

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 551.3.053

DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.606-617

Исследование оползневого процесса в условиях сезонномерзлых грунтов (оползневый склон долины р. Воркута)

Анна Николаевна Вихоть

Институт геологии федерального научного центра Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук имени академика Н.П. Юшкина (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН);
г. Сыктывкар, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В свете последних тенденций таяния многолетнемерзлых толщ состояние криолитозоны отмечается как неустойчивое, поэтому широко распространены такие экзогенные геологические процессы, как оползни.

Материалы и методы. Проведен анализ оползневого процесса в долине р. Воркута вблизи территории жилой застройки в условиях сезонномерзлых грунтов. По результатам вертикального электрического зондирования представлен геоэлектрический разрез у бровки оползневого срыва. Осуществлены статистические расчеты по геодезическим данным, трансформация временного ряда смещения оползня к стационарному виду методом детрендрования, корреляционный анализ.

Результаты. Определены тренды временных рядов по точкам смещений. Они имели квадратичное распределение. Все исследуемые ряды обладали сильной детерминацией. Проверка компонент на стационарность и распределение по нормальному закону выполнялись по оценке математических ожиданий параметров детрендрованных рядов. Краткосрочный прогноз оползневого процесса на один период был дан по критериям стандартной квадратичной модели регрессии, приведен график прогноза. По критерию Колмогорова – Смирнова принята гипотеза об однородности распределения одиночного ряда для климатических параметров за период наблюдений. Коэффициенты корреляции параметров смещения бровки оползневого уступа и некоторых климатических факторов по шкале Чеддока находились в диапазоне от обратной слабой ($-0,18$) до значительной ($0,58$) корреляции.

Выводы. Представлено два возможных случая развития оползневого процесса: пассивная стадия и выколаживание склона или начало нового цикла. Для установления достоверного прогноза необходимо вести геодезический мониторинг. За период наблюдений отмечено незначительное повышение среднегодовой температуры воздуха. Выявлена тесная взаимосвязь оползневых смещений и среднего значения температуры воздуха месяцев с положительными значениями, $K_{\text{кор}} = 0,58$. Умеренная связь ($K_{\text{кор}} = 0,5$) — со среднегодовым количеством осадков. Предложены инженерные рекомендации для стабилизации склона: установка теплоизоляционных экранов на глубину сезонного промерзания грунтов, обустройство дренажных колодцев в теле оползня и в грунтах выше по склону.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сезонномерзлые грунты, оползень, цикл наблюдений, квадратичный тренд, климатические параметры, корреляция, вертикальное электрическое зондирование

Благодарности. Автор выражает благодарность В.А. Лютоеву за проведение полевых работ и Геокриологической службе Республики Коми за предоставленные данные.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Вихоть А.Н. Исследование оползневого процесса в условиях сезонномерзлых грунтов (оползневый склон долины р. Воркута) // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 606–617. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.606-617

Автор, ответственный за переписку: Анна Николаевна Вихоть, vikhot.anna@mail.ru.

Study of the landslide process in conditions of seasonally frozen soils (landslide slope of the Vorkuta river valley)

Anna N. Vikhot

Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy
of Sciences (IG FRC Komi SC UB RAS); Syktывkar, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In view of recent trends in melting of permafrost strata, the state of cryolithozone is noted as unstable, so such exogenous geological processes as landslides are widespread.

Materials and methods. The landslide process in the Vorkuta River valley near the residential area under the conditions of seasonally frozen soils was analyzed. Based on the results of vertical electrical sounding, a geoelectric section at the landslide failure edge is presented. Statistical calculations based on geodetic data, transformation of landslide displacement time series to stationary form by detrending method, correlation analysis were carried out.

Results. Trends of time series on displacement points were determined. They had a quadratic distribution. All investigated series had strong determinacy. The components were checked for stationarity and distribution according to the normal law by estimation of mathematical expectations of the detrended series parameters. Short-term forecast of landslide process for one period was given by the criteria of standard quadratic regression model, the forecast graph is given. According to Kolmogorov–Smirnov criterion, the hypothesis of homogeneity of single series distribution for climatic parameters for the observation period was accepted. The correlation coefficients of the parameters of landslide scarp displacement and some climatic factors on the Chaddock scale ranged from inverse weak (–0.18) to significant (0.58) correlation.

Conclusions. Two possible cases of the landslide movement were presented: passive stage and the slope flattening or the beginning of a new landslide cycle. Geodetic monitoring is necessary to establish a reliable forecast. The average annual air temperature increased slightly during the observation period. A close relationship between landslide displacements and the positive average monthly air temperature values was revealed, $K_{cor} = 0.58$. A moderate connection ($K_{cor} = 0.5$) — with the average annual precipitation. Engineering recommendations for slope stabilization are proposed: installation of heat-insulating screens to the depth of seasonal soil freezing, arrangement of drainage wells in the body of the landslide and in soils up the slope.

KEYWORDS: seasonally frozen soils, landslide, time series, quadratic trend, climatic parameters, correlation, vertical electrical sounding

Acknowledgements. The author expresses gratitude to V.A. Lyutov for conducting field work and the Geocryological Service of the Komi Republic for the provided data.

FOR CITATION: Vikhot A.N. Study of the landslide process in conditions of seasonally frozen soils (landslide slope of the Vorkuta river valley). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(4):606-617. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.606-617 (rus.).

Corresponding author: Anna N. Vikhot, vikhot.anna@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Криолитозона охватывает 24 % площади суши Северного полушария, в том числе около 50 % в России, занимая примерно 64 % территории страны [1]. На Европейском Севере России динамика глубины сезонного протаивания зависит от изменений температуры воздуха и высоты снежного покрова: с увеличением данных параметров растут и показатели температурного поля оттаивающих грунтов. Данные тренды оценены методами статистического анализа [2].

Район исследований, г. Воркута, расположен в южной тундре, в области голоценовой и голоценово-плейстоценовой криолитозоны с залеганием ее подошвы на глубине 100 м и чуть более [3], представленной прерывистым неоднородным распространением многолетнемерзлых грунтов (10–50 % покрытия) [4]. В этой зоне геологическая среда обладает сильной чувствительностью к изменениям климата и техногенной нагрузке. В свете последних тенденций таяния многолетнемерзлых толщ состояние криолитозоны здесь отмечается как неустойчивое [5, 6], поэтому широко распространены экзогенные геологические процессы и явления, в частности опасные и катастрофические (оползни, обвалы), криогенное выветривание, а именно промерзание и оттаивание с образованием сезонноталого и сезонномерзлого слоев грунтов (термоэрозия, криопэги, морозобойное растрескивание, солифлюкция, морозное пучение).

