bovis M. J., Hutchinson J. N. A review of the classification of landslides of the flow type. // Environmental and Engineering Geoscience, 2001, Vol. VII, № 3, pp. 221–238, https://doi.org/10.2113/GSEEGEOSCI.7.3.221.
62. Hungr O., Leroueil S., Picarelli L. The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, 2012, Vol. 11, Issue 2, pp. 167–194, https://doi.org/10.1007/s10346–013–0436-y.
63. Hutchinson J. N. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. // Proceedings of the 5th International Symposium on landslides, Vol. 1, Rotterdam, 1988, pp. 3–35.
64. Lowe D. R. Sediment gravity flows: their classification and some problems of application to natural flows and deposits. // Geology of continental slopes. / L. J. Doyle, O. H. Pilkey (eds). Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 1979, № 27, pp. 75–82, https://doi.org/10.2110/pec.79.27.0075.
65. Masson D.G., Harbitz C. B., Wynn R. B., Pedersen G., Løvholt F. Submarine landslides: processes, triggers and hazard prediction. // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Discussion Meeting Issue "Extreme natural hazards" organized by H. E. Huppert and R.S.J. Sparks, 2006, Vol. 364, Issue 1845, pp. 2009–2039.
66. Mavrouli O., Fotopoulou S., Pitilakis K., Zuccaro G., Corominas J., Santo A., Cacace F., De Gregorio D., Di Crescenzo G., Foerster E., Ulrich T. Vulnerability assessment for reinforced concrete buildings exposed to landslides. // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, *Vol. 73, № 2, pp. 265–289*, https://doi.org/10.1007/s10064–014–0573–0.
67. Mulder T., Alexander J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. // Sedimentology, 2001, Vol. 48, № 2, pp. 269–299, https://doi.org/10.1046/J.1365–3091.2001.00360.X.
68. Nardin T.R., Hein F. J., Gorsline D. S., Edwards B. D. A review of mass movement processes, sediment and acoustic characteristics, and contrasts in slope and base-of-slope systems versus canyon-fan-basin floor systems. // Geology of continental slopes. / L. J. Doyle, O. H. Pilkey (eds). Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 1979, № 27, pp. 61–73, https://doi.org/10.2110/pec.79.27.0061.
69. Pierson T.C., Costa J. E., 1987. Arheologic classification of subaerial sediment-water flows. // Debris flows / avalanches: process, recognition, and mitigation. / J. E. Costa, G. F. Wieczorek (eds). Reviews in Engineering Geology, Vol. VII. Boulder: Publishing house of the Geological Society of America, 1987, pp. 1–12, https://doi.org/10.1130/REG7-P1.
70. Shanmugam S. High-density turbidity currents: are they sandy debris flows? // Journal of Sedimentary Research, 1996, Vol. 66, № 1, pp. 2–10, https://doi.org/10.1306/D426828E-2B26–11D7–8648000102C1865D.
71. Sharpe C.F.S. Landslides and Related Phenomena: A Study of Mass Movements of Soil and Rock. New York: Columbia Univ. Press, 1938, 137 p., https://doi.org/10.2307/1788849.
72. Stiny J. Die Muren. Versuch einer monographie mit besonderer berücksichtigung der verhältnisse in der Tiroler Alpen. Innsbruck: Wagner, 1910, 139 s.
73. Terzaghi K. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer. Leipzig, Grundlage, 1925, 355 s.
74. Varnes D. J. Chapter 2. Slope movement types and processes. // Landslides — analysis and control / R. L. Schuster, R. J. Krizek (eds). Transportation Research Board, Special Report № 176. Washington: Publishing house of the National Academy of Sciences, 1978, pp. 11–33.
75. Welbon A.I.F., Brockbank P. J., Brunsden D., Olsen T. S. Characterizing and producing from reservoirs in landslides: challenges and opportunities. // Structurally complex reservoirs / S. J. Jolley, D. Barr, J. J. Walsh, R. J. Knipe (eds). Special Publications № 292. London: Publishing house of the London Geological Society, 2007, pp. 49–74, https://doi.org/10.1144/SP292.3.
76. Zerkal O. V. Seismic landslides caused by Gissar earthquake in 1989 (Tajikistan). // Moscow University Geology Bulletin, 1994, Vol. 49, Issue 2, pp. 57–63.
77. Zerkal O.V., Sokolov V. N. Changes in the microstructure of silt loams during the formation of seismogenic liquefaction slides. // Moscow University Geology Bulletin, 1995, Vol. 50, Issue 6, pp. 59–64.
78. Zerkal O.V., Strom A. L. Classification of Cryogenic Landslides and Related Phenomena (by Example of the Territory of Russia). // Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk. Proc. 5th World Landslide Forum / Z. Arbanas, P. T. Bobrowsky, K. Konagai, K. Sassa, K. Takara (eds). Springer, 2021, Vol. 6, pp. 377–383, https://doi.org/10.1007/978–3–030–60713–5_37.

https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-1-18-24-30
УДК 624.131.439

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МЕТОДОМ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ
ENERGY APPROACH TO TRIAXIAL TESTING RESULTS INTERPRETATION

А. Ю. Мирный
A. Yu. Mirnyy

Геологический факультет МГУ им. М.В, Ломоносова, Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119234, Российская Федерация
Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119234, Russian Federation

MirnyyAY@mail.ru

Аннотация: В статье рассматривается возможность описания параллельно протекающих процессов в образце грунта на основании затрачиваемой на них энергии. Показано, что проведение испытаний методом трехосного сжатия в различных режимах дренирования и с различными траекториями изменения напряжений позволяют определить энергетические параметры, характеризующие упругое и пластическое деформирование, объемную и сдвиговую жесткость, дилатансию и контракцию, объемную жесткость поровой жидкости. Эти параметры характеризуют физический смысл протекающих процессов в большей степени, чем принятые параметры (модули) механики сплошного тела. Полученный результат может использоваться для разработки моделей нелинейного поведения дисперсных грунтов.

Abstract: The article considers the possibility of describing parallel processes in a soil sample based on the energy expended on them. It is shown that triaxial testing in various drainage modes and with different stress paths cmakes it possible to determine the energy parameters characterizing elastic and plastic strain, volumetric and shear stiffness, dilatancy and contraction, volumetric stiffness of the pore fluid. These parameters characterize the physical meaning of the ongoing processes to a greater extent than the accepted parameters (moduli) of solid mechanics. The obtained result can be used to develop models of nonlinear behavior of dispersed soils.

Ключевые слова: механика грунтов; удельная работа деформации; энергетический подход; пороговая деформация; модель грунта; нелинейное деформирование

Keywords: soil mechanics; specific work of strain; energy approach; threshold deformation; soil model; nonlinear deformation

Введение

Исследование механических свойств дисперсных грунтов в значительной степени осложнено параллельным протеканием различных процессов. В ходе объемного деформирования происходит уплотнение, что, в свою очередь, приводит к образованию дополнительных контактов, изменению условий сопротивления сдвигу. С позиции теории пластичности этот процесс описывается упрочнением — ростом предела текучести по мере развития пластических деформаций.

В то же время при сдвиге наблюдаются явления, обусловленные дискретностью строения — дилатансия и контракция — которые вызывают изменение объема порового пространства. Как следствие, непосредственное определение взаимной зависимости параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) затруднено. Различными исследователями были получены данные зависимости при тех или иных значениях сторонних факторов, например, степени плотности, водонасыщения, режима дренирования и т.д. Комплексный анализ этих данных, фактически, до сих пор не выполнен: большинство закономерностей механики грунтов носит феноменологический характер и не объясняет физической природы протекающих процессов.

Помимо многофакторности исследуемых процессов, фундаментальное описание закономерностей механического поведения дисперсных грунтов осложнено ограниченными возможностями испытательного оборудования. Ни в одной другой области материаловедения или, в более широком

смысле, механики твердого тела, не применяется такого большого количества приборов различных конструкций. Это объясняется практическими трудностями при попытке реализовать в образце однородное НДС, но так как большинство компонентов НДС являются векторными величинами, возникающие отклонения приводят к росту несоответствия между точным аналитическим решением и фактическим экспериментом. В совокупности с изменением структуры образца (а, как следствие, и физико-механических свойств) в ходе опыта это не позволяет однозначно интерпретировать результаты испытаний.

Теоретический анализ

Непосредственным методом описания механического поведения дисперсных грунтов с учетом дискретности их строения являются решения механики зернистых сред [4]. Исходя из характерного размера частиц, может быть построена расчетная схема, позволяющая рассмотреть равновесие отдельных частиц с учетом их взаимного расположения. К сожалению, по мере увеличения количества частиц возрастает и количество уравнений в решении, а введение в схему частиц различного размера или отклонений от идеализированной упаковки приводит к стохастическому решению, результат которого в пределе совпадает с решениями механики сплошного тела.

Наиболее известной обобщающей теорией, связывающей параметры сопротивления сдвигу с физическими характеристиками, является теория критического состояния, в основе которой лежат работы Hvorslev и Roscoe [12]. Данная теория предполагает, что каждому значению среднего напряжения соответствует свое значение коэффициента пористости, который, в свою очередь, определяет величину сопротивления пластическому течению. Несмотря на активное развитие данной теории в зарубежных литературных источниках, в большинстве случаев с ее помощью невозможно описать упрочнение или разупрочнение, а также сдвиговое деформирование.

Чаще всего физические характеристики из задач механики грунтов полностью исключаются, и решение проводится для идеализированного сплошного тела, параметрами которого являются модули — параметры, связывающие между собой напряжения и деформации линейными либо нелинейными законами. Данные параметры определяются на основании лабораторных испытаний и сопоставления экспериментальных значений компонентов НДС. При этом выполнено значительное количество исследований, связывающих величины этих параметров с физическими характеристиками, в частности плотностью, показателями консистенции, гранулометрического состава [2, 5]. Получаемые в данных исследованиях корреляции не позволяют описать причины зависимости, а только определяют ее количественно. Таким образом, можно констатировать, что большинство закономерностей механики грунтов носит феноменологический характер и не объясняет физической природы протекающих процессов

Альтернативным методом интерпретации результатов лабораторных испытаний может служить энергетический метод, широко применяемый в механике деформируемого твердого тела и, в особенности, в теории пластичности [10]. Изменение НДС некоторого тела в точке сопровождается преобразованиями энергии. С одной стороны, внешние силы, действующие на данное тело, совершают работу. С другой стороны, затраченная энергия частично запасается силами упругости, а частично расходуется на преодоление внутреннего трения и необратимые структурные изменения. Принимая во внимание, что в условиях лабораторного эксперимента систему можно рассматривать как замкнутую, энергетический подход может уверенно применяться в качестве дополнительного метода интерпретации результатов.

Пионерами в области применения энергетического метода были специалисты в области теории пластичности металлов. Гипотеза о постоянстве внутренней энергии при пластическом течении позволила сформулировать теорию прочности Mises. Большинство теорий пластического течения (в первую очередь, Прандтля — Рейсснера, Сен-Венана — Мизеса, Хилла) учитывают работу пластической деформации или ее мощность. Например, анализ работы деформаций позволяет описать упрочнение при пластическом течении на основании диаграммы Прандтля.

Применительно к механике грунтов этот подход был впервые адаптирован Drucker & Prager [10], предложившими закон неассоциированного течения и специализированное условие текучести. Также известны работы группы исследователей в области теории критического состояния [12], основные положения которой были получены из энергетических предпосылок. Группой исследователей рассматривался метод определения точки перехода к пластическому течению на основании затраченной работы [9]. В настоящее время энергетический подход применяется при исследовании свойств грунтов при динамическом нагружении, что позволяет оценивать степень поглощения энергии путем сопоставления работы упругой

деформации и энергии, рассеянной за один цикл нагружения (площади петли гистерезиса) [3]. На основании работы деформации предлагается оценивать так называемую «деформационную неустойчивость» — уровни деформаций, при которых происходят структурные изменения в дисперсных грунтах [1, 6]. Также энергетические методы применяются для определения истории нагружения (параметров переуплотнения), среди них наибольшее распространение получили методы Becker [7] и Wang & Frost [14].

Методика исследования

В настоящей работе предлагается методика интерпретации результатов испытаний осесимметричного трехосного сжатия с позиции энергии и работы деформаций. Этот метод испытаний выбран как, с одной стороны, достаточно широко распространенный, а с другой — позволяющий проводить измерения всех компонентов НДС в ходе опыта.

Стабилометрические испытания могут проводиться в различных режимах, определяющих как начальное состояние образца, так и условия дренирования в ходе опыта. Если не рассматривать неконсолидированный режим как узкоспециальный, то в начальный момент опыта фильтрационная консолидация в образце считается завершившейся (избыточное поровое давление отсутствует, плотность скелета постоянна и может быть однозначно определена). В случае полного водонасыщения в недренированном режиме при нагружении объем порового пространства остается постоянным вследствие несжимаемости жидкости. Это означает, что в скелете грунта будут развиваться исключительно деформации сдвига, а приращение среднего напряжения будет вместо объемных деформаций вызывать рост давления в поровой жидкости. Изменение порового давления также будет вызвано дополнительным изменением объема порового пространства при сдвиге — давление будет падать в дилатирующих грунтах и расти в контрактирующих. Следовательно, в ходе недренированных испытаний энергия будет расходоваться на упругие деформации сдвига, пластические деформации сдвига и изменение порового давления.

В дренированном режиме поровое пространство в ходе опыта открыто, следовательно, поровое давление не изменяется, а увеличение среднего напряжения p будет вызывать объемную деформацию. Так обычно происходит при применении стандартной траектории девиаторного раздавливания (СТС), представленной на рис. 1а, где увеличение максимального главного напряжения вызывает также приращение среднего напряжения. Процессы дилатансии и контракции протекают свободно. Энергия расходуется на упругие и пластические сдвиговые и объемные деформации, причем пластическая составляющая объемной деформации складывается из действия среднего напряжения и дилатансии/контракции.

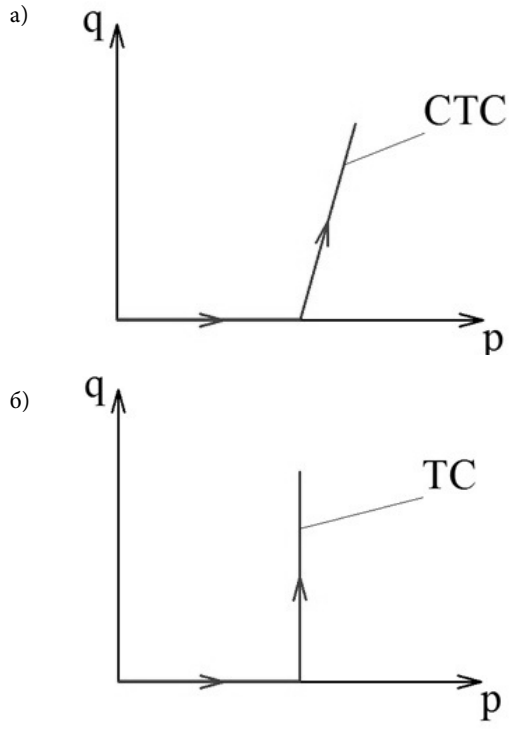


Рис. 1. Траектории девиаторного раздавливания СТС (а) и нагружения с постоянным средним напряжением ТС (б). Обозначения: p — среднее напряжение; q — девиатор напряжений

Реализация траектории нагружения с постоянным средним напряжением (ТС), приведенной на рис. 1б, приводит к тому, что любая объемная деформация в опыте происходит исключительно вследствие дилатансии/контракции. Энергия расходуется на упругие и пластические сдвиговые деформации, а деформации объема исключительно пластические и вызваны дилатансией/контракцией. Таким образом, при наличии серии опытов в различных режимах, с различными траекториями нагружения и при различных средних напряжениях можно разделить параллельно протекающие процессы и сопоставить между собой затрачиваемую на них работу (табл. 1).

Общую работу, совершенную над образцом, можно определить через вертикальное усилие F и перемещение штока Δh (1). Полученное значение следует отнести к объему образца, чтобы перейти к удельной работе деформации.

Таблица 1. Затраты энергии в ходе испытания трехосного сжатия и их проявления в различных режимах

Вид деформации	Консолидированно-недренированный (КН)	Консолидированно-дренированный (КД) Траектория СТС	Консолидированно-дренированный (КД) Траектория ТС
Упругие деформации объема	+	+	-
Пластические деформации объема — уплотнение	-	+	-
Пластические деформации объема — дилатансия/ контракция	-	+	+
Упругие деформации сдвига	+	+	+
Пластические деформации сдвига	+	+	+
Изменение давления в поровой жидкости	+	-	-

$$\Delta W_{tot} = \Delta F \cdot \Delta h \qquad (1)$$

Графически данная работа может быть определена как площадь под графиком зависимости напряжений от деформаций. Эта работа расходуется на деформирование образца, для деформации может быть определено приращение работы на единицу объема образца (удельная работа). Ее величину ΔW можно рассчитать для каждого вида деформации и напряжения по известной формуле (2):

$$\Delta W = \frac{\Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon}{2} \qquad (2)$$

Исходя из предпосылок общей механики твердого тела (упругая деформация прямо пропорциональна напряжению, пластическое течение происходит при постоянном напряжении, при пластическом течении приращение объемной деформации равно нулю) на графике могут быть выделены участки, соответствующие различным фазам опыта. Если в ходе испытания выделить эти участки, то становится возможным определение энергетических параметров, связывающих напряжение и деформацию. Совместный анализ испытаний, выполненных в различных режимах и с различными траекториями нагружения позволяет получить значения энергетических параметров для каждого вида деформации.

Важно также фиксировать уровень деформаций, при которых переходит условный переход от одного режима деформирования к другому, так как данные пороговые значения деформаций используются при последующем моделировании.

Экспериментальные исследования

В качестве экспериментальной базы в настоящей работе рассматриваются результаты испытаний трехосным сжатием модельных грунтов (дресвы кварца фракции 2–5 мм), выполненные в стабилометре с диаметром образцов 300 мм, изготовленном ООО «НПП «Геотек» для НИУ МГСУ. Испытания выполнялись при среднем напряжении 200, 400 и 800 кПа в кинематическом режиме с постоянной скоростью деформации. В результате были получены зависимости вертикальной деформации от девиатора напряжений, а также объемной деформации от вертикальной, с учетом всех необходимых поправок, обусловленных конструкцией прибора. Полученный набор данных позволяет построить любые зависимости для прочих компонентов НДС.

Наиболее просто анализ выполняется для испытаний по траектории ТС. Если выделить последний участок, соответствующий постоянному наклону графика зависимости $W(\gamma)$, то можно считать, что на данном участке развивается исключительно пластическое деформирование (рис. 2). При этом развиваются как деформации сдвига, так и деформации объема за счет дилатансии. Учитывая, что затраты энергии в данном случае вызваны исключительно преодолением трения, то коэффициент уравнений линейной аппрокисимации может рассматриваться как функция внутреннего трения, что подтверждается линейной зависимостью этого коэффициента от давления в камере. Данный коэффициент по смыслу соответствует пластическому коэффициенту λ, связывающему между собой приращение работы пластической деформации и интенсивность касательных напряжений в теории пластического течения (3):

$$d\lambda = \frac{dA_p}{2\tau^2} \qquad (3)$$

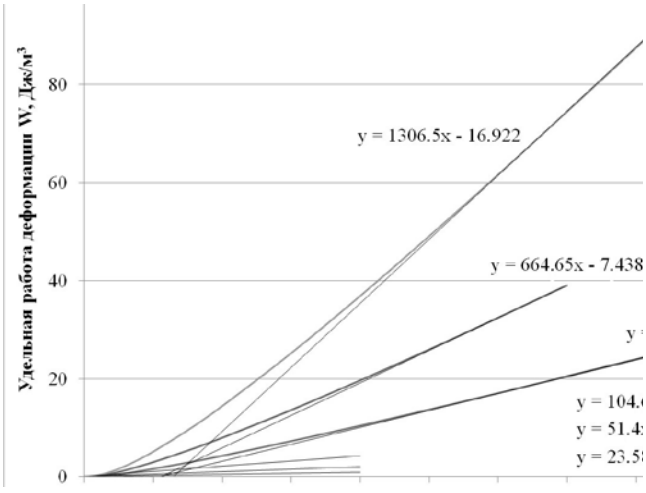


Рис. 2. Зависимости удельной работы деформации от относительной деформации сдвига для испытаний при давлении в камере 200, 400 и 800 кПа с корреляционными уравнениями начальных и конечных линейных участков

Примечательно, что эти линии пересекают ось ординат практически в одной и той же точке, соответствующей деформации сдвига γ = 0.0108–0.0129. Такая деформация сдвига соответствует осевой деформации ε = 0.007, что в абсолютных величинах составляет 4.2 мм — приблизительно средний размер частицы в исследуемых образцах.

