

Оценка параметров сезонного промерзания и оттаивания горных пород на оползневом склоне в долине р. Воркута

Вихоть А. Н. 

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, vikhot.anna@mail.ru

Аннотация. Осуществлены расчеты глубины сезонного промерзания и оттаивания горных пород, индексов промерзания и оттаивания и n -фактора на оползневом склоне в долине р. Воркута. В основе расчетов – модель Стефана, которая построена на том, что доминирующим процессом в деятельном слое является изменение фазы, связанное с замерзанием и оттаиванием. Различия между толщиной деятельного слоя и сезонной глубиной оттаивания составили от 1 до 31 % при коэффициенте корреляции 0.93. Аномалии n -фактора ($n > 1$) случились в одни из самых прохладных сезонов оттаивания. Положительные корреляции между n -факторами, средними температурами воздуха теплого периода, продолжительностью теплого периода и динамикой оползневого процесса не наблюдаются.

Ключевые слова: глубина оттаивания и промерзания, деятельный слой, индекс оттаивания и промерзания, оползневый склон, n -фактор.

Estimation of parameters of seasonal rocks freezing and thawing on a landslide slope in the Vorkuta River valley

Vikhot A. N. 

Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, vikhot.anna@mail.ru

Abstract. Calculations of the thaw and freeze depths, thawing and freezing indices and n -factor were performed on a landslide slope in the Vorkuta River valley. The calculations are based on the Stefan model which is built on the dominant process is a phase change associated with freezing and thawing in the active layer. The differences between the active layer thickness and the seasonal thaw depth ranged from 1 to 31 % with a correlation coefficient of 0.93. Anomalies of the n -factor ($n > 1$) occurred in the coolest thawing seasons. Positive correlations between n -factors, average air temperatures of the warm period, the warm period duration and the landslide dynamics are not observed.

Key words: thaw and freeze depths, active layer, thawing and freezing indices, landslide slope, n -factor.

Введение

В регионах с высокой динамикой среднегодовой температуры воздуха и ее переходом через отметку 0°C как в сторону повышения, так и понижения имеют место циклы промерзания–оттаивания в грунтах. На не менее чем 50 % территории суши земного шара наблюдаются указанные процессы (Hugh, 2008; Tian et al., 2019). Одновременно такая высокая динамика среднегодовой температуры воздуха сопровождается сильными вариациями теплового режима в верхней части геологического пространства. Это также связано с локальными особенностями накопления снежного покрова, влажностью почвы и горных пород, инсоляцией и другими климатическими параметрами. Процессы промерзания и оттаивания в грунте формируют его деятельный слой. Одним из алгоритмов отражения баланса тепловой энергии на границе «поверхность земли – воздух» и в деятельном слое за годовой или сезонный цикл является n -фактор. Данный метод оценки был предложен Карлсоном (Carlson, 1952). Он представляет собой отношение суммы сезонных градусо-дней ($^{\circ}\text{C}$ -дней) на поверхности земли к сумме сезонных градусо-дней в воздухе за тот же период времени. Основное применение этого индекса – в строительных и инженерных целях. N -фактор обычно определяется для конкретного участка или поверхностного покрытия. Также программы геокриологического мониторинга могут включать в себя измерения (расчета) n -фактора. Некоторые перспективные подходы к пространственному моделированию подповерхностного теплового режима литосферы были основаны на концепции определения этого фактора (Jorgenson, Kreig, 1988; Smith, Riseborough, 1996). В случае наших исследований целью работы является оценка параметров сезонного промер-

зания и оттаивания горных пород: глубины сезонного промерзания и оттаивания горных пород, индексов промерзания и оттаивания и n -фактора – на оползневом склоне в долине р. Воркута.

Объект исследований

В первую очередь, изучаемый оползневый участок, как объект исследований, представляет интерес в виду того, что он находится в Арктической зоне РФ в области островного распространения криолитозоны. Оползень представляет опасность для территории, примыкающей к ул. Шахтерская набережная (г. Воркута). Эта улица простирается вдоль русла р. Воркута, поэтому оползневый участок находится в зоне застройки многоэтажными многоквартирными домами. Схема оползневого тела в плане и геоэлектрический разрез, построенный вдоль бровки оползневого срыва, представлены на рис. 1. По результатам исследований данного экзогенного процесса Государственным казенным учреждением Республики Коми «Геокриологическая служба Республики Коми» (ГКУ РК «Геокриологическая служба») сделано заключение (Петухова, 2020), что первопричиной активизации этого процесса является эрозия вследствие сезонных воздействий природного характера: мерзлотно-го крипа в холодный период, гидрогенного крипа и обводнения склона поверхностными водами в теплый период (пояснения холодного и теплого периодов даются далее по тексту). Статистический анализ вектора смещения геодезических реперов, расположенных у бровки оползневого уступа, за 2013–2019 гг. показал, что оползень протекает по смешанному механизму «скольжение-обвалы-осыпи» с чередованием активных и пассивных стадий каждые 2–3 года (Вихоть, 2023; Вихоть, Лютоев, 2024). Визуальное обследование и электроразведочные работы на теле оползня позволили уточнить, что процесс протекает по инсеквентному и консеквентному типам. Схема консеквентной части оползня заключается в движении техногенных образований по плоскости их раздела с горизонтом суглинков ИГЭ-3/4. Механизм инсеквентного движения оползневых масс представлен секущим геологические горизонты движением техногенных и суглинистых отложений с их частичными обвалами и осыпями. Также у основания склона и на его ступенях наблюдается присутствие глыб обвалов полускальных пермских отложений, представленных глыбо-щебенистыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами. В этих же работах автора самая высокая зависимость динамики движения оползня была установлена от средней температуры воздуха холодного периода. Здесь холодный период – это период, когда среднесуточная температура воздуха устанавливается стабильно ниже нуля. Главная зависимость глубины промерзания отложений определена от длительности холодного периода и температуры воздуха. Несколько ниже степень корреляции Грея динамики движения