В районе исследований особого внимания заслуживает оползневый процесс на территории жилой застройки. В настоящее время широко используются количественные методы определения оползневой опасности. Исследование с помощью этих методов состоит из двух основных элементов:

анализ пространственной и временной вероятности оползня, что связано с величиной смещения грунта, периодом повторяемости и возникновения смеще-

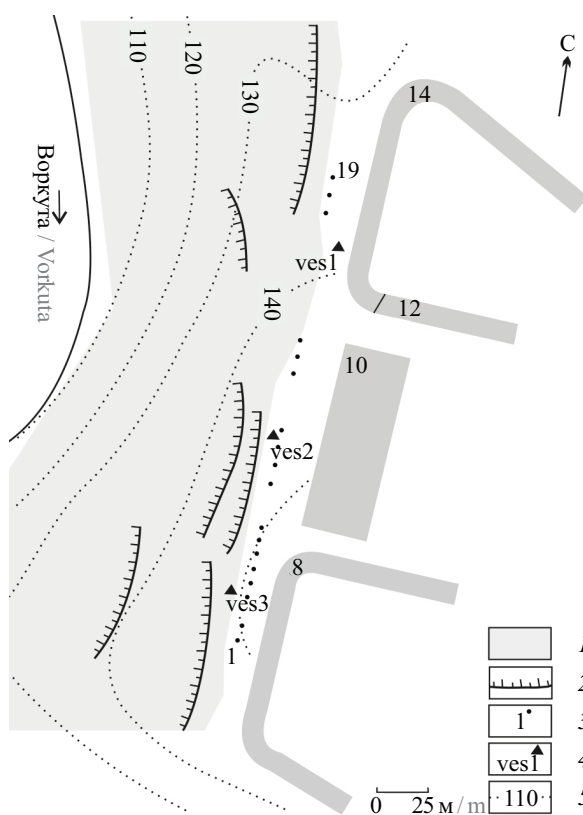


Рис. 1. Схема района исследований: 1 — оползневый участок; 2 — бровка оползневой срыва; 3 — геодезический репер; 4 — пикет вертикального электрического зондирования; 5 — абсолютная высота

Fig. 1. Scheme of the research area: 1 — landslide area; 2 — landslide failure edge; 3 — geodetic reference; 4 — vertical electrical sensing picket; 5 — absolute height

ния [7]. При оценке площадного распространения оползней и прогнозе динамики оползневых процессов в пространстве и во времени применяются статистические методы обработки данных. Когда оползневый процесс рассматривается как простейший поток событий, временная вероятность процесса рассчитывается, например, с помощью распределения Пуассона [8]. Также применяются космоснимки в разных зонах спектра (инфракрасной, радиоволновой, ультрафиолетовой) [9–11]. Для определения доминирующей составляющей при корреляционном анализе оползневого процесса статистически независимые пространственные значения вероятности могут определяться, например, методом мультирегрессионного анализа, взвешенной дисперсии и I Морана [12]. Геодезические наблюдения заключаются в получении пространственно-координированных сведений посредством электронно-оптических и лазерно-сканирующих приборов и позволяют точно оценить геометрические параметры оползня, прогнозировать смещение оползня с помощью традиционных математических расчетов. В результате таких расчетов методом регрессионного анализа строится прогнозная модель оползневого процесса. С точки зрения теории слу-

чайных функций смещение оползня представляется как случайная величина, и анализ процесса происходит методом исследования согласно этой теории [13]. Если временной ряд является однородным и стационарным, то анализ оползневого процесса и прогнозирование становятся возможными.

Цель работы — исследование динамики движения оползня в долине р. Воркута в условиях сезонно-мерзлых грунтов и ее взаимосвязей с климатическими параметрами.

Объект исследования

Детальное исследование оползневого процесса было проведено на оползневом склоне в долине р. Воркута, примыкающей к седьмому жилому микрорайону в районе ул. Шахтерская набережная (г. Воркута). Первая и основная закономерность рассматриваемого вида природной опасности состоит в том, что она никогда не может быть ликвидирована полностью. Это связано с тем, что часть геологической среды, вовлеченной в техносферу, служит источником техногенного существования и развития. Опасность процесса заключается в том, что бровка срыва подбирается к дому № 10 по ул. Шахтерская набережная (рис. 1).