Для испытаний, выполненных при различных средних напряжениях, данные коэффициенты получаются различными, так как сопротивление пластическому течению определяется в основном внутренним трением. Если нанести полученные значения dλ на график в зависимости от среднего напряжения, то эти значения хорошо аппроксимируются линейной функцией (4), отражающей зависимость сопротивления пластическому течению от среднего напряжения:

$$d\lambda(p) = 1.6p + 25 \qquad (4)$$

Пороговая деформация сдвига, при которой происходит переход к пластическому течению, составляет γ = 0.03–0.05 для всех испытаний.

Если соотнести полученную скорость изменения работы относительно деформации сдвига и работу, совершенную нагрузочным устройством, то можно выявить расхождение — например, для образца, испытанного при давлении в камере 800 кПа, работа деформаций сдвига составляет 77.1% от общей работы нагрузочного устройства. Оставшиеся 22.9% энергии затрачены на трение в элементах прибора, деформирование упругой оболочки и — в основном — на работу по пластическому деформированию объема. Это наблюдение дает основание рассматривать зависимость объемной деформации от девиатора напряжений и аналогичным образом получить величину энергии, затраченной на пластическое деформирование объема. Учитывая, что испытания проводились в кинематическом режиме, то полученное процентное отношение напрямую позволяет определить угол дилатансии (5):

$$\psi = \arcsin\frac{22.9}{77.1} = 17.3° \qquad (5)$$

С другой стороны, построение аппроксимирующих линий из начала координат позволяет получить энергию, расходуемую на упругое деформирование. Их наклон также пропорционален давлению в камере, при этом аппроксимируются эти точки уже степенной функцией. Это хорошо соотносится со степенным законом зависимости жесткости от напряжения, неоднократно описанным для различных условий [8, 11, 13].

В испытании по траектории девиаторного раздавливания (СТС) эти процессы будут накладываться друг на друга, при этом перестанут быть линейными, так как в ходе опыта среднее напряжение возрастает (а значит идет повышение жесткости и сопротивления сдвигу). Это означает, что и упругое, и пластическое деформирование с ростом напряжений будут требовать большей энергии. Но, учитывая, что испытания проводятся на одном и том же материале, полученные ранее зависимости будут частично справедливы.

Результаты и их обсуждение

На основании анализа результатов испытания трехосного сжатия с постоянным средним напряжением были определены следующие закономерности:

удельная работа упругого сдвигового деформирования (6):

$$W_e^s = 0.0803p^{1.075} \qquad (6)$$

удельная работа пластической деформации сдвига (7):

$$W_p^s = 1.6p + 25 \qquad (7)$$

удельная работа пластической деформации объема (8):

$$W_p^v = 0.297W_p^s \qquad (8)$$

Принимая во внимание, что по точкам окончания участков линейной аппроксимации могут быть определены величины пороговых деформаций, с помощью данных параметров можно воспроизве-

сти форму исходной экспериментальной кривой — смоделировать ее. Метод моделирования достаточно прост — для определенного шага деформаций сдвига (например, 0.1%) рассчитывается величина девиатора напряжений на основании (2). При этом удельная работа деформации вычисляется по (6–8), в зависимости от среднего напряжения. При достижении пороговых значений деформации происходит включение или отключение отдельных слагаемых. Полученные в результате моделирования зависимости представлены на рис. 3.

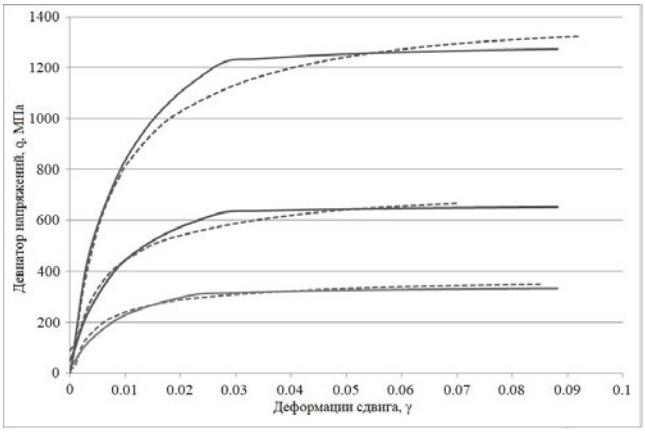


Рис. 3. Результат моделирования экспериментальных кривых. Пунктиром показаны экспериментальные данные, сплошной линией — моделирование

Из результатов моделирования следует, что предложенный подход позволяет с высокой точностью воспроизводить экспериментальные зависимости. Результат моделирования складывается из отдельных достаточно простых математических закономерностей (формулы 6–8), каждая из которых действует в соответствующем диапазоне деформаций: до уровня 0.007 исключительно упругая, далее упругая и пластическая, после 0.03 — пластическая. При этом часть затрачиваемой энергии расходуется на объемную пластическую деформацию.

Необходимо отметить, что в предлагаемой модели отсутствует в классическом виде условие прочности как таковое — при переходе к пластическому течению вся работа, совершаемая установкой, расходуется на деформирование образца без увеличения девиаторного напряжения. Заметно, что происходит незначительное увеличение предела текучести за счет упрочнения вследствие развития дилатансии.

Наибольшее расхождение наблюдается на участке перехода от упруго-пластического деформирования к пластическому течению. Вероятно, это связано с плавным развитием дилатансии в реальном образце, что может быть учтено при более детальной обработке результатов испытаний.

На основании совместного анализа испытаний по двум различным траекториям, возможно раздельно описать все протекающие процессы деформирования. Такой метод обработки после соответствующей верификации может позволить разработать математические модели поведения, которые будут в качестве параметров использовать не различные механические модули, а энергетические параметры, в свою очередь определяемые внутренним трением и прочностью контактов. Для выраженно пластических сред, которыми являются дисперсные грунты, это в большей степени отражает их структурные особенности, чем гипотезы механики сплошной среды.

Заключение

Предложенный в настоящей работе метод интерпретации результатов и моделирования механического поведения обладает рядом преимуществ по отношению к механике сплошного тела.

— теории напряжений и деформаций используются раздельно, связь между ними устанавливается с помощью энергетических параметров, отражающих физический смысл протекающих при деформировании процессов;

— получаемые параметры являются скалярными величинами, и представляются в виде простых функций среднего напряжения;

— пороговые величины деформаций могут быть определены экспериментально и соотнесены с гранулометрическим составом образцов.

— предлагаемый метод анализа результатов испытаний трехосного сжатия может применяться и к другим видам лабораторных испытаний (простой сдвиг, компрессионное сжатие), при условии постоянства НДС в ходе опыта.

Разработку данного метода и его верификацию предполагается выполнить в ходе дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вознесенский Е. А. Пороговые деформации в грунтах // Геотехника. 2018. № 5–6 (10). С. 6–16.
2. Гольдин А. Л., Рассказов Л. Н. Проектирование грунтовых плотин / А. Л. Гольдин, Л. Н. Рассказов, Москва: АСВ, 2001. 375 с.
3. Ишихара К. Поведение грунтов при землетря-

сениях / К. Ишихара, НПО «Георекострукция-Фундаментпроект»-е изд., СПб.:, 2006. 383 с.
4. Кандауров И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве / И. И. Кандауров, Ленинград: Стройиздат, 1966. 320 с.
5. Крыжановский А. Л., Мендоса Т. Д. А., Укибаев Е. Сопротивление сдвигу смеси сыпучих грунтов // Инженерная геология. 1985. № 2.
6. Усов А. Н., Вознесенский Е. А. Деформационная неустойчивость в глинистых грунтах. Возникновение и идентификация // Инженерная геология. 2016. № 2. С. 14–21.
7. Becker D. E. [и др.]. Work as a criterion for determining in- situ and yield stresses in clays // Canadian Geotechnical Journal. 1987. (24). С. 549–564.
8. Benz T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences 2007.
9. Crooks J. H. A., Graham J. Geotechnical properties of the Belfast estuarine deposits // Geotechnique. 1976. № 2 (26). С. 293–315.
10. Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Journal of applied Mathematics. 1952. № 10. С. 157–165.
11. Janbu N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests Wiesbaden:, 1963.С. 19–25.
12. Roscoe K. H., Schofield A. N., Wroth C. P. On the yielding of soils // Geotechnique. 1958. № 8. С. 22–53.
13. Schanz T., Vermeer P. A., Bonnier P. G. The hardening soil model: formulation and verification Rotterdam: Balkema, 1999.С. 1–16.
14. Wang L. B., Frost J. D. Dissipated Strain Energy Method for Determining Preconsolidation Pressure // Canadian Geotechnical Journal. 2004. № 4 (41). С. 760–768.

https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-1-18-31-42
УДК 51.435.2

ХАРАКТЕРИСТИКА СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ БУГУЛЬМИНСКОГО ПЛАТО БУГУЛЬМИНСКО-БЕЛЕБЕЕВСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ
CHARACTERISTICS OF THE SUFFOSION HAZARD OF THE TERRITORY OF THE BUGULMA PLATEAU OF THE BUGULMA-BELEBEY UPLAND

А. И. Латыпов, А. Н. Гараева, О. В. Лунева
A. I. Latypov, A. N. Garaeva, O. V. Luneva

Институт геологии и нефтегазовых технологий КФУ, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5
Kazan Federal University, 420008, Russia, Kazan, Kremliovskayast, 4/5

airatlat@mail.ru, anastya-solnce@mail.ru, olunjova@yandex.ru

Аннотация: Работа посвящена изучению территории, расположенной в юго-восточной части Республики Татарстан (РТ). Несмотря на высокую антропогенную освоенность территории (в данной части РТ расположено несколько крупных городов, разрабатываются несколько крупных нефтяных месторождений, функционируют ряд крупных промышленных заводов), инженерно-геологическая изученность значительно уступает западной и центральной частям РТ. В значительной степени такая картина обусловлена широким распространением в этой части элювиальных грунтов, повсеместно выходящих на дневную поверхность и часто являющихся основанием фундаментов зданий и сооружений. Помимо высокой степени неоднородности физико-механических свойств как по площади, так и по глубине, данные грунты обладают высокой степенью суффозионной неустойчивости. Это создает серьезные проблемы при проектировании оснований зданий и сооружений, сложенных элювиальными грунтами. Дополнительную трудность вызывает то, что техногенное освоение территорий способствует значительной активизации процессов суффозии и может привести к серьезным деформациям оснований фундаментов. Целью выполненных исследований являлось проведение комплексной инженерно-геологической оценки элювиальных грунтов с выделением типов молодых кор выветривания, а также оценка суффозионной опасности территории Бугульминского плато с учетом параметров трещиноватости и суффозионной устойчивости грунтов. Авторы работы представляют результаты типизации, лабораторных исследований основных физико-механических свойств, минерального состава и пространственной закономерности распространения суффозионно-опасных грунтов на территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеевской возвышенности. Выделены литологические разновидности элювиальных грунтов, детально описаны все формы коры выветривания на исследуемой территории. На основании пространственного анализа данных в программной среде ArcMap 10.8 была построена карта геолого-геоморфологических процессов территории Бугульминского плато, классифицированы карстово-суффозионные процессы по геолого-геоморфологическим, гидрогеологическим условиям в соответствии с типами геологической среды. Выполнена оценка суффозионной опасности грунтов исследуемой территории, рассчитаны параметры трещиноватости и суффозионной устойчивости. Установлено, что все разности бесструктурного элювия, развитые в верхней части геологического разреза в пределах изучаемой территории, являются потенциально суффозионно-неустойчивыми. Расчеты суффозионной пораженности показали, что исследуемая площадь по интенсивности провалообразования относится преимущественно к малоопасным, а в речных долинах и террасах крупных рек Ик, Шешма, Степной Зай — к умеренно опасным. Полученные результаты будут полезны как для принятия предварительных проектных решений на незастроенных территориях, так и для прогноза развития неблагоприятных инженерно-геологических процессов на участках существующих зданий и сооружений.

Abstract: This work is devoted to the studies of the territory, located in the south-eastern part of the Republic of Tatarstan. Despite the high anthropogenic development of the territory (several large cities are located in this part of the Republic of Tatarstan, several oil fields are being developed, a number of large industrial plants operate), the engineering and geological study is significantly inferior to the western and central parts of the Republic

of Tatarstan.This is due to the wide spread of eluvial soils in this part of the territory, which everywhere come out on the daytime surface and are the basis of the foundations of buildings and structures. Except the high degree of diversity of physical and mechanical properties, as in area so in depth rates, these soils have a high degree of suffosion instability.This creates serious problems while design of the bases of buildings and structures composed of eluvial soils. Another problem is created by the fact that anthropogenic development of territories contributes to a significant activation of suffosionprocesses, and can lead to serious deformations of the foundations of buildings and structures.The purpose of the performed studies was to conduct a comprehensive engineering and geological assessment of eluvial soils with the identification of types of new weathering crusts, as well as an assessment of the suffusion danger of the Bugulma plateau territory, taking into account the parameters of fracturing and suffosion stability of soils.The authors present the results of the typification of laboratory studies, the main physical and mechanical properties, mineral composition and spatial patterns of the distribution of suffusion dangerous soils on the territory of the Bugulma plateau of the Bugulma-Belebey upland.Lithological varieties of eluvial soils are identified all forms of weathering crust in the studied area are described in detail. Based on spatial analysis in the ArcMap 10.8 software environment, a map of geological and geomorphological processes of the Bugulma plateau territory was constructed, karst-suffusion processes were classified according to geological, geomorphological, hydrogeological conditions in accordance with the types of geological environment.The assessment of the suffosion danger of soils of the studied territory was carried out, the parameters of fracturing and suffosion stability were calculated. It is established that all the differences of structureless eluvium developed in the upper part of the geological cross section within the studied territory are potentially suffosion-unstable.The calculations of suffosion damage have shown that studied area in terms of the intensity of Failure formation belongs mainly to moderately dangerous, and in river valleys and terraces deposit of large rivers like Ik, Sheshma, StepnoyZay — to moderately dangerous. The results will be useful both for making preliminary design decisions on undeveloped territories and for predicting the development of unfavorable engineering and geological processes on the areas of existing buildings and structures.

Ключевые слова: суффозионная неустойчивость, элювий, карбонатный грунт, кора выветривания, трещиноватость грунтов, оценка суффозионной опасности, Бугульминское плато.

Keywords: suffusion instability, eluvium, carbonate soil, weathering crust, fracturing of soils, assessment of the suffusion danger, Bugulma plateau.

Введение

Бугульминское плато находится в северо-западной части Бугульминско-Белебеевской возвышенности и приурочено к южному куполу Татарского свода кристаллического фундамента. В геологическом строении в верхней части разреза территории участвуют отложения казанского и уржумского яруса Биармийского отдела пермской системы, представленные терригенно-карбонатными, в речных долинах — терригенными породами неогеновой системы. На Бугульминском плато расположены такие крупные города, как Альметьевск, Лениногорск, Бугульма и Бавлы.

Территория Бугульминского плато представляет собой плосковершинную денудационную возвышенность. В современном рельефе она выражена разновысотными ступенями, разделенными уступом. Эрозионно-денудационные останцы покрыты отложениями четвертичного возраста представленными элювиальными, элювиально-делювиальными, делювиально-пролювиальными, аллювиально-делювиальными и аллювиальными разностями мощностью до нескольких метров.Плато изрезано долинами рек Шешма, Степной Зай и Ик с многочисленными боковыми притоками. Между эрозионными речными долинами сформированы грядыувалы, являющиеся водосборными бассейнами. Их склоны осложнены обрывами, уступами и террасами, часто проявляются вертикальные борозды и рытвины — следы временных русловых потоков. Все речные долины характеризуются ассиметричным строением, выраженным в неравномерных уклонах и неоднородном террасировании их бортов. Перепад гипсометрических отметок в пределах Бугульминского плато составляет от 280–360 м на вершинах водоразделов до 120–180 м — в пределах речных долин.

Элювиальные грунты на исследуемой территории имеют широкое распространение и встречаются практически повсеместно. При этом, вследствие трудно предсказуемого характера выветривания при их образовании и, следовательно, высокой переменчивости свойств, проектирование сооружений на таких грунтах всегда сопряжено с серьезными проблемами. Основная опасность заключается в возможном проявлении суффозионных процессов, напрямую связанных с наличием элювиальных отложений. Дополнительной

трудностью является сложность отбора образцов в таких грунтах для непосредственных испытаний, что приводит к неоднозначной интерпретации как геологического строения на конкретных участках строительства, так и получаемых в полевых и лабораторных условиях характеристик грунтов.

Несмотря на широкое распространение, изученность карстово-суффозионных процессов на территории Бугульминского плато довольно низкая. К наиболее значительным работам следует отнести исследования А. В. Аникеева, С. А. Чумаченко, а также В. А. Елкина [2,4], которые, несмотря на их глубину, имеют значительный перекос в сторону карстовой опасности, мало уделяя внимание суффозионным процессам. Вместе с тем исследования показывают, что именно суффозионные формы имеют преобладающее распространение практически на всей рассматриваемой территории.

Изучению элювиальных грунтов с точки зрения развития суффозии посвящено немало работ по всему миру. Анализ имеющейся литературы показал, что существующие исследования имеют два вектора направленности. Некоторые исследователи связывают практическую оценки суффозионной опасности с поиском закономерностей параметров выветривания от различных факторов [12], другие — изучают влияние процессов выветривания на развитие неблагоприятных факторов для проектирования и строительства, не оценивая количественно изменения физико-механических свойств самих элювиальных грунтов [17].

Существенным недостатком большинства работ является то, что элювиальные грунты и связанные с ними процессы изучаются на весьма незначительных площадях. Это не дает возможность интерполировать полученные результаты на более обширные территории, что, в свою очередь, не позволяет построить общую картину распространения элювия для регионов, найти закономерности изменения физико-механических характеристик, параметров выветривания, которые имеют важное значения для понимания развития суффозионных процессов. В этом плане выделяются некоторые работы [14,15,18], но приведенная в них информация отрывиста и слабо систематизирована.

Традиционно в литературе описанию элювиальных грунтов посвящены отдельные параграфы и главы учебников [1,3], часто составляющих основу нормативных документов в области оценки карстово-суффозионной и суффозионной опасности, либо материалы различных конференций, посвященных решению той или иной конкретной задачи [5,13,16].