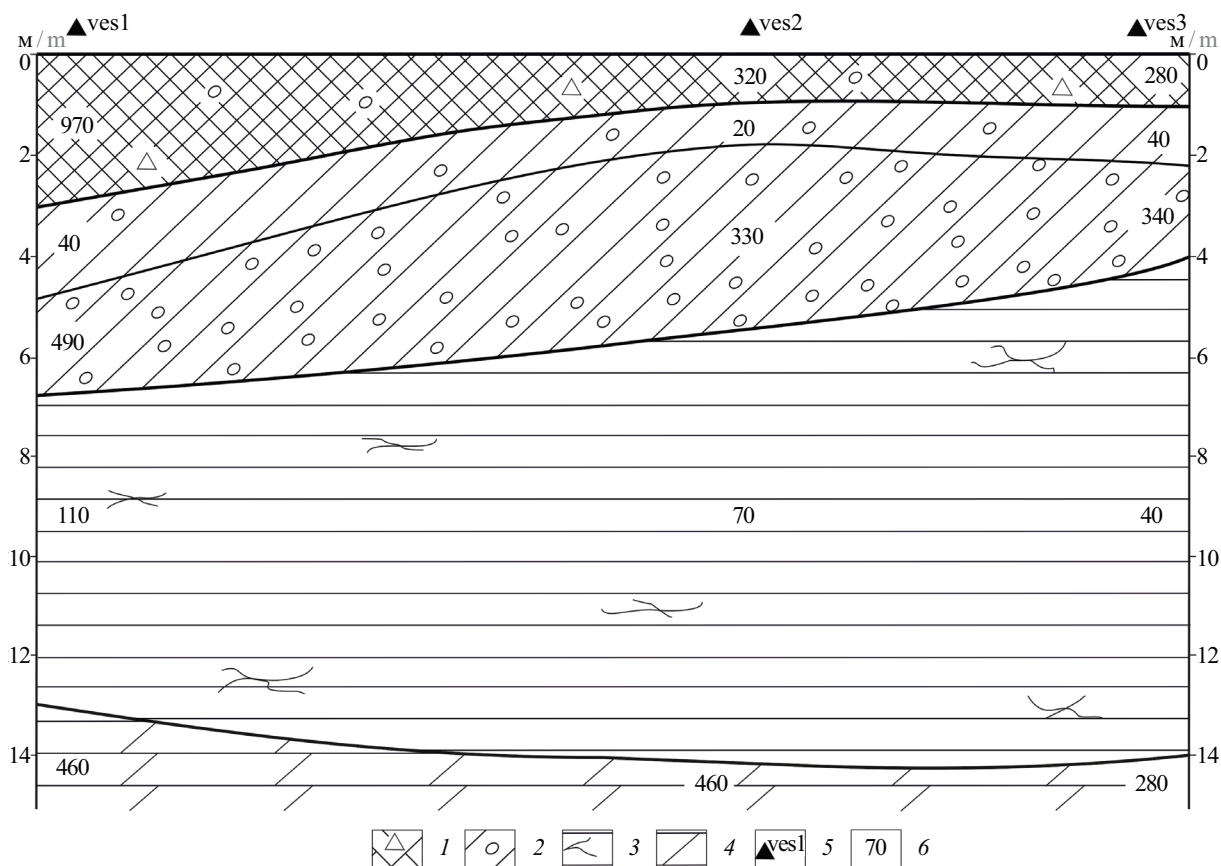


Рис. 2. Геоэлектрический разрез у бровки оползневого срыва: 1 — насыпные грунты; 2 — суглинки с включениями гравия и гальки; 3 — трещиноватые полускальные отложения; 4 — скальные породы; 5 — пикет вертикального электрического зондирования; 6 — удельное электрическое сопротивление, Ом·м

Fig. 2. Electrical model of the landslide margin: 1 — fill-up ground; 2 — loam and alluvium; 3 — crumbling semi-rocky deposits; 4 — hard-rocks; 5 — picket of vertical electrical sounding; 6 — electrical resistivity, Ohm·m

Склон — экзогенный, средняя длина — 400 м, очень крутой (рис. 1). Высотные колебания достигают 40 м. Природными условиями, в которых протекает смещение грунтов, по данным ГКУ РК «Геокриологическая служба» (г. Воркута), является глубинная эрозия вследствие мерзлотного и гигрогенного крипа и обводнения склона поверхностными водами: таяние снега и ливневый сток. По классификации Е.В. Шанцера, Г.С. Золотарева и С.С. Воскресенского, это оползень полигенного типа, в основе механизма — обвално-осыпной процесс с локальным движением грунта по типу оползневой скольжения на глубине 4–14 м.

В верхней части разреза, составленного по данным вертикального электрического зондирования, вдоль бровки оползня (рис. 2) залегают насыпные грунты неоднородного состава мощностью 0,4–1,5 м: щебень, дресва, встречаются включения суглинка. До глубины 3,0 м могут присутствовать насыпные грунты несколько иного сложения: гравий, галька, включения песка и суглинка. О неоднородности горизонтов таких рыхлых грунтов свидетельствует большой диапазон значений удельного электрического сопротивления 277–974 Ом·м. Также этот широкий предел объясняется колебаниями температуры воздуха и влажности пород. Далее до глубины 4,0–6,8 м находятся средне- и верхне-четвертичные отложения, представленные ледниковыми и ледниково-морскими суглинками с увеличением содержания гравия и гальки к подошве, среднее содержание от 5–10 % до 20–25 % [14, 15]. Ниже (до 13–14 м) залегают полускальные пермские отложения и представляют элювий коренных

пород: сильно выветрелые, трещиноватые, глыбощебенистые песчаники, аргиллиты и алевролиты. Они могут переслаиваться со скальными прочными и средней прочности грунтами. Скальный горизонт выделяется как слой удельного электрического сопротивления 275–460 Ом·м. Таким образом, ослабленной зоной для нарушения устойчивости склона являются трещиноватые полускальные породы: поверхностные воды проникают в зону элювия, вследствие их замерзания происходит раскрытие и углубление трещин; в летний период наблюдается оттаивание льда, ослабление структурных связей в грунтах, оползание и обрушение блоков склона под действием силы тяжести.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С точки зрения математической статистики оползневый процесс является случайным и определяется функцией распределения вероятностей. Его характеристики изменяются со временем и в какой-либо момент времени не могут быть точно предсказаны, поэтому для анализа динамики и краткосрочного прогноза оползня проведены статистические расчеты, трансформация временного ряда смещения оползня к стационарному виду. Также осуществлен корреляционный анализ возможных климатических факторов активизации и затухания оползневой процесса. Данные горизонтальных и вертикальных подвижек оползневой тела и информация об инженерно-геологических элементах предоставлены ГКУ РК «Геокриологическая служба». Геодезические реперы расположены вдоль бровки главного уступа (рис. 1). В табл. 1 отображены рассчитанные значе-

Табл. 1. Абсолютные смещения оползневых точек, мм

Table 1. Absolute displacements of landslide points, mm

Точка наблюдений Observation point	Год наблюдений Observation year					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1	8,2	15,1	14,6	17,6	7,8	8
2	5,6	6,57	6,9	9,3	4,2	3,3
3	1,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
4	0,4	0,5	0,3	0,2	0,0	0,2
5	2,5	2,5	0,7	0,1	0,1	0,4
6	1,0	0,4	0,4	0,3	0,3	0,1
7	2,2	0,1	0,2	0,3	1,7	1,6
8	1,3	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2
9	0,4	0,8	1,6	1,2	2,5	0,4
10	3,2	1,3	3,4	5,2	7,25	6
11	16,5	13,3	201,6	128,0	59,7	50,2
12	21,7	11,3	199,5	139,5	46,8	56,2
13	49,3	16,7	57,2	202,8	114,3	232,9
14	6,8	9,5	251,4	241,9	3,0	9,6
15	0,7	1,0	0,4	0,1	0,9	2,6
16	0,4	0,2	4,9	4,6	0,0	0,1
17	0,4	1,0	1,7	4,1	4,7	0,0
18	0,0	0,0	1,7	1,3	0,6	2,0
19	0,0	0,4	1,1	1,4	0,3	0,1

ния вектора смещения в пространстве для каждого репера.

Комплексная взаимосвязь климатических факторов и динамики оползневой процесса определена с помощью расчетов коэффициента корреляции и выявления прямой или обратной закономерности изменения параметров.

Литологический состав и мощность геологических горизонтов были уточнены методом электроразведки (вертикального электрического зондирования) с расстановкой Шлюмберже. Метод вертикального электрического зондирования, как малоглубинный метод электроразведки, давно зарекомендовал себя в изучении природных и техногенных оползневых процессов у отечественных и иностранных исследователей [16–21].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные наблюдений 2014–2019 гг. представлены в табл. 1. На рис. 3 годовые графики отображают движение геодезических точек в виде составляющих модулей значений во времени. В центральной части бровки движение неравномерно, что косвенно подтверждает циклический оползневый процесс: стадия подготовки (до 2014–2015 гг.), представленная малыми смещениями, предшествовала стадии основного смещения и вторичных смещений (2016–2019 гг.). На графике движения каждой точки (примеры на рис. 4) временной ряд имеет тренд, ряды не являются стационарными, поэтому для построения математической модели краткосрочного прогноза движения бровки главного уступа оползневой тела необходимо привести каждый ряд к стационарному виду методом детрендривания. Стационарный относительно тренда временной ряд x_i имеет следующее представление:

$$x_i = f(t) + u_i,$$

где $f(t)$ — детерминированная функция (тренд); u_i — стационарный ряд («белый шум»), удовлетворяющий теореме Гаусса – Маркова.

Для этого необходимо определить тип тренда, получить аналитическое уравнение тренда, установить коэффициент детерминации R^2 .

В результате аппроксимации временного ряда каждой точки получили, что временные ряды стационарны относительно некоторого детерминированного квадратичного тренда (полинома второй степени) (рис. 4, табл. 2). Это означает, что они относятся к группе TS-рядов. Однако заключение о стационарности полученных данных требует проверки. На этапе определения тренда все исследуемые ряды обладают сильной детерминацией, неприемлемые для анализа коэффициенты детерминации R^2 отсутствуют: диапазон рассчитанных коэффициентов составил 0,5–0,9.

В табл. 3 приведены полученные по формуле данные детрендривания в виде компонент временной последовательности u_i . Проверка компонент на стационарность и распределение по нормальному закону заключается в оценке математических ожиданий по формуле:

$$\bar{M}x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

Все рассчитанные математические ожидания равны нулю (табл. 3), следовательно, ряды стационарны и к моделям квадратичных трендов можно применять выводы стандартной квадратичной модели регрессии.

Общий вид модели квадратичного тренда задается уравнением:

$$x_i = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + v_i,$$

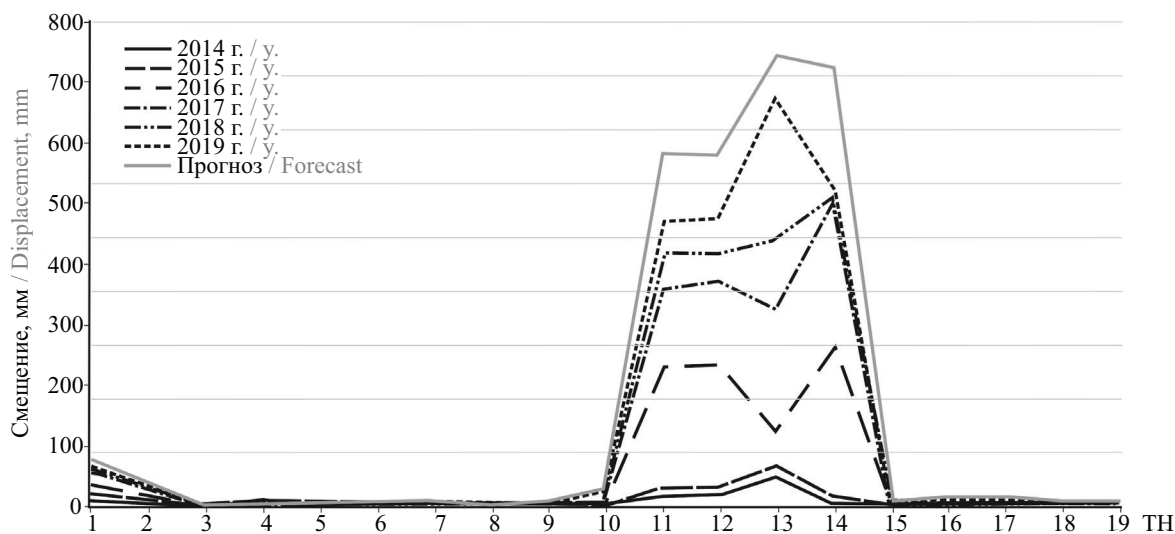


Рис. 3. Динамика движения оползневой тела

Fig. 3. Dynamics of landslide body movement

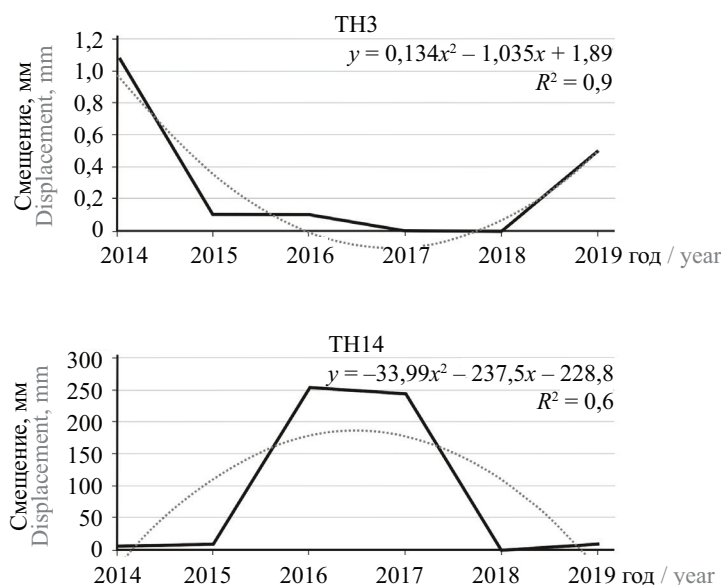


Рис. 4. Графики смещения точек оползневой тела и аппроксимирующих функций

Fig. 4. Graphs of landslide body point displacement and approximating functions

где β_0 — начальный уровень ряда; β_1 — средняя скорость изменения уровня ряда; β_2 — коэффициент ускорения изменения уровня ряда.

Из табл. 2 известны все значения коэффициентов тренда, поэтому можно дать трактовку и краткосрочный прогноз на один период динамики оползневой процесса (движению бровки оползневой срыва):

- при $\beta_2 > 0$ и вогнутом параболическом тренде процесс характеризуется в нисходящей части как снижение значений во времени с замедлением, в восходящей части — рост с ускорением;
- при $\beta_2 < 0$ и выпуклом параболическом тренде процесс в восходящей части представлен ростом параметра с замедлением, в нисходящей части — снижением с ускорением.