К наиболее свежим в области суффозионной опасности следует отнести работы [9; 10], в которых предпринята попытка выполнить интегральную оценку риска с помощью построения тематических карт. В качестве наиболее значимых выбрано 5 факторов, обуславливающих развитие суффозии: уклон поверхности, абсолютные отметки поверхности, геологическое строение территории, типы фильтрационных разрезов, расстояние до реки. Далее, на основании методики Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники имени Б. Е. Веденеева (ВНИИГ) (Санкт-Петербург, Россия), была выполнена оценка суффозионной опасности 26 разновидностей песчаных и крупнообломочных грунтов.

Таким образом, на сегодняшний день не имеется исследований, направленных на изучение суффозионной опасности территории Бугульминского плато, а существующие методики исследования не отличаются комплексностью и универсальностью.

Методика исследований

Основной целью выполненных исследований являлось проведение литологической и инженерно-геологической оценки элювиальных грунтов с выделением типов молодых кор выветривания, а также оценка карстово-суффозионной опасности территории Бугульминского плато с учетом параметров трещиноватости и суффозионной устойчивости грунтов.

На первом этапе исследований для оценки карстово-суффозионной опасности был выполнен анализ имеющихся картографических материалов территории. К ним относились космоснимки различных лет, аэрофотоснимки, топографические планы. Учитывая размеры исследуемой области, первичный поиск суффозионных форм рельефа производился с использованием программного комплекса SASPlanet, позволяющего достаточно уверенно устанавливать суффозионные деформации диаметром 3 м и более.

На втором этапе исследований проводилось полевое маршрутное обследование изучаемой территории с целью уточнения и сбора новых данных пораженности территории карстово-суффозионными процессами, а также получения информации о геологическом строении территории с помощью описания и фотодокументации стенок карбонатных карьеров, вскрывающих разрезы зоны гипергенеза. При описании вскрытых разрезов выделялись слои пород различной степени преобразования, отмечались особенности их сложения и минерального состава. Попутно проводился отбор образцов пород для определения их физико-механических свойств. В общей сложности исследовали 175 карьеров, расположенных в пределах Бугульминского плато.

Полученные материалы были в дальнейшем обработаны в программной среде ArcMap 10.8. В качестве исходных материалов использовались топографическая основа электронной карты масштаба 1:200000 в проекции Гаусса-Крюгера (координатная система Пулково, 1942 г.), созданная на кафедре геофизики и геоинформационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета, и цифровая модель рельефа с сайта EarthExplorer. Дальнейший пространственный анализ выделения типов местности проводился инструментами SpatialAnalyst, в результате чего были построены карты уклона поверхности, карта геолого-геоморфологических процессов территории Бугульминского плато. Используя известные методики [11], авторами были классифицированы карстово-суффозионные процессы по геолого-геоморфологическим, гидрогеологическим условиям и соотнесены по их интенсивности к типам геологической среды.

В настоящее время в инженерной геологии отсутствует единый методологический подход к количественной оценке суффозионной опасности территорий, что связано как с различиями в объяснениях разных исследователей механизма протекания суффозионного процесса, так и в оценке потенциальных последствий для объектов строительства. За основу нами был принята методика Рагозина А. Л. [8], которая послужила базой существующих нормативных документов в Российской Федерации в сфере оценки пораженности территорий карстово-суффозионными процессами.

Согласно этой методике, плотность воронок определяется по формуле

$$K_N = \frac{N}{S}, \quad (1)$$

где N — количество поверхностных карстовых форм, S — площадь участка.

Пораженность территории провалами

$$K_S = \frac{\Sigma s}{S}, \quad (2)$$

где Σs – суммарная площадь воронок.

Для оценки суффозионности элювиальных грунтов в настоящее время активно используются методики ВНИИГ [6,7]. Их преимущества заключаются в том, что они позволяют рассматривать массив суффозионного грунта и как дисперсную среду, и как трещиноватый скальный массив. В первом случае, суффозионность рассчитывается на основании анализа гранулометрического состава грунта, во втором — на основании параметров трещиноватости.

На территории Бугульминского плато представлены все зоны экзогенного изменения карбонатных пород — от ненарушенного скального массива до карбонатной муки. По этой причине такой двухсторонний подход нами представляется весьма перспективным.

Используя методику ВНИИГ, прежде всего необходимо определить, к какой категории относится заданный состав по характеру суффозионности. Для решения этого вопроса рекомендуются два способа: первый способ характеризует несуффозионность грунта, когда из его толщи при любых скоростях фильтрации не будет происходить выноса самых мелких частиц d_{min} [7]. Второй способ характеризует грунт как практически несуффозионный, из которого допускается незначительный вынос мельчайших его частиц, но без нарушения прочности и устойчивости грунта [7].

Согласно первому способу расчета, частицы грунта, имеющие меньшие размеры, чем диаметр наибольшего фильтрационного хода в грунте, называются суффозионными, так как могут быть вынесены фильтрационным потоком из грунта при скорости фильтрации выше критической [7]. Если окажется, что

$$d_{ci}^{max} = 0{,}77 d_0^{max} > d_{min}, \quad (3)$$

то грунт следует считать суффозионным; из такого грунта могут выноситься все частицы, крупность которых меньше или равна d_{ci}— диаметра суффозионных частиц. Если окажется, что

$$d_{ci}^{max} = 0{,}77 d_0^{max} < d_{min}, \quad (4)$$

то грунт следует считать несуффозионным. Из такого грунта не могут выноситься и самые мелкие его частицы—$d_{3\%}$,$d_{5\%}$[7].

Диаметр максимального фильтрационного хода определяется следующими зависимостями (с учетом сегрегации грунта):

$$d_0^{max} = xC\frac{n}{1-n}d_{17}, \quad (5)$$

где x — коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте, или коэффициент локальности суффозии. Параметр C определяется по формуле:

$$C = 0{,}46\sqrt[6]{C_u}, \quad (6)$$

Коэффициент x зависит главным образом от коэффициента разнозернистости грунта C_u. С некоторым запасом можно принять:

а) для гранулометрического состава грунтов с $C_u \leq 25$

$$x = 1 + 0{,}05C_u, \quad (7)$$

б) для гранулометрического состава грунтов с $C_u > 25$

$$x = 0{,}35(2 + \sqrt{C_u}), \quad (8)$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (9)$$

Для ориентировочной оценки суффозионной опасности грунта используют коэффициент неоднородности грансостава. Если $C_u > 20$, то грунт следует считать суффозионным, при $C_u = 10–20$ — переходным, если $C_u < 10$, грунт относится к несуффозионным.

Второй способ методики ВНИИГ основывается на анализе результатов наблюдений, которые показывают, что в случае выноса из грунта не более 3–5% по массе самых мелких частиц, его прочность и устойчивость изменится незначительно. Следовательно, к практически несуффозионным будет относится такой грунт, из которого могут быть вынесены фильтрационным потоком мельчайшие частицы в количестве, не превышающем 5% по массе. Таким образом, грунт следует считать несуффозионным, если параметры его гранулометрического состава удовлетворяют условию

$$\frac{d_{5\%}}{d_{17\%}} \geq N, \quad (10)$$

$$N = 0{,}10\sqrt[6]{C_u}(2 + \sqrt{C_u})\frac{n}{1-n}, \quad (11)$$

В случае, если зависимость не удовлетворяется, грунт считается суффозионным.

Экспериментальная часть

Анализ распространенности элювиальных толщ показал, что в пределах всей территории Бугульминского плато широко распространены коры выветривания в начальной стадии формирования. Они покрывают практически все выположенные вершины эрозионно-денудационных останцев. На склонах останцев элювиальные отложения не выражены либо отсутствуют за счет постоянного сноса выветрелого обломочного материала. В долинах малых рек элювий захоронен под относительно мощной толщей делювиальных и аллювиальных отложений. Таким образом, определенную проблему составляют элювиальные грунты выположенных вершин эрозионно-денудационных останцев, слагающих верхнюю часть карбонатных массивов, поскольку именно они в большинстве случаев находятся во взаимодействие с инженерными сооружениями.

Анализ геологических разрезов верхней части карбонатных массивов, подвергшихся изменениям под действием экзогенных факторов, позволил установить закономерности преобразования пород под влиянием процессов гипергенеза. В исходном, неизмененном, состоянии известняки и доломиты, слагающие эрозионно-денудационные останцы, представляют собой плотные породы светло-серой окраски с микро-тонкозернистой структурой, массивной или неяснослоистой текстурой из-за наличия глинистых слойков. Карбонатные породы в массивах разбиты системами вертикальных и горизонтальных трещин на крупноблочные отдельности. Протяженные трещинные фильтрационные каналы раскрытостью до 5,0 см обусловили хорошую дренированность верхней части эрозионно-денудационных останцев, исключая образованые здесь застойные водоемы или заболоченные понижения. Таким образом, породы зоны гипергенеза большую часть времени находились в условиях низкой увлажненности, что существенно замедлило интенсивность их выветривания.

В геологических разрезах, где процессы выветривания зашли более глубоко, по поверхностям карбонатных массивов эрозионно-денудационных останцев развиваются молодые коры выветривания площадного типа мощностью до 4,0–6,0 м. В основании кор выветривания лежат плотные, слабо трещиноватые известняки, сложенные микрозернистым кальцитом. Однородный минеральный состав и структура предопределили высокую устойчивость пород к процессам выветривания. За счет этого они в большей части разрезов стенок карьеров являются ложем для покровных элювиальных отложений. На плотных известняках согласно залегают более разуплотненные карбонатные породы, разбитые системами вертикальных и горизонтальных трещин на крупноплитчатые отдельности. Снизу вверх по разрезу последовательно увеличивается количество пересекающихся трещин, возрастает степень их раскрытия, в полостях разрывных нарушений появляется иллювиальный тонкодисперсный карбонатный материал. Соответственно, снизу вверх уменьшаются размеры блоков отдельностей, структура изменяется от параллелепипедной до грубо-, толсто- и среднеплитчатой. Мощность этого слоя составляет от 1,5 до 2,0 м. Особенностью слоя разуплотненных карбонатных пород является хорошая структурированность отдельностей. Все блоки и плитки, разделенные трещинами, сохраняют особенности залегания и структурно-текстурные характеристики исходных известняков и доломитов. Таким образом, на начальной стадии гипергенного преобразования карбонатные породы подвер-

гаются дезинтеграции, что приводит к увеличению их водо- и газопроницаемости.

Над слоем структурного элювия залегают более рыхлые известняки и доломиты, представляющие собой горизонт бесструктурного элювия. Слой бесструктурного элювия сложен разобщенными плиточками карбонатных пород, размеры которых уменьшаются снизу вверх по разрезу молодой коры выветривания. Если в пределах слоя структурного элювия блочные и плитчатые отдельности расположены упорядоченно, то здесь все тонкие плиточки разрушенных известняков и доломитов разориентированы по отношению друг к другу. В отдельных участках горизонта плиточки налегают друг на друга, в других — наклонены под углом 5–20о, в-третьих — волнообразно изгибаются, образуя небольшие по амплитуде экзогенные складочки. Плиточки карбонатных пород разделены относительно широкими вертикальными и горизонтальными трещинами, заполненными тонкодисперсным карбонатным материалом с включениями дресвы. Мощность горизонта составляет от 0,3 до 0,6 м.

Венчает профиль молодой коры выветривания горизонт, сложенный карбонатной мукой с включениями угловатых обломков известняков и доломитов размером до 2,0 см. Карбонатная мука характеризуется рыхлым сложением, светло-серой окраской, преимущественно тонкозернистой структурой и однородной текстурой. В тонкозернистом слабосцементированном материале присутствуют разобщенные угловатые обломки исходных карбонатных пород. Дресва распределена неравномерно, снизу вверх наблюдается тенденция уменьшения количества крупнообломочного материала. В кровле горизонта карбонатная мука обогащается глинистым материалом, придающим элювиальным грунтам светло-бежевую окраску. Глинистый материал поступает из вышерасположенного почвенно-растительного слоя в период таяния снега и ливневых осадков. В отдельных разрезах стенок карьеров верхняя зона бесструктурного элювия имеет более сложное строение. В его пределах наблюдается чередование слоев различной степени преобразования. Слои карбонатной муки могут перемежаться со слоями тонкоплитчатых карбонатных пород сцементированных тонкодисперсным карбонатно-глинистым иллювием. Мощность слоя карбонатной муки варьирует от 0,3 до 0,8 м.

Как видно из строения бесструктурного элювия выветривание карбонатных пород сводиться к физической дезинтеграции. Основным фактором выветривания являются сезонно-климатические перепады температур. Тонкие водные пленочки, заполняющие трещинки разгрузки и межзерновое пространство известняков и доломитов, оказывают расклинивающее действие на породы. С понижением температур поверхностная энергия незамерзающих поровых вод на границах с твердой минеральной фазой возрастает. Создающиеся напряжения разрывают межзерновые структурные связи в породах, способствуя их механическому разрушению. Процессы химического выветривания отходят на второй план.

Таким образом, в хорошо развитых профилях выветривания плоских вершин эрозионно-денудационных останцев явно выделяются две зоны: зона структурного элювия и зона бесструктурного элювия. Своеобразный карбонатный состав материнских пород привел к развитию здесь молодых кор выветривания обломочного типа. Отсутствие относительно мощной развитой зоны химического выветривания связано с постоянным выносом тонкодисперсного материала плоскостными водами атмосферных осадков к подошве останцев, где из них формируются пролювиально-делювиальные шлейфы.

Таким образом, основываясь на выполненных исследованиях, на территории Бугульминского плато можно выделить следующие разновидности элювия (рис. 1, 2):

1) бесструктурный элювий — сложен разобщенными плиточками карбонатных пород, разориентированными по отношению друг к другу, размеры которых уменьшаются снизу вверх по разрезу молодой коры выветривания. Мощность горизонта составляет от 0,3 до 0,6 м.

В бесструктурном элювии можно выделить также слой карбонатной муки, характеризующийся рыхлым сложением, светло-серой окраской, преимущественно тонкозернистой структурой и однородной текстурой. В тонкозернистом слабосцементированном материале присутствуют разобщенные угловатые обломки исходных карбонатных пород. Дресва распределена неравномерно, снизу вверх наблюдается тенденция уменьшения количества крупнообломочного материала. Мощность слоя карбонатной муки варьирует от 0,3 до 0,8 м.

2) структурный элювий — сложен плотными, слабо трещиноватыми известняками с преобладанием в составе микрозернистого кальцита. Снизу вверх по разрезу последовательно увеличивается количество пересекающихся трещин, возрастает степень их раскрытия, в полостях разрывных нарушений появляется тонкодисперсный карбонатный материал. Соответственно, снизу вверх уменьшаются размеры блоков отдельностей, структура изменяется от блочной параллелепипедной до грубо-, толсто- и среднеплитчатой. Мощность слоя варьирует от 0,5 до 2,8 м.

Рис. 1. Обнажение карбонатных пород у п.Райлан в Бугульминском районе Республики Татарстан (контакт зоны бесструктурного и структурного элювия

Рис. 2. Обнажение карбонатных пород у п. Бакалы в Бавлинском районе Республики Татарстан (структурный элювий)

Обе литологические разновидности встречаются на выположенных вершинах эрозионно-денудационных останцев почти всех водосборных бассейнов и приурочены к элювиальным и элювиально-делювиальным отложениям. Часто присутствует неполный профиль молодой коры выветривания с присутствием только небольшого слоя бессруктурного элювия за счет постоянного сноса выветрелого обломочного материала.

Ниже приводятся результаты оценки суффозионной пораженности по геологическим типам среды на изучаемой территории. Основные признаки, по которым проводилась типизация: особенности геолого-геоморфологической обстановки, характеристика гидрогеологических условий, а также современные рельефофор-мирующие процессы. Характеристика выделенных типов геологической среды приводится ниже.

Аккумулятивная пойма. Современные аллювиальные образования слагают поймы и русла всех рек района (абс. отм. 40–70 м). Основными крупными реками являются Ик, Степной Зай, Дымка, Шешма. Общая мощность аллювия крупных рек колеблется от 10 до 25 м, средних и малых от 7 до 16 м. Подстилающие горные породы — отложения неогена (N_2) — пески и глины. Карстово-суффозионные процессы не развиты в данном типе рельефа.

Эрозионно-аккумулятивные террасы рек. Низкие террасы рек (первая и вторая) сложены аллювиальными отложениями. Террасы аккумулятивные, подошва аллювия в долинах крупных и средних рек находится на 5,0–13,0 м ниже меженных урезов рек, а кровля возвышается над ними на 8,0–12,0 м. Мощность аллювия в долинах крупных рек достигает 14,0–22,0 м, малых и средних 9,0–18,0 м. Подстилающие породы — отложения неогена (N_2), частично, а также уфимского (P_{2u}) и казанского ярусов (P_{2kz}). Для этого типа рельефа характерен погребенный карбонатно-сульфатный карст. Количество воронок 370 шт. Распределение провалов на террасах рек неравномерное. Воронки здесь имеют преимущественно конический или провальный профиль (d = 3,0–35,0 м), местами они образуют линейно-вытянутые цепочки. Наибольшие пораженные участки длиной более 35 км, вытянутые вдоль первой и второй надпойменных террас (абс. отметки 70–110 м), наблюдаются в долинах рек Ик, Шешма, Степной Зай. Дно воронок чаще всего заболочено, либо к ним приурочены озера. Самые крупные формы имеют размеры — d=50–120 м. Уклон поверхности составляет 1–3°. Средняя плотность воронок составляет 0,22 шт\км^2. Пораженность территории провалами — 1,3 м^2\км^2. Территория по карстово-суффозионной опасности относиться к умеренно опасной.

Эрозионно-аккумулятивные нижние части склонов. Аллювиально-делювиальными отложениями сложены высокие террасы крупных рек (нерасчлененные третья и четвертая) или же нижние части склонов вдоль террас малых рек (абс. отметки 110–140 м). Подстилающие породы — это частично отложения уфимского яруса (P_{2u}) и преимущественно казанского яруса (P_{2kz}). Поверхность нижней части склонов сложена маломощной толщей аллювиально-делювиальных отложений до 1,5 м. Для этого типа рельефа характерен погребенный карбонатно-сульфатный карст и проявления на отдельных участках процесса суффозии. Количество суффозионных воронок — 137 шт. Распределение провалов на территории неравномерное. Карстовые формы расположены чаще в склоновой части долин рек. Оседания имеют форму блюдец или воронок (d=3,0–15,0 м). Уклон поверхности составляет 3–6°. Плотность воронок — 0,1 шт.\км^2. Пораженность территории провалами — 0,65 м^2\км^2. Территория по карстово-суффозионной опасности относиться к малоопасной.

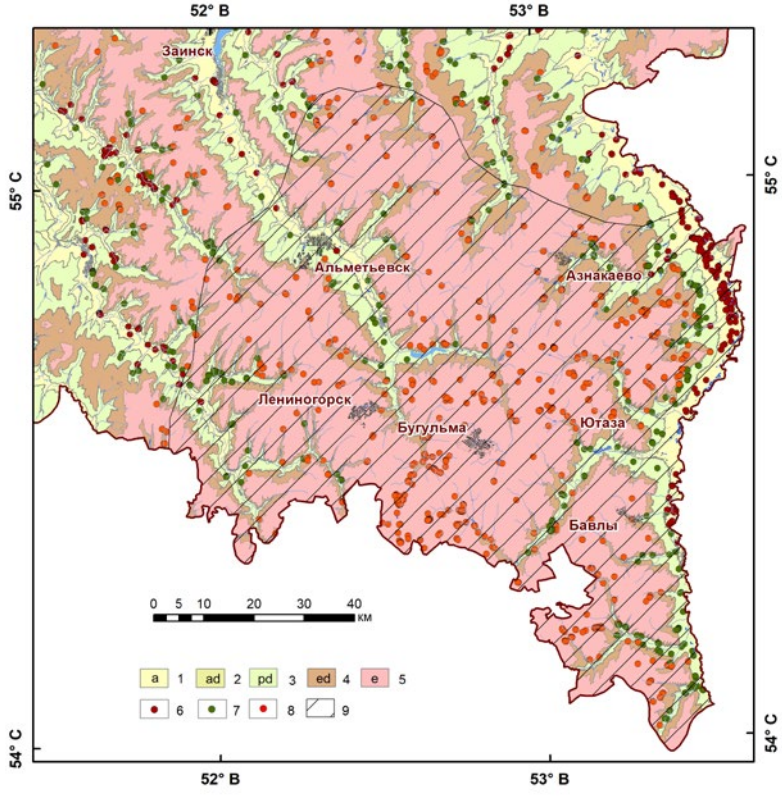
Эрозионные поверхности средней части склонов сложены делювиально-пролювиальными отложениями, располагающимися на длинных пологих склонах долин рек Ик, Дымки, Ютаза, Степной Зай и др. на различных гипсометрических уровнях от 140 до 180 м. Состав и строение делювиально-пролювиальными отложений зависит от строения склона, его крутизны и высоты, но, как правило, это блоки, глыбы и обломки коренных пород, смятые, перемещенные вниз, перемешанные со щебнисто-суглинистым материалом четвертичного возраста. Мощность таких образований чаще всего составляет в среднем 3,0–5,0 м, иногда может увеличиваться до 10–15 м. Вверх по склону мощность их сокращается до 2,0–3,0 м. Подстилающие породы преимущественно казанского яруса (P_{2kz}). Для этого типа рельефа характерны карстово-суффозионные процессы. Количество суффозионных воронок — 124 шт. Распределение провалов на территории неравномерное, воронки преимущественно имеют конусообразную форму (d=0,3–2,0 м). Уклон поверхности составляет 6–10°. Плотность воронок — 0,11 шт.\км^2. Пораженность территории провалами — 0,66 м2\км^2. Территория по карстово-суф-фозионной опасности относится к малоопасной.

Эрозионно-денудационные поверхности приводораздельных частей склонов. Приводораздельные части склонов сложены преимущественно элювиально-делювиальными отложениями. Они слагают верхние части склонов речных долин и склоны водоразделов на различных гипсометри-

ческих уровнях от 180 до 220 м. Состав элювиально-делювиальных образований в значительной мере определяется свойствами подстилающих пород преимущественно казанского яруса (P_{2kz}). Мощность элювиально-делювиальных образований в целом примерно в два раза выше, чем элювиальных и колеблется от 0,7 до 7,0–9,5 м. Для этого типа рельефа характерно развитие суффозионных процессов. Количество суффозионных воронок — 102 шт. Распределение провалов на территории неравномерное. Воронки имеют преимущественно чашеобразную и блюцеобразную форму (d=0,3–5,0 м). Уклон поверхности составляет 10–28°. Плотность воронок — 0,06шт.\км^2. Пораженность территории провалами — 0,65м^2\км^2. Территория по карстово-суффозионной опасности относится к незначительно опасной.

Эрозионно-денудационные поверхности водоразделов. Грунтовые толщи изучаемой территории сложены преимущественно элювиальными отложениями с разной мощностью распространения. Наименьшие мощности, не превышающие обычно первых метров, характерны для элювиальных отложений, развитых на высоких водоразделах (верхнее плато) с абс. отм. 280–370 м. Наибольшая мощность элювиальных отложений наблюдается на территориях низких водоразделов (нижнее плато) с абс. отм. 220–280 м и изменяется от 0,5 до 10,0 м. Подстилающие породы преимущественно казанского яруса (P_{2kz}) и, частично, на высоких водоразделах уржумского яруса (P_{2ur}). В зависимости от состава подстилающих пород выделяются терригенный, карбонатный или терригенно-карбонатный элювий. Для этого типа рельефа характерно активное протекание суффозионных процессов. Количество суффозионных воронок — 418 шт. Распределение провалов на территории неравномерное. Воронки имеют преимущественно чашеобразную и блюдцеобразную форму (d=0,3–10,0 м). Уклон поверхности составляет 0–3°. Плотность воронок — 0,1 шт\км^2. Пораженность территории провалами — 0,58 м^2\км^2. Территория по карстово-суффозионной опасности относится к малоопасной.

На основании вышеизложенного анализа была построена карта распространения геолого-геоморфологических процессов для разных типов рельефа территории Бугульминского плато (рис. 3).



Эрозионно-денудационные, эрозионно-аккумулятивные поверхности и их склоны: 1-аллювиальные отложение поймы и террас рек; 2- аллювиально-делювиальные отложения высоких террас крупных рек (третья и четвертая- нерасчлененные) или же нижние части склонов вдоль террас малых рек; 3- делювиально-пролювиальные отложениями, располагающиеся на средней части склонах долин; 4- элювиально-делювиальные отложения на приводораздельных частях склонов; 5- элювиальные отложения на водоразделах Формы рельефа: 6- участки проявления карста; 7- участки проявления карстово-суффозионного процесса; 8- участки проявления процесса суффозии.

Таким образом, показатели карстово-суффозионной опасности территории связаны как со свойствами подстилающих пород, так и с геоморфологическим строением, которое в свою очередь зависит от расположения долин крупных рек и их притоков, формирующих гидрогеологический режим территории.

Анализ геологических разрезов верхней части карбонатных массивов, подвергшихся изменениям под действием экзогенных факторов, позволил выделить две зоны: структурного и бесструктурного элювия. Различия в сложении и структурных особенностях грунтов этих зон предполагают разные подходы к изучению их физико-механических свойств.

Отложения зоны бесструктурного элювия молодых кор выветривания можно отнести к классу дисперсных несвязных грунтов, а именно, к дресвяно-щебнистым разновидностям крупнообломочных грунтов. На рисунке 1 приведен пример бесструктурного элювия, вскрытого рядом с п. Райлан Бугульминского района Республики Татарстан. Для оценки его суффозионности, как было описано выше, применялась методика, разработанная ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева [6,7]. Результаты исследований сведены в таблицу 1.

Исходя из результатов выполненных лабораторных работ и последующего анализа (105 образцов), становится очевидным, что все разности бесструктурного элювия, развитые в верхней части геологического разреза в пределах изучаемой территории, являются потенциально суффозионно-неустойчивыми.

Зону развития структурного элювия по всем признакам можно отнести к скальным грунтам трещиноватых массивов, суффозионная устойчивость которых определяется степенью их трещиноватости. По этой причине для таких грунтов были сделаны расчеты геометрических параметров экзогенных трещин разгрузки и размеров отдельностей в бортах карьеров, вскрытых обнажений и шурфов. При этом оценка была выполнена отдельно для зон разной степени изменения.

В таблице 2 представлены результаты лабораторных и полевых исследований структурного элювия, распространенного на разных типах рельефа.

Таблица 1. Результаты оценки суффозионной опасности бесструктурного элювия

Морфогенетические группы рельефа	Диаметры частиц, мм				C_u	d_5/d_{17}	N	d_0 max	d_{ci} max
	d_5	d_{10}	d_{17}	d_{60}					
Эрозионные поверхности склонов (30 образцов)	0,11	0,31	0,42	11,32	32,4	0,31	1,26	2,67	2,82
Эрозионно-денудационные поверхности приводораздельных частей склонов (45 образцов)	0,19	0,30	0,48	9,20	30,7	0,40	2,77	3,69	3,84
Эрозионно-денудационные поверхности водоразделов (30 образцов)	0,30	0,53	0,63	16,97	28,2	0,37	1,35	3,09	3,92

Таблица 2. Результаты исследований массивов структурного элювия Бугульминского плато

Морфогенетические группы рельефа	Зона трещиноватости	Размеры блоков	Rc0, МПа	kc	Rсжм	s, см2	S, см2	Ктр, %	Длина трещины (мин-макс), см
Эрозионные поверхности склонов (30 образцов)	Б	35х30	12,1	0,7	8,40	106,00	1050	10,1	0,5÷3,0
	В	35х35	94,0	0,9	84,60	52,50	1225	4,3	0,1-0,8
Эрозионно-денудационные поверхности приводораздельных частей склонов (45 образцов)	Б	35х35	15,2	0,7	10,64	51,25	1225	13,7	0,25÷1,0
	В	35х30	82,0	0,9	73,80	12,90	1050	1,2	0,1÷0,5
Эрозионно-денудационные поверхности водоразделов (30 образцов)	Б	15х25	14,2	0,7	9,94	51,25	375	13,7	0,25÷1,0
	В	35х30	89,0	0,9	80,10	12,90	1050	1,1	0,1÷0,5

Коэффициент трещинной пустотности $К_{тр}$ рассчитывался в соответствии с формулой

$$К_{тр}=\frac{s}{S}100\%, \quad (12)$$

где s — суммарная площадь пустотности на участке, S — площадь всего участка.

Коэффициент структурного ослабления был определен по формуле

$$k_c = R^{м}_{сж}/R^{0}_{сж} \quad (13)$$

где $R^{м}_{сж}$ — прочность на одноосное сжатие выветрелого массива грунта, $R^{0}_{сж}$ — прочность на одноосное сжатие ненарушенной породы.

Таким образом, на изучаемой территории в разрезах карбонатных массивов по мере увеличения интенсивности трещиноватости происходит последовательное ухудшение механических свойств пород. Прочные известняки переходят сначала в группу скальных грунтов средней, а затем — малой прочности.

Результаты и их обсуждения

Выполненные исследования выявили актуальность и сложность рассматриваемой задачи. Анализ имеющейся литературы показал, что территория Бугульминского плато, имеющая высокий уровень техногенного освоения, до сих пор остается практически не изученной с точки зрения суффозионной опасности.

В работе выполнен большой системный анализ, который позволил выделить все встречающиеся литологические разновидности элювия, выполнить его инженерную классификацию по степени выветрелости, в соответствии с общепринятыми методиками. На основании полевого обследования территории были определены зоны поражения суффозионными процессами, что необходимо учитывать при выполнении изысканий и проектировании.

Анализ существующих литературных источников выявил тот факт, что рассматриваемая проблема, хоть и охватывает огромные территории по всему миру, однако не имеет четкого и конкретного алгоритма решения. Главным недостатком большинства исследований является отсутствие комплексного подхода, учитывающего, с одной стороны, литологические особенности элювиальных грунтов, а с другой — выбор корректной методики оценки суффозионной опасности для грунтов различных зон выветривания. Часто исследователи [5,7] пренебрегают изучением суффозионных процессов, акцентируя внимание только на карстовой опасности. Кроме этого, исследования на различных территориях [14,15,18], расположенных на разных континентах, показали, что во главу угла должен быть поставлен региональный фактор как совокупность геологических, климатических, антропогенных и других условий.

Заключение

В рамках выполненного исследования была дана характеристика суффозионной опасности территории Бугульминского плато. Рассматриваемая проблема крайне актуальна как вследствие высокого техногенного освоения территории, так и повсеместного распространения элювиальных грунтов, которые в большинстве случаев являются суффозионно-неустойчивыми.

Полевое обследование показало, что исследуемая территория по интенсивности провалообразования относится преимущественно к малоопасным, а в речных долинах и террасах крупных рек Ик, Шешма, Степной Зай умеренно опасным. Общее количество зафиксированных суффозионных воронок составляет 1151 шт., средний диаметр которых равен 6,5 м, а максимальный — 35,0 м. Из этого следует, что при проектировании зданий и сооружений необходимо учитывать возможное развития суффозионных процессов.

Выполненный анализ показал, что на территории Бугульминского плато встречаются как разновидности структурного, так и бесструктурного элювия.

На основании результатов выполненных расчетов было установлено, что все разности бесструктурного элювия, развитые в верхней части геологического разреза в пределах изучаемой территории, являются потенциально суффозионно-неустойчивыми.

Суффозионная устойчивость структурного элювия в значительной степени зависит от трещиноватости массива.

В связи с вышеизложенным представляется, что результаты описанных в статье исследований будут полезны при выполнении инженерно-геологических изысканий как для общей характеристики и классификации грунтовых массивов, так и при оценке суффозионной неустойчивости территорий.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на изучение других площадей на Бугульминско-Белебеевской возвышенности, с целью построения региональных таблиц физико-механических свойств элювиальных грунтов, инженерно-геологических карт и разработки рекомендаций по строительному освоению территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов В.И., Блудорова Е. А., Фомичева Н. Л., Ясонов П. Г. Казанское Поволжье и Прикамье // Плиоцен и плейстоцен Волго-Уральской области. М.: Наука, 1981, с. 95–118
2. Аникеев А.В., Чумаченко С. А. Карстово-суффозионные провалы Бугульминско-Белебеевской возвышенности // Геоморфология, 2011, № 3, с. 32–41
3. Бондарик Г.К., Пендин В. В., Ярг Л. А. Инженерная геодинамика, М: КДУ, 2007, 440 с.
4. Елкин В. А. Оценка карстовой опасности при инженерных изысканиях: обзор российских нормативных технических документов // Инженерные изыскания, 2018, № 11–12, с. 12–24
5. Зиангиров Р.С., Каширский В. И. Оценка деформационных свойств дисперсных грунтов по данным статического зондирования // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2005, № 1, с. 12–16
6. П 49–90 (ВНИИГ). Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость. Ленинград: ВНИИГ им. В. Е. Веденеева, 1991
7. П56–90 (ВНИИГ). Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. Санкт-Петербург: ВНИИГ им. В. Е. Веденеева, 1992.
8. Рагозин А. Л. Региональная оценка карстовой опасности и риска//Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2003, № 4, с. 33–52
9. Строкова Л.А., Епифанова Е. А. Оценка суффозионной опасности территории пос. Сабетта (полуостров Ямал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021, Т. 332, № 7, с. 95–106
10. Строкова Л.А., Леонова А. В. Оценка суффозионной опасности на территории г. Томска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021, Т. 332, № 5, с. 49–59
11. Хоменко В. П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М: ГЕОС, 2003, 216 с.
12. Derakhshan-Babaei F, Nosrati K, Tihomirov D et al. Ralating the spatial variability of chemical weathering and erosion to geological and topographical zones. Geomorphology, 2020, p.363.
13. Latypov A, Zharkova N, Mouraviev F. Dispersed weathering products of carbonate rock: Features and formation conditions from the construction"s point of view (by the example of Kazan, Russia)// Global View of Engineering Geology and the Environmental. Proceeding of the international symposium and 9th Asian regional conference of IAEG, Beijing, China. — 2013, p. 891–896
14. Mayne P. Stress-strain-strength-flow parameters from enhances in-situ tests// International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories. 2001, p.27–48
15. Meyer N, Kuhwald M, Petersen J et al. Soil development in weathering pits of a granitic dome (Enchanted Rock) in central Texas. Catena, 2021, p.199
16. Startsev A, Kasetsart. Soils on eluvium of Permian carbonate deposits and the change in their chemical properties under the influence of bog formation. Moscow University soil science bulletin (USA), 40(3): p.1–7
17. Xiaolidong M, Cohen J, Martin D et al. Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst Landscape. Chemical Geology, 2019, p.527
18. Yongsheng Cheng. Analysis on mineralization geological conditions of Danchi metallogenetic belt. Guanxi, China. Procedia Environmental sciences 12, 2012, p.978–983

https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-1-18-43-49
УДК 624.139.7

ГРУНТОВЫЕ ТОЛЩИ ХАРАСАВЭЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАК ОБЪЕКТ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ХРАНИЛИЩ БУРОВЫХ ОТХОДОВ
SOIL MASSES OF THE KHARASAVEY FIELD AS AN OBJECT FOR THE CREATION OF UNDERGROUND STORAGE CAVITIES OF DRILLING WASTE

А. С. Мосина
Anna S. Mosina

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 1119991, Россия
Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

mosina.a.s@yandex.ru

Аннотация: В статье приведена типизация грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по показателям состава, строения и состояния многолетнемерзлых грунтов. Использовались показатели состава, строения и состояния, оказывающие наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние многолетнемерзлой грунтовой толщи. На основе типизации выявлены грунтовые толщи благоприятные для строительства и эксплуатации подземных резервуаров для захоронения буровых отходов. Данный подход может быть распространен на другие территории криолитозоны.

Abstract: The article provides the typification of the soil masses of the the Kharasavey field according to the composition, structure and condition of permafrost soils. The characteristics of composition, structure and condition that have the greatest impact on the stress-strain state of permafrost soil mass were used. Based on the typification, the favorable soil masses for the construction and operation of underground storage cavities for disposal of waste drilling were identified. This approach can be extended to other areas of the permafrost zone.

Ключевые слова: грунтовые толщи; многолетнемерзлые породы; подземные резервуары; буровые отходы; льдистость грунта; засоленность грунта; скважинная гидродобыча; подземное хранение.

Keywords: soil masses; permafrost soils; underground storage cavities; drilling waste; ice content of the soil; soil salinity; hydraulic borehole mining; underground storage.

Введение

В результате активного освоения нефтяных и газовых месторождений территории Крайнего Севера образуется большой объем буровых отходов. Их утилизация является актуальной проблемой для недропользователей. Одним из способов ее разрешения является захоронение буровых отходов в подземные резервуары, сооружаемые в многолетнемерзлых песчаных грунтах. Их строительство ведется с поверхности через скважину, по которой в массив мерзлых песчаных грунтов подается теплоноситель. В результате водно-теплового воздействия разрушаются структурные связи в мерзлых грунтах, оттаявший грунт опускается на дно образованной выработки, откуда его с помощью эрлифта поднимают на земную поверхность в гидроотвал (рис. 1). Сформированную выработку используют как подземный резервуар для конечного размещения буровых отходов, которые с течением времени

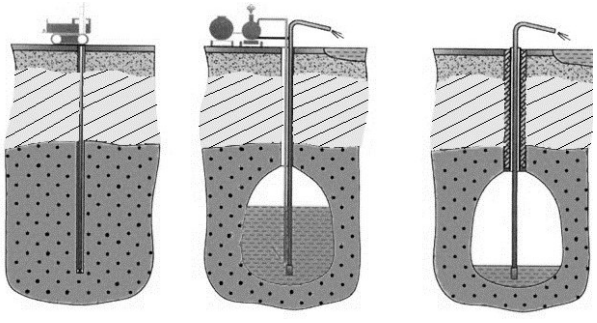


Рис. 1. Строительство подземного резервуара в мерзлой грунтовой толще

промерзают за счет теплового взаимодействиями с многолетнемерзлыми породами (ММП) [1].

Метод строительства и эксплуатации подземных резервуаров в ММП имеет ряд преимуществ. Во-первых, строительство и эксплуатация подобных резервуаров имеет более низкую стоимость по сравнению с другими методами обращения с отходами

(строительство обезвреживающих заводов, гидроразрыв пласта, перевод в состояние геля и др.). Во-вторых, при использовании данной технологии оказывается меньшее техногенное воздействие на окружающую среду (в сравнении с захоронением на поверхности, использованием технологии гидроразрыва пласта и др.) [1].

Однако применимость данной геотехнологии имеет высокую зависимость от инженерно-геологических условий района строительства [4], [5]. Так, например, строительство и эксплуатацию подземных резервуаров не ведут в мерзлых глинистых грунтах, которые плохо поддаются размыву; наличие в мерзлой грунтовой толще высокоминерализованных вод делает невозможным создание в ней подземного резервуара. В результате этих и других ограничений возникает необходимость в поиске благоприятных для реализации данной геотехнологии мерзлых грунтовых толщ.