Табл. 2. Параметры аппроксимации временных рядов

Table 2. Time series approximation parameters

Точка наблюдений Observation point	Уравнение тренда $f(t)$ Trend equation $f(t)$	Коэффициент детерминации R^2 Determination coefficient R^2
1	$-1,262x^2 + 8,268x + 2,09$	0,7
2	$-0,555x^2 + 3,421x + 2,43$	0,7
3	$0,134x^2 - 1,035x + 1,89$	0,9
4	$0,008x^2 - 0,136x + 0,61$	0,65
5	$0,155x^2 - 1,61x + 4,33$	0,9
6	$0,035x^2 - 0,39x + 1,24$	0,85
7	$0,271x^2 - 1,845x + 3,36$	0,7
8	$0,121x^2 - 0,995x + 1,96$	0,8
9	$-0,187x^2 + 1,446x - 1,07$	0,5
10	$0,055x^2 + 0,569x + 1,55$	0,7
11	$-18,96x^2 + 139,4x - 121,9$	0,5
12	$-18,29x^2 + 134,3x - 113,5$	0,5
13	$4,285x^2 + 8,754x + 16,56$	0,7
14	$-33,99x^2 + 237,5x - 228,8$	0,6
15	$0,225x^2 - 1,32x + 2,16$	0,8
16	$-0,637x^2 + 4,393x - 4,01$	0,55
17	$-0,48x^2 + 3,691x - 3,65$	0,55
18	$-0,046x^2 + 0,65x - 0,64$	0,5
19	$-0,182x^2 + 1,289x - 1,2$	0,8

По результатам анализа соотношений данных табл. 2 и графиков тренда получены выводы:

- по типу движения бровки оползневого уступа область размещения реперов делится на северную (ПН16-19), центральную (ПН9-14) и южную (ПН3-8) части;

- центральная часть характеризуется обвальным процессом в период 2013–2017 гг. с последующим этапом стабилизации склона (2018–2019 гг.);

- в тот же период 2013–2017 гг. южная часть бровки оползневого уступа также характеризуется активной стадией оползания, но с наименьшей скоростью, поэтому возможно отнести оползневый процесс в этой части к группе механизма оползния скольжения; стадия затухания и стабилизации началась в 2018 г.;

- в первой части периода наблюдений северная часть имела подготовительный этап, описываемый по трендам ПН16-19 снижением значений; стоит отметить, что этот этап выражен неявно и заканчивается в 2017–2018 гг., далее тренды переходят в стадию роста с невысоким ускорением, следовательно, с некоторой вероятностью можно утверждать о начале активной стадии оползния в этой части склона.

Прогнозные значения по трендам на один период представлены в виде кривой на рис. 3. При условии сохранения формы правой нисходящей ветви трендов и стремлении значений смещения к нулю в центральной и южной части участка исследова-

ний можно будет сделать заключение о процессе выполаживания склона. Возможен случай, когда модель придет к своему экстремуму и начнет движение в противоположную сторону. Таким образом, можно будет сделать заключение о начале нового цикла оползневого процесса. Тогда процесс будет описываться полиномом степени больше второй и тенденция прогнозирования, возможно, будет иметь более высокую степень ошибки при хорошо аппроксимированном ряде.

Исследования взаимосвязи климатических причин возникновения и активизации оползней статистическими методами ведутся на протяжении нескольких последних десятилетий. Корреляции иногда высокие и тесно связаны во времени, иногда неудовлетворительны и отдалены [22]. При оценке степени влияния климатических параметров (температуры воздуха, осадков, мощности снежного покрова) на ежегодные показатели вектора смещения оползневого тела были использованы данные метеостанции г. Воркута (табл. 4) за 2014–2019 гг.

Среднегодовая температура воздуха по метеостанции г. Воркута (2014–2019 гг.) составила $-3,88\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднее значение отрицательных среднесуточных температур воздуха $-11,26\text{ }^{\circ}\text{C}$, положительных $+9,16\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднегодовое количество осадков 549 мм. В период наблюдений отмечается незначительное повышение среднегодовых температур (коэффициент линейной регрессии для отрицательных зна-

Табл. 3. Параметры детрендрованных рядов u_r , мм

Table 3. Parameters of detrended series u_r , mm

Точка наблюдений Observation point	Год наблюдений Observation year						\bar{M}
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
1	-0,9	1,5	-0,9	2,6	-4,1	1,8	0,0
2	0,3	-0,48	-0,8	2,1	-1,45	0,35	0,00
3	0,11	-0,26	0,11	0,1	-0,06	0	0,00
4	-0,08	0,13	0,02	-0,01	-0,15	0,09	0,00
5	-0,35	0,75	-0,2	-0,29	-0,05	0,15	0,00
6	0,12	-0,2	0	0,05	0,12	-0,08	0,00
7	0,42	-0,65	-0,07	-0,01	0,78	-0,45	0,00
8	0,22	-0,35	-0,06	0,18	0,18	-0,16	0,00
9	0,2	-0,29	0,01	-0,5	1,03	-0,45	0,00
10	1	-1,6	-0,4	0,5	1,45	-0,95	0,00
11	16,5	-66,7	76,6	-4	-40,3	18,2	0,0
12	18,7	-70,7	74,5	9,5	-53,2	21,2	0,0
13	19,3	-35,3	-24,8	82,8	-52,7	10,9	0,0
14	31,8	-100,5	74,4	64,9	-107	36,6	0,0
15	-0,35	0,57	0,19	-0,38	-0,29	0,28	0,00
16	0,64	-2	1,48	1,2	-2	0,7	0,00
17	0,82	-0,8	-1,4	0,7	1,9	-1,2	0,00
18	0,05	-0,47	0,8	0,09	-0,85	0,4	0,00
19	0,1	-0,25	0,07	0,36	-0,4	0,12	0,00

Табл. 4. Климатические параметры, г. Воркута, и коэффициенты корреляции со смещением оползневой тела

Table 4. Climatic parameters, Vorkuta, and correlation coefficient with landslide body displacements

Год Year	$t_{\text{ср.в.}}^{\circ\text{C}}$ $t_{\text{м.а.}}^{\circ\text{C}}$	$t_{\text{ср.л.в.}}^{\circ\text{C}}$ $t_{\text{м.а.}}^{\circ\text{C}}$	$t_{\text{ср.в.}}^{\circ\text{C}}$ $t_{\text{м.а.}}^{\circ\text{C}}$	Годовое количество осадков, мм Annual rainfall, mm	$h_{\text{ср.сн.пок.}}^{\text{мм}}$ $h_{\text{м.сн.}}^{\text{мм}}$	$h_{\text{макс.сн.пок.}}^{\text{мм}}$ $h_{\text{макс.сн.}}^{\text{мм}}$
2014	-5,62	7,60	-12,23	517	42,9	99
2015	-3,88	6,63	-11,39	464	51,4	130
2016	-1,61	11,62	-11,06	424	13,1	37
2017	-3,57	9,78	-10,25	516	36,8	91
2018	-4,49	10,45	-11,96	733	43,8	95
2019	-4,13	8,88	-10,64	639	71,3	158
D_n	0,350	0,417	0,350	0,356	0,389	0,350
$K_{\text{кор}}$ K_{cor}	0,18	0,58	0,35	0,5	-0,14	-0,18

чений положителен, коэффициент детерминации $R^2 = 0,25$). По этим значениям самым теплым годом стал 2016 г., ему соответствует минимальное годовое количество осадков и высота снежного покрова. По средним значениям суммы отрицательных температур самым теплым годом оказался 2017 г., суммы положительных температур 2016 г. На диапазон среднегодовых температурных параметров оказали несколько большее влияние среднемесячные температуры воздуха с отрицательными значениями (коэффициент линейной регрессии $\beta_1 = 0,201$; $R^2 = 0,25$), чем с положительными ($\beta_1 = 0,457$; $R^2 = 0,22$), следовательно, повышение среднегодовых температур заключается в более теплых месяцах с отрицательной температурой воздуха.

Для расчета коэффициентов корреляции смещение бровки оползневой уступа принималось за зависимую переменную, климатические показатели — за независимые переменные. По критерию Колмогорова – Смирнова проведена проверка гипотезы об однородности распределения одиночного ряда для анализируемых климатических параметров путем определения максимального модуля разности накопленных величин:

$$K_n = \max|f_n(x) - f_0(x)|.$$

По результатам вычисления критерия $D_n = \sqrt{n} \cdot K_n$ (табл. 4) получили, что по таблице распределения критерия для $\epsilon = 0,01$ выполнено необходимое условие для корреляционного анализа: каждый ряд данных подчиняется нормальному закону распределения $D_n > D_{\text{крит}}$, $D_{\text{крит}} = 0,618$.

Коэффициенты корреляции параметров смещения бровки оползневой уступа и таких климатических факторов, как среднегодовая температура воздуха, среднее значение температуры воздуха месяцев с отрицательной и положительной температурой воздуха, годовое количество осадков, средняя и максимальная высота снежного покрова, по шкале Чеддока оказались в диапазоне от обратной слабой (-0,18) до значительной (0,58). Наиболее высокий коэффициент (значительная связь) выявлен меж-

ду смещением и средним значением температуры воздуха месяцев с положительными значениями. Смещение и годовое количество осадков обнаруживают умеренную корреляционную связь (0,5). Взаимосвязи смещения и высоты снежного покрова не являются статистически значимыми и имеют слабый обратный характер (-0,14 и -0,18).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа параметров смещения точек бровки оползневой уступа получены графики трендов, область размещения реперов условно разделена на южную, центральную и северную части, приведены прогнозные значения смещения на один период по параболическим трендам и коэффициенту ускорения изменения уровня ряда β_2 из уравнения тренда. Также представлено два возможных случая развития оползневой процесса: пассивная стадия и выполаживание склона или начало нового цикла. Для установления достоверного долгосрочного и кратковременного прогноза оползневой смещения необходимо вести дальнейший детальный геодезический мониторинг. Дополнительно с целью контроля развития деформаций следует установить сеть деформационных знаков на участке дорожного полотна ул. Шахтерская набережная, вовлеченного в оползневый процесс, и далее по мере необходимости — на фундаментах и конструкции прилегающих зданий. Ежегодная обработка информации мониторинга позволит оценивать степень опасности оползня для жилого района, соблности ст. 9 «Требования безопасности при опасных природных процессах и явлениях и (или) техногенных воздействиях»¹ и своевременно предпринять меры. Заключение Геокриологической службы Республики Коми по данным геодезических наблюдений за 2020 г. «... полученные заключения

¹ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 (ред. от 02.07.2013).

говорят о том, что опасности для многоквартирных домов не существует... От оползневых явлений страдает только дорожное полотно набережной»². Это позволяет сделать вывод о временной стабилизации оползневого процесса, но не прекращать геодезический мониторинг. Однако наблюдения были приостановлены.

При оценке динамики движения оползня и ее взаимосвязей с климатическими параметрами за анализируемый период наиболее тесная взаимосвязь выявлена между смещением и средним значением температуры воздуха месяцев с положительными значениями, $K_{\text{кор}}$ составил 0,58. В то же время повышение среднегодовых температур заключается в более теплых месяцах с отрицательной температурой воздуха. В целом в период наблюдений отмечается незначительное повышение среднегодовой температуры воздуха. Удовлетворительная взаимосвязь средней и максимальной высоты снежной толщи с параметрами смещения оползневого тела отсутствует. Данная закономерность не прослеживается, вероятно, ввиду уборки снега с проезжей части ул. Шахтерская набережная. Умеренная связь ($K_{\text{кор}} = 0,5$) присутствует между параметрами смещения и среднегодовым количеством осадков, что объясняет обводнение склона поверхностными водами, как один из определяющих факторов снижения структурных связей грунтов и нарушения состояния равновесия оползневого склона.

Таким образом, такие климатические параметры, как средняя температура воздуха и среднегодовое количество осадков, в целом могут способствовать возникновению нестабильности оползневого склона в г. Воркута, но коэффициенты корреляции недостаточно высоки, хотя удовлетворительны. Исходя из этого, можно предположить, что тригге-

² Муниципалитет ищет деньги на укрепление Шахтерской набережной // Моя Воркута — наша газета. URL: <https://gazetamv.ru/domam-na-shaxterskoj-naberezhnoj-opolzen-ne-ugrozaet.html>

рами также могут выступать местные природные или техногенные землетрясения. Данные динамические воздействия служат вторичной причиной активизации оползневого процесса, когда склон подходит к состоянию предельного равновесия. В таком случае оползневый процесс является результатом взаимодействия между естественными и техногенными факторами, образующими природно-технологическую систему. В районе исследований техногенная сейсмичность может быть вызвана подземными работами по добыче полезных ископаемых шахтным способом на угольной шахте «Воркутинская»: буровзрывным методом разуплотнения породы и работой проходческих и очистных комбайнов. Следует одновременно вести сейсмический и геодезический мониторинг. Также одним из следующих этапов необходимо провести локальное районирование территории г. Воркуты и прилегающих областей с выделением зон, подверженных опасности проявления оползневых процессов, и характеризующее их распространение и географические и природные условия их проявления. Оптимальным подходом для решения этой задачи предлагается применение статистических и детерминистических методов с использованием ГИС совместно с полевыми исследованиями.