Принципы типизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения

Поиск благоприятных грунтовых толщ необходимо начинать с выделения их границ. Для понимания принципа их выделения обратимся к понятию грунтовой толщи. Грунтовая толща — это толща горных пород и почв, слагающая верхнюю часть разреза разных геоморфологических элементов и находящаяся сейчас или в будущем в сфере влияния различных инженерных сооружений [7]. Из определения ясно, что границы грунтовой толщи относительны и зависят от типа сооружения и оказываемого им воздействия. Таким образом, для выделения границ грунтовых толщ необходимо оценить влияние от сооружаемых подземных резервуаров для захоронения буровых отходов.

Верхняя граница грунтовой толщи соответствует земной поверхности, так как строительство подземных резервуаров производят с поверхности, которую предварительно отсыпают мощным слоем песка. Нижняя граница грунтовой толщи (или мощность грунтовой толщи) будет зависеть от глубины влияния подземного резервуара ниже его днища. Можно выделить два типа такого влияния: а) изменение напряженно-деформированного состояния толщи в результате формирования незакрепленной выработки; б) тепловое воздействие захораниваемых буровых отходов. Для определения нижней границы грунтовой толщи проведено изучение данных типов влияния путем численных расчетов. По результатам расчетов выявлено, что глубина влияния от сооружения подземных резервуаров в условиях Харасавэйского месторождения составляет около 70 метров, причем больший вклад в ее величину оказывает тепловое влияние от захораниваемых буровых отходов.

Для поиска благоприятных для строительства подземных резервуаров грунтовых толщ проведена их типизация на основании анализа их состава, строения, свойств и состояния по данным 30 скважин, пробуренных на территории всего Харасавэйского месторождения в разные годы (1981–2015 гг.) разными организациями (ВНИИГАЗ, Мингазпром СССР, ООО Научно-техническая фирма «Криос» и др.) [2]. При разработке настоящей типизации грунтовых толщ за основу взят подход, предложенный В. Т. Трофимовым и соавторами при систематике грунтовых толщ Западно-Сибирской плиты [7]. Использовано построение двухрядного, перекрестного типа (таблицы-матрицы).

Для систематизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения были приняты две группы признаков, отражающие состав, строение и современное состояние грунтовых толщ. Использовались такие показатели состава, строения и состояния, которые оказывают наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние многолетнемерзлой грунтовой толщи. Таким образом, в первую группу признаков вошли показатели состава и строения грунтовых толщ, к которым относятся: количество и сочетание классов и типов грунтов, содержание водорастворимых солей в разрезе толщи. Во вторую группу признаков вошли особенности состояния грунтовой толщи, характеризуемые фазовым состоянием воды в грунтах, среднегодовой температурой и степенью льдистости (увлажненности) грунтов толщи.

Типизация грунтовых толщ территории Харасавэйского газоконденсатного месторождения по первой группе признаков

Типизация грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам первой группы выполнена в пять структурных уровней.

На первом и втором структурных уровнях в качестве признаков типизации выступает число и характер классов грунтов, слагающих толщу. Грунтовые толщи изучаемой территории сложены одним классом грунтов и представлены мерзлыми дисперсными грунтами.

На третьем и четвертом структурных уровнях в качестве признаков типизации выступали число слоев и литологический тип пород, слагающих грунтовые толщи. До исследуемой глубины выделены две разновидности пород: песчаные (пески различной крупности) и глинистые (глины, суглинки и супеси). На третьем и четвертом структурных уровнях систематизация производилась

путем оценки процентного соотношения разновидности пород в толще. Так, толща называлась однопородной, если более 96% ее мощности сложено глинистой породой. Двухпородная толща — толща, не менее 96% мощности которой сложено песчаными и глинистыми породами. Дальнейшее подразделение двухпородных грунтовых толщ по процентному содержанию литологических типов пород основано: на детальном анализе литологического строения грунтовых толщ Харасавэйского месторождения; конструктивных особенностях подземных резервуаров; требованиях к геологическому строению используемого под строительство песчаного пласта. Ниже приведены выделенные типы двухпородных грунтовых толщ.

По наличию и мощности песчаного пласта двухпородные грунтовые толщи были подразделены на: преимущественно глинистые (а), глинистые с песчаным слоем (б), песчано-глинистые с песчаным слоем (в), глинисто-песчаные с песчаным слоем (г). Степень благоприятности грунтовой толщи возрастает в ряду а-б-в-г.

Преимущественно глинистые грунтовые толщи (а) не содержат песчаный слой мощностью более 10 м и представлены от 96% до 85% глинистым грунтом. Такая грунтовая толща не является благоприятной для строительства ввиду малой мощности песчаного пласта.

Преимущественно глинистые грунтовые толщи (б) с песчаным слоем содержат слой песка более 10 метров и являются благоприятными для строительства резервуаров, процентное содержание глинистой составляющей здесь составляет от 70% до 85%.

Песчано-глинистые (в) и глинисто-песчаные (г) грунтовые толщи с песчаным слоем содержат песчаный слой значительной мощности и являются весьма благоприятными для сооружения подземных резервуаров. Так, песчано-глинистые грунтовые толщи с песчаным слоем (в) содержат от 70% до 50% глинистой породой, а глинисто-песчаные грунтовые толщи (г) сложены глинистой породой менее чем на 50%.

Далее выделенные выше двухпородные грунтовые толщи с песчаным слоем подразделены с учетом глубины расположения этого слоя. Это необходимо было учесть в типизации, так как сооружение подземных резервуаров должно производится на глубине не менее 15 метров от земной поверхности. Выделены следующие двухпородные грунтовые толщи:

— с песчаным слоем в верхней части (подошва песчаного пласта находится на глубине менее 25 м);

— с песчаным слоем в нижней части (подошва песчаного пласта находится на глубине более 25 м).

Соответственно, при расположении песчаного слоя в верхней части — грунтовая толща является неблагоприятной для сооружения резервуара и, напротив, при расположении в нижней части — благоприятной.

Вышеприведенную типизацию грунтовых толщ по количеству и сочетанию классов и литологических типов пород (по 1–4 структурным уровням) можно представить в виде схемы (рис. 2).

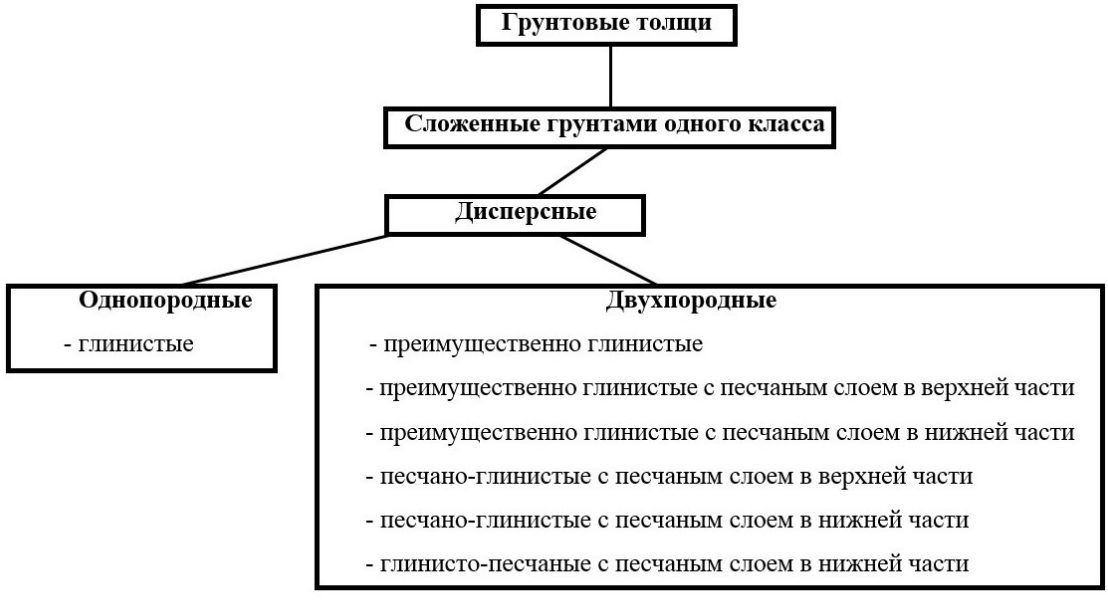


Рис. 2. Схема типизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам первой группы

На пятом структурном уровне в качестве признака типизации выступает содержание водорастворимых солей (засоленность) в составе пород грунтовой толщи. При систематизации использовалась классификация грунтов по степени засоленности, представленная в таблице Б.28 ГОСТ 25100–2020 «Грунты. Классификация». Структуризация толщ произведена путем расчета процентного содержания грунтов с разной засоленностью в грунтовой толще. Таким образом, по степени засоленности выделено три типа грунтовых толщ Харасавэйского месторождения:

- преимущественно сильнозасоленные;
- слабо- и среднезасоленные на сильнозасоленных;
- переслаивание средне- и сильнозасоленных.

Типизация грунтовых толщ территории Харасавэйского газоконденсатного месторождения по второй группе признаков

Подразделение грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам второй группы отражает особенности их состояния, температуры грунтов и степени льдистости (увлажненности). Систематизация грунтовых толщ по признакам второй группы произведена в четыре структурных уровня.

На первом и втором структурных уровнях за классификационные признаки приняты степень однородности состояния и характер состояния грунтов толщи соответственно. Грунтовые толщи изучаемой территории подразделены на толщи с однородным состоянием по разрезу, представленные на всю мощность многолетнемерзлыми породами и с неоднородным состоянием по разрезу, представленные многолетнемерзлыми и талыми грунтами. Последний тип характеризуется присутствием в разрезе толщи сильнозасоленных подземных вод (криопэгов), наличие которых препятствует строительству и эксплуатации подземных резервуаров, поэтому такие толщи являются неблагоприятными.

На третьем и четвертом структурных уровнях признаками типизации выступают температура на глубине грунтовой толщи и степень льдистости (увлажненности) грунтов толщи. По температуре грунтовые толщи подразделены на толщи с температурой ниже минус 5 °С (включительно) и грунтовые толщи с температурой минус 4–5 °С. Грунтовые толщи с многолетнемерзлыми и талыми грунтами включены в одну категорию — с температурой ниже минус 5°С. По степени льдистости (увлажненности) грунтовые толщи систематизированы путем расчета процентного содержания грунтов с разной льдистостью. При этом использовалась классификация грунтов по степени льдистости, представленная в ГОСТ 25100–2020 «Грунты. Классификация», таблицы Б.26, Б.27. При наличии пластового льда грунтовая толща относилась к отдельному типу путем прибавления характеристики "с включением сильнольдистых". Грунтовые толщи с неоднородным состоянием по разрезу многолетнемерзлые и талые относились к одному типу с добавлением слов "с включением сильноувлажненных" (рис. 3).

Рис. 3. Схема типизации грунтовых толщ Харасавэйского месторождения по признакам второй группы

Общая систематика грунтовых толщ Харасавэйского газоконденсатного месторождения

Представленные выше две типизационные схемы соединены в таблицу-матрицу, которая наглядно отражает состав, строение и современное состояние грунтовых толщ Харасавэйского газоконденсатного месторождения (табл. 1). В таблице-матрице для удобства восприятия приняты следующие буквенные обозначения для степени льдистости (увлажненности):

- преимущественно нельдистые — **а**;
- слабо- и льдистые на нельдистых- **б**;
- слабо- и льдистые с включением сильнольдистых на нельдистых — **в**;
- переслаивание слабо- и нельдистых с включением сильноувлажненных- **г**.

При пересечении вертикали и горизонтали таблицы-матрицы образуются таксономические единицы грунтовой толщи разного иерархического уровня, которые обладают признаками первой и второй группы одновременно. Наименьшая из них — тип грунтовой толщи, которая характеризуется определенными литологическим составом, температурой грунтов, степенью засоленности и льдистости (увлажненности). Всего выделено 133 типа грунтовых толщ, из которых на Харасавэйском месторождении действительно встречено 20 типов. Встреченные типы грунтовых толщ отмечены в таблице 1 нумерацией.

Выполненная типизация отражает все многообразие грунтовых толщ Харасавэйского месторождения с их инженерно-геологическими особенностями. Она может быть использована для оценки благоприятности того или иного типа грунтовой толщи для строительства и эксплуатации подземных резервуаров. Исходя из требований к составу, строению и состоянию грунтов для создания хранилищ, грунтовые толщи были подразделены по уровню благоприятности — в таблице 1 неблагоприятные толщи отмечены серым цветом, благоприятные выделены белым цветом.

Грунтовые толщи с неблагоприятными условиями для сооружения подземных резервуаров в ММП обладают следующими характеристиками:

(1) отсутствует песчаный пласт мощностью более 10 метров;

(2) песчаный пласт расположен на глубине менее 15 метров от земной поверхности, что способствует влиянию сезонных колебаний температуры на построенный и эксплуатируемый резервуар;

(3) грунты толщи являются нельдистыми, что способствует фильтрации хранимого продукта в массив породы;

(4) толща имеет неоднородное состояние по разрезу, присутствуют сильноувлажненные грунты [1], [6].

Всего на исследуемой территории Харасавэйского месторождения встречено 13 типов грунтовых толщ с неблагоприятными условиями для строительства и эксплуатации подземных резервуаров (в таблице они отмечены нумерацией в ячейках серого цвета). Пример грунтовой толщи № 7 (см. табл. 1) с неблагоприятными условиями представлен на рис. 4.

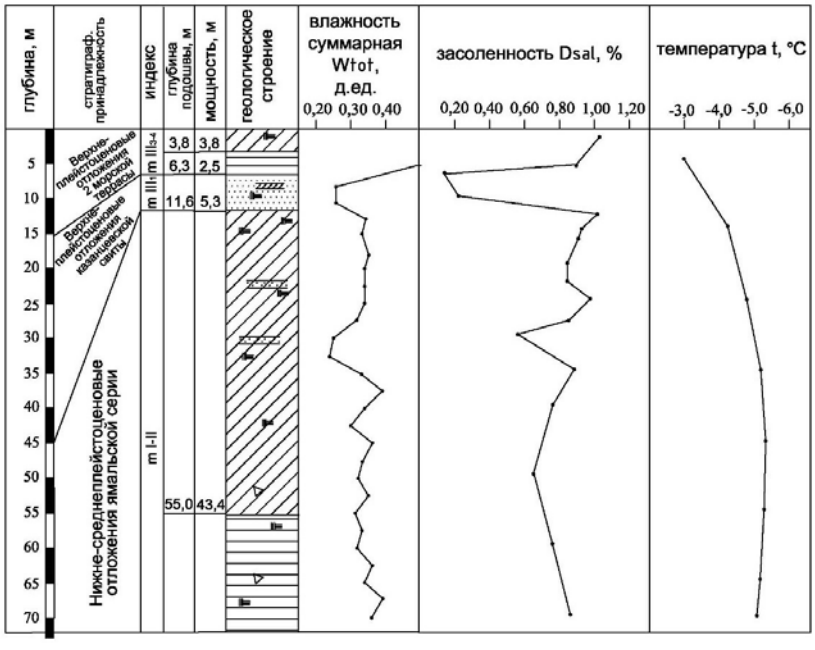


Рис 4. Грунтовая толща № 7 с неблагоприятными условиями под строительство и эксплуатацию подземных резервуаров для захоронения буровых отходов

Таблица 1. Типизация грунтовых толщ по благоприятности строительства и эксплуатации подземных резервуаров для хранения отходов бурения

Грунтовые толщи					с однородным состоянием по разрезу						с неоднородным состоянием по разрезу
					ММП						ММП и талые
					t ≤ — 5 oC			- 5< t < — 4 oC			t ≤ –5 oC
					а	б	в	а	б	в	г
Сложенные грунтами одного класса	Дисперсные	Однопородные	глинистые	сильнозасоленные		1					
				слабо- и среднезасоленные на сильнозасоленных				2			
				переслаивание средне- и сильнозасоленных	3	4					
		Двухпородные	преимущественно глинистые	сильнозасоленные							
				слабо- и среднезасоленные на сильнозасоленных			5		6		
				переслаивание средне- и сильнозасоленных	7	8	9				
			преимущественно глинистые с песчаным слоем в верхней части	сильнозасоленные							10
				слабо- и среднезасоленные на сильнозасоленных	11	12					
				переслаивание средне- и сильнозасоленных							
			преимущественно глинистые с песчаным слоем в нижней части	сильнозасоленные							
				слабо- и среднезасоленные на сильнозасоленных		13	14				
				переслаивание средне- и сильнозасоленных							
			песчано-глинистые с песчаным слоем в верхней части	сильнозасоленные							15
				слабо- и среднезасоленные на сильнозасоленных							
				переслаивание средне- и сильнозасоленных							
			песчано-глинистые с песчаным слоем в нижней части	сильнозасоленные							
				слабо- и среднезасоленные на сильнозасоленных		16	17				
				переслаивание средне- и сильнозасоленных						18	
			глинисто-песчаные с песчаным слоем в нижней части	сильнозасоленные							
				слабо- и среднезасоленные на сильнозасоленных		19					
				сильнозасоленные					20		

Грунтовые толщи являются благоприятными для строительства и эксплуатации подземных резервуаров, если не обладают вышеперечисленными характеристикам: (1), (2), (3) и (4).

Всего выделено 7 типов грунтовых толщ Харасавэйского месторождения с благоприятными условиями для строительства и эксплуатации подземных резервуаров. В таблице 1 типы грунтовых толщ с благоприятными условиями выделены белым цветом и отмечены нумерацией. Пример грунтовой толщи с благоприятными условиями № 16 (см. табл. 1) представлен на рис. 5.

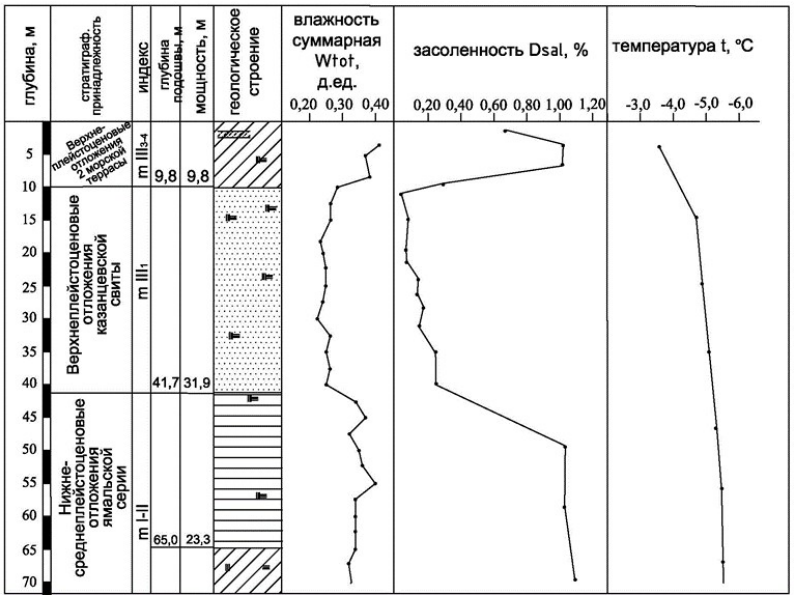


Рис. 5. Грунтовая толща № 16 с благоприятными условиями под строительство и эксплуатацию подземных резервуаров для захоронения буровых отходов

Подразделение типов грунтовых толщ по благоприятности позволяет предварительно оценить возможность сооружения в них подземных резервуаров. Данный подход может быть использован для оценки благоприятности мерзлых грунтовых толщ для строительства и эксплуатации подземных резервуаров на территории других месторождений.