В заключение возможно предложить некоторые инженерные рекомендации для способствования продолжительному пассивному состоянию данного оползневого склона:

- установка теплоизоляционных экранов на глубину сезонного промерзания грунтов;
- обустройство дренажных колодцев в теле оползня и выше по склону в грунтах, в настоящее время не вовлеченных в оползневый процесс.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Heginbottom J.A., Brown J., Ferrians O.J., Melnikov E.S. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Circum-Pacific Map Series CP-45. Washington, DC, 1997. DOI: 10.3133/cp45
2. Шерстюков А.Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 1. С. 79–87. EDN ILKVVN.
3. Оберман Н.Г., Шеслер И.Г., Рубцов А.И. Экогеология Республики Коми и восточной части Ненецкого автономного округа : монография. Сыктывкар : Пролог-Плюс, 2004. 256 с. EDN QJIZQP.
4. Westerveld L., Kurvits T., Schoolmeester T., Eckhoff T.S., Overduin P.P., Fritz M. et al. Arctic Permafrost Atlas. Arendal : GRID-Arendal, 2023. 175 p. DOI: 10.61523/kpji4549
5. Анисимов О.А., Борщ С.В., Георгиевский В.Ю., Инсаров Г.Э., Кобышева Н.В., Костяной А.Г. и др. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М. : Планета, 2012. 512 с. EDN QKKXCN.
6. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В. и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего гео-

криологического мониторинга в западном секторе Российской Арктики // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 2. С. 15–30. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30). EDN HROYGC.

7. *Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M.* Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques : a review // *Geoenvironmental Disasters*. 2020. Vol. 7. Issue 1. DOI: 10.1186/s40677-020-00152-0

8. *Tay L.T., Sh. Alkhasawneh M., Lateh H., Hos-sain M.K., Kamil A.A.* Landslide hazard mapping of Penang island using Poisson distribution with dominant factors // *Journal of Civil Engineering Research*. 2014. Vol. 4. Issue 3A. Pp. 72–77. DOI: 10.5923/jce.201402.12

9. *Cook M.E., Brook M.S., Hamling I.J.* Investigating slow-moving shallow soil landslides using Sentinel-1 InSAR data in Gisborne, New Zealand // *Landslides*. 2023. Vol. 20. Issue 2. Pp. 427–446. DOI: 10.1007/s10346-022-01982-9

10. *Лебедева Е.В., Балдина Е.А., Медведев А.А.* Склоновые процессы в долине р. Гейзерной (Камчатка): результаты дешифрирования разновременных космических снимков высокого пространственного разрешения // *Геоморфология*. 2022. Т. 53. № 4. С. 3–16. DOI: 10.31857/S0435428122040095. EDN AУХННЛ.

11. *Чермошенцев А.Ю.* Применение данных со спутника Sentinel-1 для оперативного обнаружения оползней // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2020. Т. 4. № 1. С. 29–35. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-4-1-29-35. EDN FWUIZS.

12. *Das I., Stein A., Kerle N., Dadhwal V.K.* Probabilistic landslide hazard assessment using homogeneous susceptible units (HSU) along a national highway corridor in the northern Himalayas, India // *Landslides*. 2011. Vol. 8. Issue 3. Pp. 293–308. DOI 10.1007/s10346-011-0257-9

13. *Симонян В.В., Николаева Г.А.* Исследование оползневых процессов методом корреляционного анализа с использованием случайных функций // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 8 (107). С. 846–853. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.846-853. EDN ZFBXUP.

14. *Андреичева Л.Н.* Плейстоцен Европейского Северо-Востока : монография. Екатеринбург :

Уральское отделение РАН, 2002. 323 с. EDN YEBCFN.

15. *Андреичева Л.Н., Марченко-Ваганова Т.И., Буравская М.Н., Голубева Ю.В.* Природная среда неоплейстоцена и голоцена на Европейском Северо-Востоке России. М. : ГЕОС, 2015. 224 с. EDN XXUXPZ.

16. *Лютюев В.А., Вихоть А.Н.* Влияние оползневых процессов и природно-техногенной микросейсмичности на геологическую среду г. Сыктывкара. Сыктывкар : ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2019. 79 с.

17. *Саламов А.М., Кадиров А.Г., Мухтаров А.Ш., Заманова А.Г., Гасымов Э.Э.* Исследование развития оползневых процессов на восточном крыле Бибиэйбатской брахиантиклинали методом электроразведки // *ANAS Transactions, Earth Sciences*. 2020. № 1. С. 19–27. DOI: 10.33677/ggianas20200100039

18. *Christopher W.A.P.P., De Silva N., Attanayake A.M.A.N.B., Jayasingha P.* Characterization of landslides: a vertical electrical sounding approach // *Geoscience Letters*. 2023. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1186/s40562-023-00274-x

19. *Damavandi K., Abedi M., Norouzi G.H., Mojarab M.* Geoelectrical characterization of a landslide surface for investigating hazard potency, a case study in the Tehran-North freeway, Iran // *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2022. Vol. 56. Issue 4. Pp. 339–347. DOI: 10.22059/IJMGE.2022.340800.594958

20. *Mebrahtu G., Atsaha S., Berhe B.A.* Vertical Electrical Sounding (VES) investigation for road failure along Mekelle – Abi-Adi road segment, northern Ethiopia // *Momona Ethiopian Journal of Science*. 2021. Vol. 13. Issue 1. Pp. 134–146. DOI: 10.4314/mejs.v13i1.7

21. *Ezung M., Walling T., Chelladurai C.* Application of vertical electrical sounding for subsurface characterization to determine slope instability at Perizie, Nagaland // *Current World Environment*. 2022. Vol. 17. Issue 3. Pp. 657–671. DOI: 10.12944/cwe.17.3.14

22. *Flageollet J.C., Maquaire O., Martin B., Weber D.* Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France) // *Geomorphology*. 1999. Vol. 30. Issue 1–2. Pp. 65–78. DOI: 10.1016/s0169-555x(99)00045-8

Поступила в редакцию 20 ноября 2023 г.