Однако напряженно-деформированное состояние (НДС) разных типов грунтовых толщ с благоприятными условиями будет отличаться. Это логично объясняется различием показателей их физико-механических, в том числе и реологических свойств. Поэтому для более детального прогноза надежного функционирования подземных резервуаров необходимо в дальнейшем провести численное моделирование НДС грунтовых толщ. Это позволит описать поведение выделенных на первом этапе благоприятных грунтовых толщ под воздействием строительства и эксплуатации подземных резервуаров.

Благодарности.
Автор выражает благодарность Трофимову В. Т., Аверкиной Т. И., Баду Ю. Б., Николаевой С. К. за замечания, ценные советы и предложения, предоставленные материалы при подготовки настоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксютин О. Е., Казарян В. А., Ишков А. Г., Хлопцов В. Г., Теплов М. К., Хрулев А. С., Савич О. И., Сурин С. Д. Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетнемерзлых осадочных породах. М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013, 432 с.
2. Баду Ю. Б. Геологическое строение криогенной толщи севера Западной Сибири// Инженерная геология. 2011. N 2, с. 40–55.
3. Мосина А. С., Мирный А. Ю., Скворцов А. А., Сурин С. Д. Методика оценки устойчивости подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. N 3–1, с. 223–237.
4. Мосина А. С., Николаева С. К., Скворцов А. А. Прогноз изменения состояния многолетнемерзлой грунтовой толщи под влиянием строительства и эксплуатации подземных резервуаров для захоронения отходов бурения в условиях Крайнего Севера (на примере среднего Ямала)// Инженерная геология. 2020.Том XV. N 2, с. 68–81
5. Сурин С. Д., Мосина А. С. Методика формообразования подземных резервуаров многолетнемерзлых породах// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. N 3–1, с. 252–267
6. Сурин С. Д. Обоснование тепловых режимов строительства и эксплуатации подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах. Канд. диссер. М., Московский государственный горный университет, 2013
7. Трофимов В. Т, Фирсов Н. Г., Кашперюк П. И., Кудряшов В. Г. Грунтовые толщи Западно-Сибирской плиты. М., МГУ, 1988

https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-1-18-50-57
УДК 551.435.832

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СВОЙСТВ РАСТВОРИМЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ ФОРМ В ОБСТАНОВКАХ РАЗВИТИЯ КАРБОНАТНО-СУЛЬФАТНОГО КАРСТА
VARIABILITY OF THE SOLBLE ROCKS PROPERTIES NEAR SURFACE KARST FORMS IN THE AREA OF CARBONATE-SULPHATE KARST DEVELOPMENT

Е. В. Дробинина
E. V. Drobinina

Научно-исследовательская лаборатория инженерно-экологических исследований геологического факультета ПГНИУ, ул. Букирева, 15, г. Пермь, 614990, Россия
Perm State University, laboratory of engineering and environmental research of the faculty of geology, Bukireva st., 15, Perm, 614990, Russia

alenadrobinina@yandex.ru

Аннотация: Статья посвящена изучению свойств растворимых пород на закарстованной территории в пределах Добрянского района Пермского края. Участок расположен в районе развития карбонатно-сульфатного карста с широким распространением поверхностных карстовых форм. Проведена оценка изменения содержания карбонатов, гипсов и ангидритов в толще скальных грунтов по мере удаления от поверхностных карстовых форм. Также проанализировано изменение коэффициента размягчаемости карбонатов — величины, характеризующей способность грунтов снижать свою прочность после водонасыщения. Определена тенденция в изменении исследуемых параметров в зависимости от удаленности от карстовых форм и сделан вывод о наличии нелинейной функциональной зависимости между исследуемыми параметрами. Предпринята попытка аппроксимировать полученные зависимости с целью получить прогнозные уравнения. С использованием полученных уравнений на растровых моделях, построенных по частным значениям изучаемых параметров, выделены потенциально опасные в карстовом отношении интервалы, которые рекомендуется также оконтурить при зонировании территории, как участки неблагоприятные, а в некоторых случаях и опасные, в отношении карста.

Annotation: The properties of soluble rocks in the karst area within the Dobryanskiy district of Perm Krai are studied. The research area is located in the region of carbonate-sulfate karst development with a wide distribution of surface karst forms. The change in the content of carbonates, gypsum and anhydrite in the soluble rocks depending on the distance from the surface karst forms is evaluated. The change in the carbonate softening coefficient, that is characterized the ability of soils to reduce their strength after water saturation, is analyzed, as well. The tendency of the research parameters changes depending on the distance from the surface karst forms was determined and the conclusion about the presence of non-linear functional dependence between the research parameters was made. The dependences were approximated to get predictive equations. With the use of the equations on the raster models, that were built by interpolation of the special values of the studied parameters, the potentially karst susceptibility intervals are selected. These zones are also recommended to outline during the territory zonation as areas unfavorable with respect to the karst.

Ключевые слова: карстовый массив; содержание карбонатов и сульфатов в грунтах; размягчаемость карбонатов; карстовые воронки; карбонатно-сульфатный карст; оценка карстовой опасности

Keywords: karst massif; the content of carbonates and sulfates in soils; softening of carbonates; surface karst forms; carbonate-sulfate karst; karst susceptibility assessment

Введение

Освоение территорий, в геологическом строении которых принимают участие карбонатно-сульфатные породы, сопряжено с высокими рисками различного плана, избежать которые возможно только посредством проведения адекватной оценки карстовой опасности. Такая оценка должна включать не только анализ пространственного распределения карстовых форм, но и выявлять закономерности функционирования карстового массива как геологической системы, которые в дальнейшем могут быть использованы для построения прогнозных схем.

Системный подход к проблеме комплексного изучения карстового массива подразумевает рассмотрение исследуемого объекта как динамичной системы, предполагая, тем самым, анализ взаимодействия и взаимовлияния его структурных элементов. Системный подход здесь заключается в комплексном исследовании структурных элементов карстового массива на различных иерархических уровнях. Характеристика карстового массива, как любой сложной системы, считается полной, если установлен набор ее элементов с их параметрами, структурой и поведением [5].

Карстующиеся породы — это структурный элемент карстового массива, в пределах которого развивается процесс растворения, сопровождающийся формированием полостного пространства — вторичных пор, каверн, расширенных растворением трещин, полостей. Скорость процесса растворения, и, следовательно, морфометрия подземных карстопроявлений зависят от литологического типа карстующихся пород: если карстовый процесс в карбонатных породах может считаться «неразвивающимся» в масштабах времени, соизмеримого со сроком службы большинства инженерных сооружений [15] вследствие относительно низкой растворимости пород, то в условиях сульфатного карста, при скорости растворения в несколько, иногда и десятки, раз превышающей растворение карбонатов, возможно формирование весьма крупных карстовых полостей.

Различный характер растворения проявляется и в пределах одного литологического типа пород. Например, в карбонатах, в толще известняков, преимущественно в их прикровельной части, возможно формирование относительно крупных полостей и, как следствие, их выход на поверхность в виде провалов и оседаний поверхности; в тоже время в доломитах формируются главным образом зоны повышенной кавернозности и прослои доломитовой муки, которая кольматирует естественные пути фильтрации поверхностных и подземных вод через массив, замедляя или вовсе приостанавливая карстовый процесс. При смешанном строении карстующейся толщи, представленном переслаиванием известняков и доломитов, активность развития карста может быть неоднократно повышена.

В. Н. Катаевым и И. Г. Ермолович в результате анализа данных бурения визейских отложений северного периклинального замыкания Главной Кизеловской антиклинали (Западный Урал) отмечено, что в толще карбонатных пород закарстованные и незакарстованные зоны распределяются по разрезу и латерали, согласно различию в литологическом типе и химическом составе пород. Известняки характеризуются единичными и относительно крупными кавернами и полостями, доломиты — скоплением каверн и пор, причем пористость и кавернозность пространственно тяготеют к тем прослоям, где развиты полости. Авторами отмечено, что карстовые полости крупного размера тяготеют к контактам известняков и доломитов [6].

В обстановках карбонатно-сульфатного карста крупные полости, инициирующие провалообразование, часто формируются на контакте сульфатных и перекрывающих их карбонатных отложений, вследствие восстановления агрессивности воды по отношению к сульфатам по причине снижения в ней концентрации сульфата кальция при растворении карбонатных пород по мере нисходящего движения воды по массиву (так называемое раздоломичивание). Большинство воронок в карстовых районах Пермского края сформировано под влиянием данного фактора [9, 12].

Предположение о том, что толщи, представленные сочетанием слоев сульфатного и карбонатного состава, растворяются лучше, чем толщи, сложенные только сульфатными породами, доказано результатами исследований скорости растворения гипсов и ангидритов, проведенных сотрудниками Кунгурской лаборатории–стационара Горного института УрО РАН и Пермского государственного университета в районе Кунгурской Ледяной пещеры [9].

Отметим, что максимальное развитие форм подземного карста в массиве связано, согласно принципиальной схеме гидродинамической зональности Г. А. Максимовича, с зоной периодического колебания уровня карстовых вод (переходной) [11]. Периоды интенсивного развития карстового процесса совпадают с сезоном высокой гидрогеологической активности, во то время как сухой сезон характеризуется низким уровнем грунтовых вод, медленной скоростью их циркуляции в карстовых системах, от двух до пяти раз меньшей, чем в течение сезона высокой гидрологической активности [17].

Эта особенность формирования полостей в растворимых породах массива подтверждена результатами наблюдений за режимом подземных вод, проведённых ВерхнекамТИСИЗом в 1971–1972 гг. (годовой цикл) на территории г. Кунгура. Исследователями отмечено, что усиление гидродинамической активности фильтрационного потока в послепаводковые периоды преимущественно в пределах зоны колебания уровней подземных вод является основной причиной возникновения карстовых деформаций на поверхности поймы, I и II надпойменных террас [7]. Большое значение имеет скорость изменения уровня воды: чем выше ее значение, тем интенсивнее может быть деформация поверхности земли, связанная с карстово-суффозионными процессами [18].

На основании вышесказанного можно отметить, что исследование литологического и химического состава карстующихся пород является весьма информативным в плане карстологического прогноза.

Краткая характеристика исследуемой территории

В рамках данного исследования предлагается оценить особенности свойств коренных отложений в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста. Изучаемая территория находится в Добрянском районе Пермского края. Участок расположен в 5 км севернее Мыса Стрелка — слияния рек Чусовой и Камы. Рельеф участка — сильно расчлененный долинами рек-притоков р. Камы, что благоприятствует интенсивной инфильтрации атмосферных осадков вглубь массива. Ранее автором при оценке инженерно-геологических условий и изменчивости состояния дисперсных отложений вблизи поверхностных карстовых форм была приведена весьма детальная характеристика природных условий данной территории [3].

Изучаемая территория расположена в пределах северо-восточной части Краснокамско-Полазненского вала северо-восточного простирания общей длиной около 100 км. Исследуемый участок находится на юге Полазненского поднятия — одной из структурных форм вала, характеризующихся наибольшей неотектонической активностью.

В геологическом строении района работ в приповерхностной части принимают участие породы пермской и четвертичной систем. Сводный геологический разрез изучаемого участка показан на рис. 1.

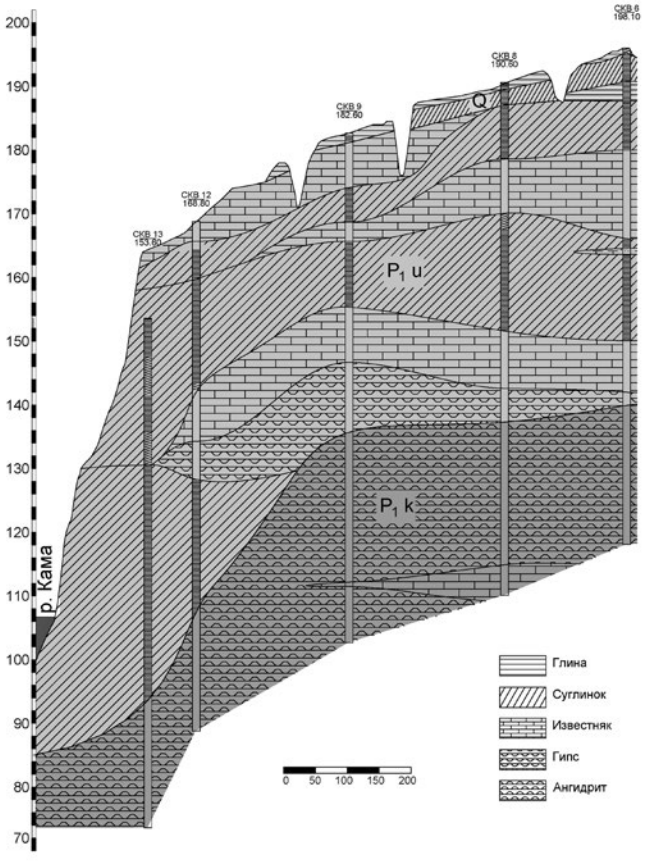


Рис. 1. Сводный геологический разрез изучаемого участка

Четвертичные отложения представлены на высоких склонах элювиально-делювиальным генетическим типом: песчаными глинами, щебнистыми супесями и суглинками с линзами и гнездами песков, иногда гравийных грунтов. Водораздельные пространства с поверхности сложены бурыми и серо-коричневыми макропористыми известковистыми суглинками, супесями, реже глинами, с редкими включениями гальки.

В состав соликамского горизонта уфимского яруса (P_1u) нижней перми входят плитчатые мергели, известняки, доломиты, песчаники, алевролиты и аргиллиты. Встречаются включения и линзы гипса и ангидрита. Иренский горизонт кунгурского яруса (P_1k) нижней перми распространен повсеместно на изыскиваемой территории, на большей части подстилает уфимские отложения. На крутом абразионном склоне р. Камы (Чусовская Стрелка, Чусовской Мыс) встречаются обнажения пород горизонта, который представлен чередованием гипсово-ангидритовых и карбонатных литологических пачек, в составе последних выделяются преимущественно доломиты с прослоями мергелей, аргиллитов и известняков.

В районе работ, исходя из геологических данных, можно выделить водоносные горизонты и комплексы в четвертичных, соликамских и иренских отложениях. На изучаемом участке подзем-

ные воды развиты неравномерно в элювиально-делювиальных отложениях. Водоносный комплекс в соликамских отложениях расположен в трещиноватых известняках, доломитах, мергелях, песчаниках. Водоупором для комплекса служат иренские сульфатные породы или нетрещиноватые разности перечисленных выше пород и глин соликамского горизонта. Водоносный комплекс в иренских отложениях распространен на междуречье рек Камы и Чусовой, сложен чередующимися гипсово-ангидритовыми и известняково-доломитовыми пачками, водоносными только на участках их выхода на поверхность. С погружением под более молодые породы иренские отложения становятся водоупором. Отложения ниже эрозионного вреза в целом безводны и водонепроницаемы, трещины, способные в природных условиях фильтровать воду, отсутствуют.

Участок исследований находится в пределах западной части Полазненского (Полазнинско-Шалашинского) карстового района, характеризующегося развитием карбонатно-сульфатного и сульфатного типов карста в гипсах и перекрывающих их плитчатых трещиноватых известняках и доломитах, степенью трещиноватости и составом которых определяются морфология и плотность карстовых форм на участке. В целом трещиноватость, пористость и кавернозность пород создают единую гидравлическую систему, обеспечивающую движение воды в изучаемом карстовом массиве [8].

Бóльшая часть поверхностных карстопроявлений является древними, их диаметры изменяются от 9 до 20 м при глубине до 6 м. При слиянии нескольких воронок образуются котловины диаметром 100 м и более, вытянутые параллельно логам [1, 2]. Примечательно, что в районах гипсового карста в Пермском крае преобладают провальные воронки, диаметр которых обычно в два раза больший, чем в районах развития карбонатного карста [10].

Большая часть крупных конусообразных и чашеобразных воронок приурочена к склонам речных долин. У бровок склонов расположены наиболее глубокие, иногда сложные, воронки и котловины. Вниз по склону размеры и количество воронок уменьшается. Это явление объясняется тем, что в коренных склонах долин и оврагов увеличивается трещиноватость, главным образом, за счет развития трещин бортового отпора. Кроме того, в верхних частях склонов отмечается небольшая мощность и более грубый состав покровных отложений, что при наличии трещин бортового отпора усиливает фильтрацию воды. На ровной поверхности водораздела, где мощность покровных отложений увеличивается, плотность карстовых форм понижается и изменяется их форма. В условиях равнинного рельефа вынос глинистого материала происходит в замкнутые карстовые понижения, поэтому здесь 85,6% карстовых форм приходятся на карстовые блюдца, озера и болота [1].

Методика проведения оценки

Для описанного участка проводилась оценка изменения содержания карбонатов в сульфатной толще, а также гипсов и ангидритов в толще карбонатных пород по мере удаления от поверхностных карстовых форм. Содержание карбонатов и сульфатов в грунтах было определено путем химического анализа солянокислой вытяжки из грунтов. Удаленность от карстовых воронок рассчитывалась инструментально в программе ArcGIS с применением инструмента Euclidean Distance с целью получения непрерывной растровой поверхности, характеризующей изменение данного параметра в метрах (рис. 2).

Изменчивость значений изучаемых инженерно-геологических свойств оценивалась путем прямого сопоставления посредством построения двухмерных облаков точек. Каждая пара значений, характеризующих положение точки на графике, описывалась координатами: ординатой (Y) — значением изучаемого параметра в точке опробования (содержание компонента, коэффициент размягчаемости); и абсциссой (X) — значением удаленности карстовых воронок, извлеченным с растровой поверхности в этой же точке.

Все используемые числовые значения переменных были приведены к единой шкале для совместного аналитического и графического анализа посредством нормализации по данной формуле:

$$x_{ind} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

где x_{ind} — нормированное значение параметра, диапазон изменения которого 0–1 (индексная оценка), x_i – реальное значение параметра, x_{min} — минимальное значение параметра в выборке, x_{max} — максимальное значение параметра в выборке.

Диапазоны реальных значений исследуемых параметров: содержание карбонатов 0–30% (в гипсовой толще), 0–50% (в ангидритовой толще), сульфатов 0–50% (в известняковой толще). Максимальное расстояния от исследуемой пробы до карстовой формы — 215 м.

Рис. 2. Карта удаленности от карстовых воронок

Результаты и обсуждения

В результате прямого сопоставления значений были получены графики, отражающие характер изменчивости содержания карбонатов и сульфатов по мере удаления от поверхностных проявлений карста по прямой в горизонтальном направлении. Так, на участках развития карстовых воронок и близких к ним отмечалось повышенное содержание сульфатов в известняках; содержание карбонатов в сульфатах, наоборот, сокращалось [4].

Также в рамках исследования скальных грунтов на участке было проанализировано изменение по мере удаления от поверхностных проявлений карста коэффициента размягчаемости — величины, характеризующей способность скальных и полускальных грунтов снижать свою прочность после водонасыщения. Для карбонатных пород отмечался рост этого коэффициента по мере удаления от карстовых форм [4]. Иными словами, прочность растворимых пород в непосредственной близости к карстовым формам при водонасыщении снижается относительно меньше таковой здесь же в естественных условиях. Это, скорее всего, объясняется тем, что в непосредственной близости к карстовым формам грунты в естественном залегании уже характеризуются относительно повышенным водонасыщением вследствие хорошей инфильтрации пресных вод через дно карстовых воронок. Так, над выветрелыми зонами в карстующихся породах за счет развития трещин и, как следствие, хорошей проницаемости массива, влага в верхних горизонтах не задерживается, а просачивается вглубь массива [16]. Кроме того, так как разгрузка подземных вод в трещинно-карстовый горизонт на изучаемой территории контролируется карстовыми воронками, то в местах их скоплений и близких к ним выше интенсивность инфильтрации и, следовательно, постгенетических изменений в грунтах в области движения подземных вод.

Очевиден факт малой информативности графиков двухмерных облаков точек [4] при использовании их для прогнозирования; они лишь позволили оценить тенденцию в изменении исследуемых параметров в зависимости от удаленности от карстовых форм и сделать вывод о наличии нелинейной функциональной зависимости между исследуемыми параметрами. Однако, несмотря на видимую хаотичность изменяемости изучаемых показателей, в своем распределении значений на каждом интервале удаленности от карстовых воронок они подчиняются определенной закономерности, которая в большинстве случаев отвечает закону нормального распределения. Получить информацию об имеющемся тренде позволила операция осреднения значений исследуемых параметров карстовых форм в равных интервалах значений удаленности.

В рамках данной работы была предпринята попытка аппроксимировать полученные зависимости, чтобы найти уравнение, описывающее аппроксимирующую кривую (искомое прогнозное уравнение). Выбор прогнозной кривой осуществлялся аналитическим методом в результате вычленения из общего облака точек как можно большего количества тех из них, которые находятся в максимальной

близости к выявленному тренду с последующим определением функциональной зависимости и величины достоверности аппроксимации — R^2 (рис. 3).

Данная процедура производилась с использованием Microsoft Office Excel и средств VBA for Excel, позволяющих в автоматизированном режиме с учетом указанного тренда и характера зависимости вычленить необходимые точки и выстроить наиболее оптимальную прогнозную кривую. Основные условия, заложенные в алгоритм, заключались в необходимости построения прогнозной кривой не менее, чем по 35–40% данных от первоначальной исследуемой совокупности и уровне корреляции рассматриваемых величин, превышающем 0,7.

Согласно СП 11–105–97, ч. II (п. 5.2.11) и «Руководству по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста» [14], вокруг существующих карстопроявлений следует выделять и обособлять в ходе зонирования по степени удаленности:

- зону условно благоприятную для строительства (удаленность от карстопроявлений более 50 м);
- зону неблагоприятную для строительства (удаленность от воронок от 20 до 50 м);
- зону опасную для строительства (удаленность от воронок менее 20 м.

На основании полученных закономерностей предлагается расширить границы неблагоприятной и опасной зон. Так, в отношении содержания карбонатов в сульфатах, согласно намеченной зависимости на расстоянии около 200 м (0,9 ind, рис. 3), наблюдается относительно резкое увеличение содержания карбонатов (15% и более). В отношении содержания сульфатов, наоборот, на расстоянии 20 м наблюдается относительно резкое его сокращение (до 14%). Однако, принимая во внимание тот факт, что загипсованность массива увеличивает скорость растворения карстующихся отложений, предлагается участки с загипсованными карбо-

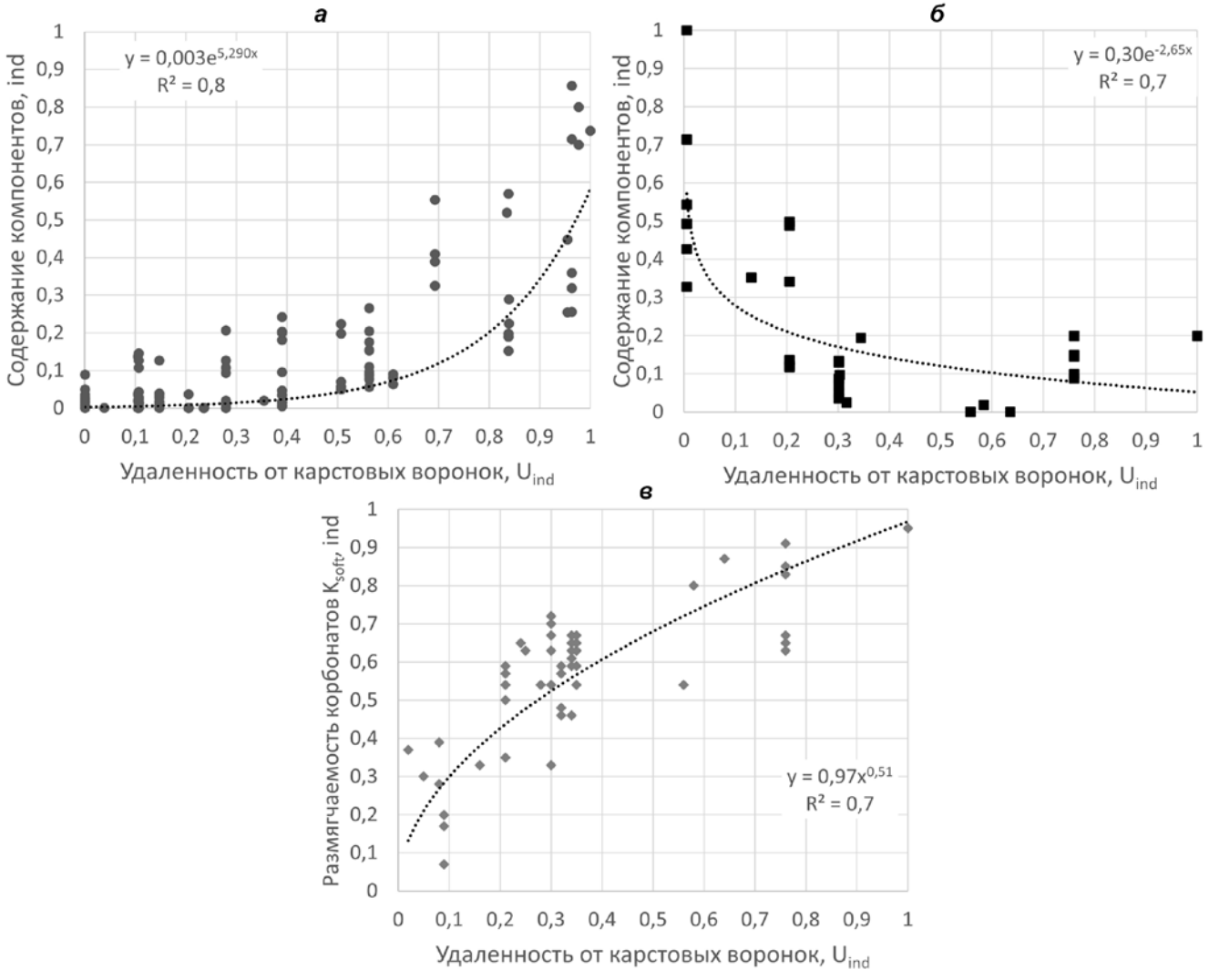


Рис. 3. Графическое представление исследуемых закономерностей изменения значений: а – содержания карбонатов в сульфатах, б – содержания сульфатов в карбонатах, в – коэффициента размягчаемости карбонатов, в зависимости от удаленности от карстовых воронок

натами (до 14%) также включить в потенциально опасную зону. Еще А. И. Печеркиным и В. Е. Закопителовым отмечалось, что примесь более растворимых соединений значительно повышает растворимость породы и наоборот [13]. Размягчаемость карбонатов увеличивается плавно и на расстоянии до 20 м не превышает 0,79.

По частным значениям определений изучаемых параметров методом интерполяции строились растровые модели и с использованием выявленных функциональных зависимостей выделялись потенциально опасные в карстовом отношении интервалы (рис. 4), которые рекомендуется также окон-турить при зонировании территории как участки неблагоприятные, а в некоторых случаях и опасные в отношении карста.

Выводы

1. В пределах изучаемой территории участки, характеризующиеся широким развитием поверхностных проявлений карстового процесса, характеризуются повышенным содержанием сульфатов в карбонатных породах.

2. Снижение прочностных свойств растворимых пород при водонасыщении заметнее проявляется по мере удаления от карстовых воронок.

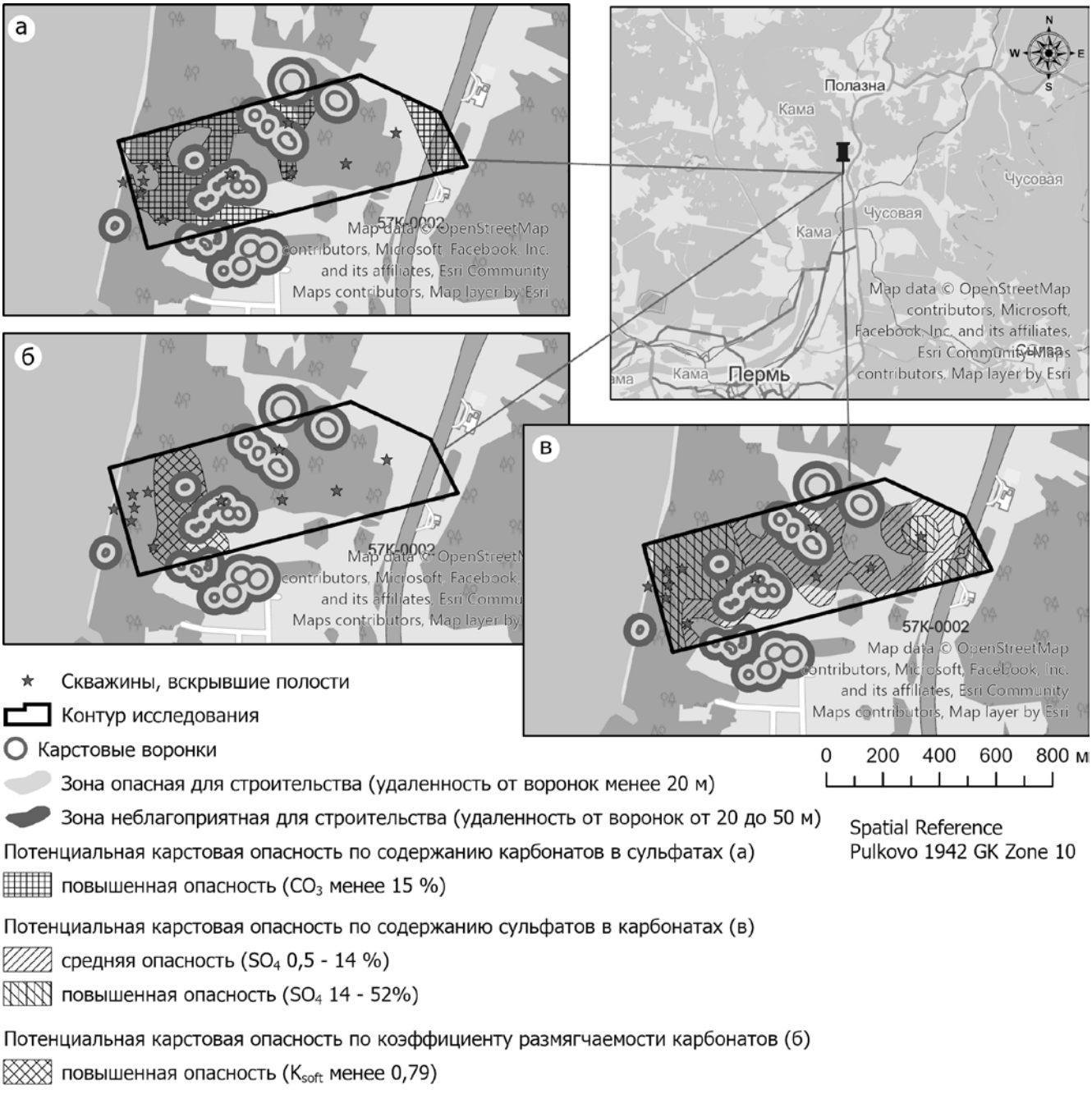


Рис. 4. Прогнозные картографические схемы карстовой опасности, построенные с использованием выявленных зависимостей

3. Поиск закономерностей в изменении свойств различных элементов карстового массива, в частности растворимых грунтов, согласно идее системного подхода в изучении карстовых массивов, может оказаться весьма эффективным при проведении оценки карстовой опасности.

4. Использование выявленных зависимостей между исследуемыми параметрами карстующихся пород и удаленностью от карстовых форм при зонировании территории позволяет выделять потенциально опасные в карстовом отношении участки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутырина К. Г. Гипсовый карст центральной части Пермской области. Дисс. канд. географ. наук / Перм. ун-т. Пермь, 1968. 380 с.
2. Горбунова К. А., Андрейчук В. Н., Костарев В. П., Максимович Н. Г. Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Перм. гос. ун-т, 1992. 200 с.
3. Дробинина Е. В., Золотарев Д. Р. Анализ инженерно-геологических условий и изменчивости состояния дисперсных отложений вблизи поверхностных карстовых форм в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста// Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. № 2. 2022. С. 48–62.
4. Дробинина Е. В. Особенности свойств коренных отложений в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Выпуск 23. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (31 марта –1 апреля 2022 г.). Москва: изд-во «ГеоИнфо», 2022. С. 169–181.
5. Катаев В. Н. Основы структурного карстоведения. Пермь, 2004. 143 с.
6. Катаев В. Н., Ермолович И. Г. Структурно-текстурные ассоциации, трещиноватость и закарстованность карбонатных пород // материалы VI Всероссийского литологического совещания «Концептуальные проблемы литологических исследований в России». Т. 1. Казань, 2011, С. 367–371.
7. Катаев В. Н., Кадебская О. И. Геология и карст города Кунгура. Пермь: Перм. гос. ун-т; ГИ УрО РАН, 2010. 236 с.
8. Килин Ю. А., Минькевич И. И. Карст Чусовского Мыса Камского водохранилища // Инновационный потенциал естественных наук. Том II. Экология и рациональное природопользование. Управление инновационной деятельностью. Пермь, 2006. С. 91–94.
9. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / Под. ред.д.г.-м.н. В. Н. Дублянского. Екатеринбург, 2005. 376 с.
10. Максимович Г. А. Карст гипсов и ангидритов земного шара (Геотектоническая приуроченность, распространение и основные особенности) // Общие вопросы карстоведения. М., 1962. С. 108–113.
11. Максимович Г. А. Основы карстоведения. Т. 1: Вопросы морфологии карста, спелеологи и гидрогеологии карста. Пермь: Пермское книжное издательство, 1963. 447 с.
12. Печеркин А. И. Геодинамика сульфатного карста. Иркутск, 1986.172 с.
13. Печеркин А. И., Закоптелов В. Е. Карст и суффозия на берегах водохранилищ. Пермь: Перм. ун-т, 1982. 88 с.
14. Саваренский И. А., Миронов Н. А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: ПНИИС, 1995. 167 с.
15. Толмачев В. В., Ройтер Ф. Инженерное карстоведение. М.: Недра, 1990. 151 с.
16. Chen, X., Zhang, Z., Chen, X. et al. The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China. Environ Earth Sci 59, 811–820 (2009). https://doi.org/10.1007/s12665–009–0077–6
17. Milanović P. Water resources engineering in karst. Boca Raton, Florida, USA, 2005. 328 p.
18. Xiao X., Xu M., Ding Q. et al. Experimental study investigating deformation behavior in land overlying a karst cave caused by groundwater level changes // Environ. EarthSci. 2018. 77(3). https://doi.org/10.1007/s12665–017–7102-y.

https://doi.org/10.53278/2306-9139-2022-1-18-58-63

XXIII СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОГО ГРУНТОВЕДЕНИЯ»

(ХРОНИКА)

О. Н. Еремина, Е. А. Вознесенский, Л. П. Норова

Ежегодная научная конференция «Сергеевские чтения», согласно Постановлению бюро ОГГГГН РАН № 13100/5–49 от 18 марта 1998 г. «Об увековечении памяти академика Е. М. Сергеева», организуется как расширенная годичная сессия Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии и обычно проводится в третьей декаде марта. Дата проведения чтений приурочена ко дню рождения выдающегося советского и российского ученого, инженер-геолога и грунтоведа, педагога и организатора науки, академика Евгения Михайловича Сергеева (1914–1997) — 23 марта, совпавшего с днем его кончины.

За все прошедшие годы периодичность этих конференций была нарушена в 2021 году, что связано эпидемиологическими ограничениями. После двухлетнего перерыва в 2022 г. двадцать третьи Сергеевские чтения на тему «Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения» состоялись 31 марта — 1 апреля в г. Санкт-Петербурге. Организаторами конференции традиционно выступили Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН и Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, а принимающей стороной в этом году стало Охотинское общество грунтоведов при финансовой поддержке компании «Георекострукция» (г. Санкт-Петербург) и ООО «Геоинжсервис» (группа компаний FUGRO). Оргкомитет конференции возглавили академик В. И. Осипов, член-корр. В. Г. Румынин, проф. Е. А. Вознесенский. Площадкой проведения мероприятия стал конференц-зал отеля «Азимут — Санкт-Петербург».

Возобновленные после пандемии чтения, посвященные вопросам грунтоведения, решено было провести в формате выездной сессии. Город Санкт-Петербург, известный своей мощной научной грунтоведческой школой, успешно развивающейся, как в СПбГУ, так и в Санкт-Петербургском горном университете, стал наилучшим выбором для места проведения чтений. Большую помощь в проведении мероприятия оказали наши коллеги из Санкт-Петербурга — члены Охотинского общества грунтоведов — Ю. Ю. Соколова и вице-президент Общества В. А. Юлин; а также генеральный директор ООО ИСП «Георекострукция» А. Г. Шашкин, которым Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии приносит искреннюю благодарность.

Следует отметить, что за всю историю Сергеевских чтений это второй случай проведения выездной конференции вне столицы. Первый такой опыт состоялся в 2019 г., когда XXI «Сергеевские чтения» были организованы в г. Перми на базе Пермского государственного научно-исследовательского университета. Опыт оказался удачным, поскольку смена региона позволила значительно расширить географический состав участников конференции и круг рассматриваемых научных проблем, а интересная и познавательная полевая экскурсия стала приятным дополнением к научным заседаниям.

Научная тематика «Сергеевских чтений» отличается из года в год. Сообразуясь с потребностями и вызовами времени, она затрагивает различные актуальные вопросы современной геоэкологии и инженерной геологии. Так, 2020 году XXII «Сергеевские чтения» были посвящены обсуждению научных геоэкологических аспектов реализации национального проекта «Экология». Ключевые цели этого нацпроекта были направлены на эффективное обращение с отходами производства и потребления, включая ликвидацию несанкционированных свалок, расширение площади особо охраняемых территорий, экологическое оздоровление водных объектов, сохранение уникальных водных систем, таких как р. Волга и озеро Байкал. Для успешной реализации проекта большое внимание было уделено молодым ученым, поэтому программа конференции включала молодежную сессию, на которой были заслушаны доклады молодых ученых. Проведение таких научных конференций, несомненно, способствует дальнейшему развитию научных знаний и решению современной задачи развития общества — обеспечению его экологической безопасности.

Одним из фундаментальных разделов инженерной геологии как науки является грунтоведение, развитию которого академик Е. М. Сергеев уделял особое внимание, и именно вопросам грунтоведения посвящена значительная часть научного наследия этого ученого. При этом следует отметить, что после проведения почти 20 лет назад конференции «Многообразие грунтов: морфология, причины, следствия» (май 2003 г.) на геологическом факультете МГУ, научных мероприятий, полностью посвященных вопросам грунтоведения, в стране не проводилось, несмотря на то что теоретические положения этой науки составляют ядро методического подхода при изучении грунтов и их массивов в связи с решением любых инженерных задач. Вопросы грунтоведения, механики и технической мелиорации грунтов частично затрагивались в рамках «Сергеевских чтений» в разные годы, однако только в 2022 г. впервые конференцию было решено целиком посвятить этому важнейшему научному направлению. Как отметил проф. Е. А. Вознесенский, необходимость обращения к вопросам грунтоведения в рамках этой конференции была продиктована новыми тенденциями, возникшими за последние десятилетия в современной инженерно-строительной практике, и развитием новых методов исследования грунтов.