Принята в доработанном виде 14 декабря 2023 г.

Одобрена для публикации 14 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Анна Николаевна Вихоть** — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория региональной геологии; **Институт геологии федерального научного центра Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук имени академика Н.П. Юшкина (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН)**; 167000, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; РИНЦ ID: 1150840; vikhot.anna@mail.ru.

REFERENCES

1. Heginbottom J.A., Brown J., Ferrians O.J., Melnikov E.S. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. *Circum-Pacific Map Series CP-45*. Washington, DC, 1997. DOI: 10.3133/cp45
2. Sherstyukov A.B. Correlation of soil temperature with air temperature and snow cover depth in Russia. *Earth's Cryosphere*. 2008; 12(1):79-87. EDN ILKVVN. (rus.)
3. Oberman I.G., Shesler I.G., Rubtsova A.I. *Eco-geology of the Komi Republic and the eastern part of Nenets Autonomous Okrug*. Syktyvkar, Prolog-Polyus, 2004; 256. EDN QJIZQP. (rus.)
4. Westerveld L., Kurvits T., Schoolmeester T., Eckhoff T.S., Overduin P.P., Fritz M. et al. *Arctic Permafrost Atlas*. Arendal, GRID-Arendal, 2023; 175. DOI: 10.61523/kpji4549
5. Anisimov O.A., Borshch S.V., Georgievskiy V.Yu., Insarov G.E., Kobysheva N.V., Kostyanoy A.G. et al. *Methods of the consequence assessment of the climate change for physical and biological systems*. Moscow, Planeta Publ., 2012; 512. EDN QKKXCN. (rus.)
6. Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A., Drozdov D.S., Korostelev Yu.V., Malkova G.V. et al. Permafrost degradation: results of the long-term geocryological monitoring in the western sector of Russian Arctic. *Earth's Cryosphere*. 2020; 24(2):15-30. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30). EDN HROYGC. (rus.)
7. Shano L., Raghuvanshi T.K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques : a review. *Geoenvironmental Disasters*. 2020; 7(1). DOI: 10.1186/s40677-020-00152-0
8. Tay L.T., Sh. Alkhasawneh M., Lateh H., Hossain M.K., Kamil A.A. Landslide hazard mapping of Penang island using Poisson distribution with dominant factors. *Journal of Civil Engineering Research*. 2014; 4(3A):72-77. DOI: 10.5923/c.jce.201402.12
9. Cook M.E., Brook M.S., Hamling I.J. Investigating slow-moving shallow soil landslides using Sentinel-1 InSAR data in Gisborne, New Zealand. *Landslides*. 2023; 20(2):427-446. DOI: 10.1007/s10346-022-01982-9
10. Lebedeva E.V., Baldina E.A., Medvedev A.A. Use of multi-temporal high resolution space images to analyze the slope processes in the Geysernaya river valley (Kamchatka). *Geomorfologiya*. 2022; 53(4):3-16. DOI: 10.31857/S0435428122040095. EDN AYXHHL. (rus.)
11. Chermoshentsev A.Yu. Application of Sentinel-1 data for rapid detection of landslides. *Interexpo GEO-Siberia*. 2020; 4(1):29-35. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-4-1-29-35. EDN FWUIZS. (rus.)
12. Das I., Stein A., Kerle N., Dadhwal V.K. Probabilistic landslide hazard assessment using homogeneous susceptible units (HSU) along a national highway corridor in the northern Himalayas, India. *Landslides*. 2011; 8(3):293-308. DOI 10.1007/s10346-011-0257-9 (rus.)
13. Simonyan V.V., Nikolaeva G.A. Study of the landslide process by the correlation analysis method using random functions. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(8):846-853. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.8.846-853. EDN ZFBXUP. (rus.)
14. Andreicheva L.N. *The Pleistocene in the European North-East : monograph*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002; 323. EDN YEBCFN. (rus.)
15. Andreicheva L.N., Marchenko-Vagapova T.I., Buravskaya M.N., Golubeva Y.V. *Neopleistocene and holocene natural environment in European North-Eastern of Russia*. Moscow, GEOS, 2015; 224. EDN XXUXPZ. (rus.)
16. Lyutoev V.A., Vikhot A.N. *The impact of landslide processes and of natural and technogenic microseismicity on the geological environment of the city of Syktyvkar*. Syktyvkar, Federal Research Center "Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences", 2019; 79. (rus.)
17. Salamov A.M., Gadirov A.H., Mukhtarov A.Sh., Zamanova A.H., Gasimov E.E. Development of landslide processes on the eastern wing of the Bibiheybat brachianticline using the electrical survey. *ANAS Transactions, Earth Sciences*. 2020; 1:19-27. DOI: 10.33677/ggianas20200100039 (rus.)
18. Christopher W.A.P.P., De Silva N., Attanayake A.M.A.N.B., Jayasingha P. Characterization of landslides: a vertical electrical sounding approach. *Geoscience Letters*. 2023; 10(1). DOI: 10.1186/s40562-023-00274-x
19. Damavandi K., Abedi M., Norouzi G.H., Mojarab M. Geoelectrical characterization of a landslide surface for investigating hazard potency, a case study in the Tehran-North freeway, Iran. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2022; 56(4):339-347. DOI: 10.22059/IJMGE.2022.340800.594958
20. Mebrahtu G., Atsbaha S., Berhe B.A. Vertical Electrical Sounding (VES) investigation for road failure along Mekelle – Abi-Adi road segment, northern Ethiopia. *Momona Ethiopian Journal of Science*. 2021; 13(1):134-146. DOI: 10.4314/mejs.v13i1.7
21. Ezung M., Walling T., Chelladurai C. Application of vertical electrical sounding for subsurface characterization to determine slope instability at Perizie, Nagaland. *Current World Environment*. 2022; 17(3):657-671. DOI: 10.12944/cwe.17.3.14
22. Flageollet J.C., Maquaire O., Martin B., Weber D. Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France). *Geomorphology*. 1999; 30(1-2):65-78. DOI: 10.1016/s0169-555x(99)00045-8

Received November 20, 2023.

Adopted in revised form on December 14, 2023.

Approved for publication on December 14, 2023.

B I O N O T E S: **Anna N. Vikhot** — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher, Laboratory of Regional Geology; **Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IG FRC Komi SC UB RAS)**; 54 Pervomayskaya st., Syktyvkar, 167000, Russian Federation; ID RSCI: 1150840; vikhot.anna@mail.ru.