Устная программа конференции включала 1 пленарное и 4 секционные заседания. Пленарное заседание чтений открылось музыкальным вступлением, исполненным квартетом им. Н. А. Римского-Корсакова с участием солиста Т. Яхнова — лауреата Международного телевизионного конкурса «Щелкунчик» 2015 г. Такое приятное дополнение к традиционной программе научной сессии создало в зале приподнятую творческую атмосферу, вдохновило участников на плодотворное обсуждение назревших проблем. Открывая научную часть конференции, с приветственным словом к собравшимся обратились директор ИГЭ РАН, президент Охотинского общества грунтоведов проф. Е. А. Вознесенский, а также научный руководитель ИГЭ РАН, председатель Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии академик В. И. Осипов. Пленарное заседание чтений было посвящено развитию теории современного грунтоведения. Некоторые достижения в области исследования дисперсных грунтов были отражены в докладах Е. А. Вознесенского и Ф. С. Карпенко (ИГЭ РАН, г. Москва). Проф. Е. А. Вознесенский, освещая новые методические задачи и подходы к изучению грунтов, показал, что «передний край» современных исследований поведения грунтов по-прежнему проходит в области нелинейной механики, хотя некоторые из ее базовых принципов известны с конца XIX века. При этом, по его мнению, наиболее важные и интересные задачи связаны не столько с разработкой новых моделей и с выводом более универсальных уравнений состояния грунтов, сколько с пониманием природы обуславливающих их процессов. Зав. лабораторией ИГЭ РАН к.г.-м.н. Ф. С. Карпенко рассказал о новых взглядах на свойства глинистых грунтов с позиций физико-химической теории прочности. Рассматривая глинистые грунты как чуткие дисперсные системы, в которых внешнее воздействие вызывает закономерную ответную реакцию, выражающуюся в изменении строения и свойств из-за нарушения баланса энергии взаимодействия частиц, автор предлагает в прогнозных расчетах устойчивости в реальных условиях нагружения использовать показатели общей и реальной эффективной прочности и деформируемости глинистых грунтов.

Вторая часть пленарного заседания была мемориальной, посвященной выдающимся ученым нашего времени, внесшим значительный вклад в исследование грунтов. Заведующий кафедрой почвоведения и экологии почв Санкт-Петербургского государственного университета А. В. Русаков выступил с воспоминаниями о ярком представителе современной школе грунтоведения в Санкт-Петербурге, организаторе Охотинского общества грунтоведов и журнала «Грунтоведение», безвременно ушедшем из жизни, д.г.-м.н. Д. Ю. Здобине. Страстно преданный науке, Д. Ю. Здобин внес большой вклад в сохранение и дальнейшее развитие научной школы генетического грунтоведения, созданной выдающимися учеными в советский период. С первых лет проведения нашей конференции Дмитрий Юрьевич был неизменным ее участником; он регулярно выступал с трибуны «Сергеевских чтений», делился с коллегами своими новыми достижениями и теоретическими обобщениями в области изучения глин и илов, а также неоднократно оказывал неоценимую практическую помощь в подготовке конференции. Память об этом талантливом и неравнодушном человеке останется в сердцах его благодарных коллег.

В завершении пленарного заседания «Сергеевских чтений» состоялось традиционное объявление лауреатов и торжественное вручение медали Е. М. Сергеева «За вклад в развитие инженерной геологии». Решением жюри лауреатами медали в 2022 г. стали: д.г.-м.н. Д. Ю. Здобин (посмертно), д.т.н. Г. Г. Болдырев, к.г.-м.н. Н. А. Ларионова, д.г.-м.н. Ю. Б. Осипов и д.г.-м.н. Л. В. Шаумян.

Далее конференция продолжилась работой секций. Секционные заседания были посвящены рассмотрению различных аспектов практического приложения научных достижений грунтоведения: «Изучение состава и свойств грунтов в практике инженерных изысканий», «Изучение массивов грунтов в целях прогнозирования и оценки опасных природных процессов», «Методические вопросы изучения грунтов и моделирование», «Геоэкологические аспекты изучения массивов природных и техногенных грунтов».

Заседание первой секции «Изучение состава и свойств грунтов в практике инженерных изысканий» открылось докладом коллектива авторов Санкт-Петербургского отделения ИГЭ РАН, представленным М. В. Вилькиной, на тему «Изучение фильтрационной неоднородности кембрийских глин при обосновании окончательной изоляции отходов». Эти исследования, проведенные в районе полигона токсичных отходов Красный Бор, на конкретном примере показывают исключительную важность изучения состава и свойств грунтов для обеспечения экологической безопасности территорий. Большой интерес вызвал также другой доклад коллектива авторов Санкт-Петербургского отделения ИГЭ РАН, под руководством член-корр. РАН В. Г. Румынина, в котором было продемонстрировано успешное применение современных программных комплексов геологического моделирования для оценки инженерно-геологических условий площадки строительства инженерного сооружения повышенной опасности и ответственности — ЛАЭС-2. В. А. Ерзова с соавторами провели геометризацию и детализацию внутреннего строения палеодолины, как инженерно-геологического фактора, осложняющего строительство. Ряд докладов, в том числе коллективов авторов кафедры инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ (Е. Н. Самарин и др., Н. В. Абакумова и др.), а также ООО НИЦ «Строй ГеоСреда» из Екатеринбурга (О. Н. Овечкина), был посвящен вопросам изучения состава, строения и свойств грунтов в целях сохранения объектов культурно-исторического наследия или возведения новых храмовых комплексов. Интересным объектом исследований Е. Н. Самарина, И. В. Аверина, С. К. Николаевой, Н. В. Абакумовой и других специалистов Геологического факультета МГУ стал Свято-Успенский Псково-Печерский монастырь. Развитие природных экзогенных процессов, угрожающих этому уникальному объекту, ставят на повестку дня вопросы бережной рациональной эксплуатации монастырского комплекса на основе грамотного анализа геологических и геоморфологических условий территории. Всестороннее исследование различных горизонтов грунтового массива, слагающих основание этого древнего исторического сооружения, мониторинг его состояния и, возможно, разработка и применение мер по укреплению позволят сохранить этот уникальный памятник отечественной истории. Исследованию слабых нарушенных карбонатных грунтов в зоне выветривания посвящено исследование коллектива авторов Казанского государственного университета (А. И. Латыпов и др.). Им удалось установить закономерности преобразования пород под влиянием процессов гипергенеза и охарактеризовать неоднородный по строению и свойствам вертикальный профиль элювиальной толщи Бугульминско-Белебеевской возвышенности, служащий основанием многих промышленных и гражданских объектов, и на основании этого дать оценку карстово-суффозионной опасности в данном индустриальном регионе.

Работа секции, посвященной изучению массивов грунтов в целях оценки и прогнозирования опасных природных процессов, открылась приглашенным докладом специалиста с мировым именем в области изучения гравитационных процессов к.г.-м.н. А. Л. Строма (ООО «Центр геодинамических исследований», г. Москва). Каменные лавины, образующиеся при обрушении высокогорных склонов, сложенных скальными грунтами, отличаются исключительно высокой подвижностью, что, с учетом большого объема смещающихся грунтов, представляет большую опасность для населения и инженерных объектов. На примере высокогорных каменных лавин Тянь-Шаня и Памира, А. Л. Стром убедительно показал, что гранулометрический состав и строение этих отложений дает ключ к пониманию механизма их перемещения. Эта информация важна для понимания механизма высокой подвижности каменных лавин, а также для оценки устойчивости и вероятности прорыва завальных плотин. Гравитационным процессам в высокогорных районах был также посвящен доклад другого исследователя — И. А. Торгоева (Институт механики и освоения недр НАН Кыргызстана, г. Бишкек). Им исследованы состав и свойства техногенных грунтов в целях оценки их ползучести на высокогорном золотом руднике Кумтор. Несколько докладов касалось изучения грунтовых массивов, находящихся под воздействием гравитационных процессов в платформенных условиях. Так, О. В. Зеркаль (МГУ, Москва) от имени коллектива авторов доложил об исследовании изменения состава и строения юрских глин в зоне оползневых смещений на участке «Воробьевы горы»,

а М. М. Кучуков (ИГЭ РАН) рассказал о поведении грунтов и диссипативных геологических структур при образовании оползневого блока. Результаты изучения грунтов, представленные на конференции сотрудниками Пермского государственного научно-исследовательского университета, касались оценки активности карстовых процессов. Исходя из сравнительного анализа условий развития карста в пределах опорных участков Москвы, Нижегородской и Владимирской областей Т. Г. Ковалева, З. В. Селина и др. (ПГНИУ, г. Пермь) в своем докладе показали, что наличие мощной перекрывающей глинистой толщи не исключает процесс провалообразования. Авторами указано, что при анализе условий и факторов развития карста важно обращать внимание на генезис, возраст, сложение перекрывающих отложений. Исследование Е. В. Дробининой было направлено на поиск закономерностей в изменении свойств растворимых грунтов карстующегося массива. Грунтовые массивы в области криолитозоны, затронутые такими процессами, как овражная термоэрозия и пучение, были предметом изучения молодых исследователей, представлявших Уральский государственный горный университет (г. Екатеринбург) — А. В. Быковой, Е. С. Зыряновой, А. А. Худякова.

Большой интерес и последующую оживленную дискуссию вызвали доклады, сделанные на секции «Методические вопросы изучения грунтов и моделирование». Новые методы и методики исследований всегда представляют собой передовой край научного познания. Доклады участников «Сергеевских чтений» были посвящены развитию самых разных лабораторных, полевых и дистанционных методов изучения разнообразных грунтов, залегающих в различных природных обстановках (скальные, дисперсные, многолетнемерзлые грунты, торфяные отложения осушенных болот, грунты шельфа, склоновые отложения и др.) При этом, для решения методических вопросов особенно важно взаимодействие представителей разных направлений науки. Инженерно-геологические проблемы изучения грунтовых массивов часто могут быть решены только в сотрудничестве грунтоведов с инженерами-геотехниками. Поэтому неудивительно, что заседание этой секции открылось приглашенным докладом генерального директора ООО ИСП «Георекострукция» (г. Санкт-Петербург) д.г.-м.н. А. Г. Шашкина, рассказавшем о возможности прогнозирования с помощью моделей механики грунтов. Рассматривая важный вопрос о конечной осадке грунтовых оснований сооружений, докладчик на конкретных примерах исторических зданий в Санкт-Петербурге и Москве показал, что для развития моделирования необходимо создание базы данных наблюдений за длительными деформациями для проверки качества прогнозов, генерируемых различными моделями. Горячее обсуждение вызвал доклад доцента кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ к.т.н. А. Ю. Мирного, который предложил использовать энергетический подход к интерпретации результатов испытаний трехосного сжатия грунтов. Отмечая, что большинство закономерностей механики грунтов носит феноменологический характер и не объясняет физической природы протекающих процессов, автор обосновывает возможность использования энергетического подхода, который успешно применяется в разных областях механики. Интерпретации результатов испытаний прочностных характеристик грунтов также был посвящен доклад к.г.-м.н. Е. В. Федоренко (НИП-Информатика, г. Санкт-Петербург). Особо следует отметить интересный доклад коллектива авторов из ИГЭ РАН, представленный Е. О. Дерновой, которая рассказала о методах исследования свойств мерзлых грунтов и прогноза их изменения; а также аспиранта кафедры инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ И. Е. Большакова, сообщение которого было посвящено оригинальной методике определения свойств гидротермально измененных вулканических пород Камчатки с помощью молотка Шмидта.

Заключительная секция конференции была посвящена геоэкологическим аспектам изучения массивов природных и техногенных грунтов. Большая часть представленных докладов касалась вопросов загрязнения грунтов, почв и подземных вод в районах интенсивного техногенного воздействия: в промышленных зонах, в местах добычи полезных ископаемых, на территориях размещения полигонов ТКО. Так, д.г.-м.н. И. В. Галицкая (ИГЭ РАН, Москва) рассказала о результатах изучения загрязненных грунтов как вторичного источника загрязнения на территориях размещения полигонов ТКО. Ею была проведена оценка опасности загрязнения отложений зоны аэрации в районах размещения свалок ТКО с помощью различных методов и критически проанализированы преимущества и недостатки используемых подходов. По мнению автора, наиболее перспективным в этих целях является подход, заключающийся в моделировании влаго- и массопереноса как на уровне грунтовых вод в заданные периоды времени, так и в разрезе зоны аэрации. Решению актуальной задачи, имеющей важное экологическое значение для Пермского региона, был посвящен доклад коллектива авторов

из ПГНИУ, представленный заслуженным деятелем науки к.г.-м.н. Н. Г. Максимовичем. Он рассказал собравшимся о формировании техногенных донных отложений под влиянием изливов кислых шахтных вод Кизеловского угольного бассейна. Несмотря на то что промышленное функционирование этого объекта давно прекращено, последствия излива шахтных вод до сих пор оказывают негативное влияние на состояние речных систем региона. Внимание к эколого-геохимическому состоянию речных донных отложений неблагополучного в геоэкологическом отношении Пермского края было привлечено также в докладе А. Д. Перевощиковой (ПГНИУ).

Особое направление исследований представляет собой изучение грунтов как объектов технической мелиорации в целях искусственного улучшения их свойств. Емкий содержательный доклад об особенностях твердения гидратированных зол и зологрунтовых систем представила на конференции известный специалист в области технической мелиорации грунтов, лауреат медали Е. М. Сергеева к.г.м.н. Н. А. Ларионова (МГУ). В докладе убедительно показано, что активное использование зол для укрепления грунтов в дорожном строительстве позволяет решать важные экономические и экологические задачи — сокращать расход вяжущих веществ и объемы накапливаемых промышленных отходов. Исследования, направленные на физико-химическое преобразование грунтов в строительных целях, продолжают традиционно успешно развиваться на кафедре инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ. Интересные результаты представила сотрудник этой кафедры И. А. Родькина о влиянии аутигенных пленок на поглощающую способность песчаных грунтов по отношению к свинцу.

Всего за два дня работы конференции «XXIII Сергеевские чтения» были заслушаны 33 устных доклада — все, запланированные программой, что нечасто случается на конференциях. Можно предположить, что этому поспособствовал дефицит персонального научного общения в предыдущие два года. К сожалению, ограниченное время устной сессии не позволило заслушать все поступившие в адрес конференции доклады. Однако все материалы, принятые оргкомитетом к публикации, размещены в электронном сборнике трудов «XXIII Сергеевские чтения», который был выпущен издательством «Геоинфо» к началу работы конференции. Сборник трудов чтений, включающий 78 докладов, включен в базу данных научного цитирования РИНЦ и доступен для скачивания на сайте www.sergeev2022conf.ru. Лучшие доклады в расширенном виде также будут опубликованы в журналах «Геоэкология» и «Грунтоведение».

В перерывах между докладами участники конференции обсуждали и насущные профессиональные проблемы, не связанные напрямую с анонсированными темами, но имеющими не менее важное значение в работе специалистов, представляющих ВУЗы, научно-исследовательские и производственные организации.

Это проблемы и задачи, решить которые можно только при участии членов профессиональных сообществ, требующие, возможно, публичных обсуждений, площадкой для которых должны быть любые доступные информационные ресурсы. К наиболее актуальным из них относятся современное состояние высшей школы, включая постоянно растущую отчетно-бюрократическую нагрузку на профессорско-преподавательский состав ВУЗов, качество подготовки абитуриентов, современное состояние нормативно-методической документации.

Организаторы конференции, специализирующиеся на научно-исследовательских и научно-производственных задачах также заинтересованы в развитии профессиональных союзов, объединяющих усилия для оптимизации рабочих процессов в различных масштабах, от деятельности в отдельных коллективах до решений на законодательном уровне, и готовы привлекать внимание заинтересованных лиц с использованием доступных ресурсов — журналов, сайтов, площадок научных конференций.

Очное участие в «XXIII Сергеевских чтениях», приняли 132 специалиста из 12 городов России, Азербайджана и Киргизии: Москвы, Санкт-Петербурга, Пензы, Екатеринбурга, Тюмени, Уфы, Якутска, Перми, Казани, Архангельска, Баку и Бишкека. Участники конференции представляли 33 учебные, научные и производственные организации. Еще 20 слушателей участвовали дистанционно через онлайн подключение на сайте конференции. Приятно, что конференцию не обошли вниманием студенты и аспиранты профильных вузов Санкт-Петербурга, для которых эта встреча дала уникальную возможность общения с известными учеными-грунтоведами, инженер-геологами и геотехниками. Участвуя в таком научном мероприятии, они учатся выстраивать и грамотно излагать свои мысли, не бояться публичных выступлений, а также приобретают единомышленников.

Научная программа «Сергеевских чтений» сопровождалась работой технической выставки, на которой свое оборудование представила компания «Геотек» (г. Пенза). После поведения итогов конференции слушателям было предложено

несколько интереснейших экскурсий. Доктор геолого-минералогических наук А. Г. Шашкин провел в зале виртуальную техническую экскурсию «Развитие неравномерных осадок Исаакиевского собора»; а затем он же пригласил участников чтений на пешеходную геотехническую экскурсию «Ансамбль «Новая Голландия»: приспособление памятника промышленной архитектуры XVIII века для современного использования». Доцент кафедры минералогии Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета к.г.-м.н. А. А. Золотарев провел увлекательную и очень познавательную геолого-минералогическую экскурсию на тему «Каменное убранство Санкт-Петербурга». Приятным дополнением к научной программе стал товарищеский ужин для участников конференции, предоставивший возможность коллегам из разных городов продолжить общение и завершить неоконченные научные дискуссии.

Оргкомитет с удовлетворением отмечает, что научная конференция «XXIII Сергеевские чтения» прошла успешно, ее обновленный формат получил одобрение и поддержку участников. Мы благодарим всех докладчиков и слушателей за активное участие и надеемся на новые регулярные встречи в будущем.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. **Гараева Анастасия Николаевна,** кафедра общей геологии и гидрогеологии Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета, старший преподаватель
Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5, комната 218, тел. +7 927 043 97 00
anastya-solnce@mail.ru

2. **Дробинина Елена Викторовна,** кандидат геолого-минералогических наук, научно-исследовательская лаборатория инженерно-экологических исследований Пермского государственного национального исследовательского университета, инженер
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15, тел. +7 909 727 24 63
alenadrobinina@yandex.ru

3. **Зеркаль Олег Владимирович,** кандидат геолого-минералогических наук, кафедра инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, старший научный сотрудник
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
igzov@mail.ru

4. **Мирный Анатолий Юрьевич,** кандидат технических наук, кафедра инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, доцент
Россия, 107076, г. Москва, ул. Короленко, д. 7, к.3, кв.33, тел. +7 916 908 81 31
mirnyyAY@mail.ru

5. **Мосина Анна Сергеевна,** кафедра инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, аспирант
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
mosina.a.s@yandex.ru

6. **Латыпов Айрат Исламгалиевич,** кандидат технических наук, кафедра общей геологии и гидрогеологии Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета, доцент
Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5, комната 218, тел. +7 987 297 35 67
airatlat@mail.ru

7. **Лунева Ольга Викторовна,** кафедра геофизики и геоинформационных технологий Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета, ассистент
Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5, комната 102, тел. +7 919 690 70 96
olunjova@yandex.ru

Сдано в набор: 30.06.2022 Подписано в печать: 15.07.2022 Формат бумаги: 60х88 1/8
Цифровая печать. Тираж 50 экз.

Учредитель: Охотинское общество грунтоведов

Отпечатано в типографии «СВЕН»