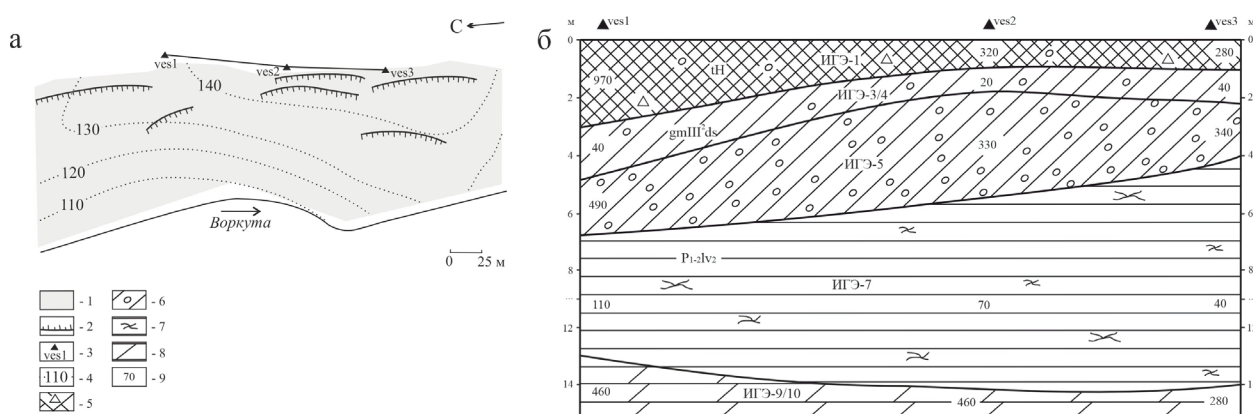


Рис. 1. Оползневый участок: а – схема; б – геоэлектрический разрез вдоль бровки оползневого срыва: 1 – площадь, затронутая оползневым процессом; 2 – бровка оползневого срыва; 3 – пикет вертикального электрического зондирования; 4 – абсолютная высота; 5 – насыпные грунты; 6 – суглинки с включениями гравия и гальки; 7 – трещиноватые полускальные отложения; 8 – скальные отложения; 9 – удельное электрическое сопротивление, Ом·м

Fig. 1. Landslide area: а – scheme; б – electrical model along the landslide edge: 1 – area of landslide process; 2 – landslide margin; 3 – picket of vertical electrical sounding; 4 – datum level; 5 – fill-up ground; 6 – loam with gravel and cobbles; 7 – crumbling semi-rocky deposits; 8 – hard-rocks; 9 – electrical resistivity, Ohm·m

оползня и глубины промерзания грунтов, слагающих оползневый склон, отмечена с режимом снегонакопления. Немаловажным влияющим параметром отмечено и количество жидких осадков в теплый период, что подтверждает одну из установленных «Геокриологической службой» естественных причин активизации оползневого процесса – обводнение склона поверхностными водами.

Методы исследований

Как было указано выше, n -факторы связывают сезонную температуру воздуха с температурой поверхности земли. Простые модели данной связи делят год на сезоны промерзания и оттаивания, вводя индексы промерзания и оттаивания. Например, фактор n оттаивания (n_{TS}) определяется как:

$$n_{TS} = \frac{I_{TS}}{I_{TA}},$$

где I_{TS} – индекс оттаивания поверхности и I_{TA} – индекс оттаивания воздуха.

Для n -фактора промерзания (n_{FS}) справедлива аналогичная формула.

Каждый сезонный индекс оттаивания воздуха I_{TA} и промерзания воздуха I_{FA} определяется как сезонно интегрированная температура, которая приблизительно равна сумме среднесуточных температур воздуха за весь сезон оттаивания или промерзания. Сезоном оттаивания и промерзания являются периоды, в которые установленная среднесуточная температура воздуха выше или ниже 0°C соответственно. Допустимы переходы по другую сторону 0°C , но не более пяти дней.

Индекс оттаивания поверхности I_{TS} и промерзания поверхности I_{FS} для обоих случаев рассчитывается соотношением:

$$I_S = \frac{x^2 L}{2\lambda},$$

где x – глубина оттаивания/промерзания соответственно рассчитываемому периоду, м, L – объемная скрытая теплота плавления льда или кристаллизации воды соответственно рассчитываемому периоду, Вт·ч/кг, λ – коэффициент теплопроводности талой/мерзлой горной породы, Вт/(м·°C).

Предполагая, что доминирующим процессом в деятельном слое является изменение фазы, связанное с замерзанием и оттаиванием, для определения индекса промерзания/оттаивания используется модель Стефана, в основе которого определяющей является глубина промерзания/оттаивания грунта. Уравнение Стефана при наличии снежного покрова имеет следующий вид:

$$h = \sqrt{\frac{2\lambda_m t \tau}{Q_\phi + C_{om} t + h_m^2}} - h_m,$$

где λ_m – коэффициент теплопроводности мерзлой породы, Вт/м·°C, t – средняя температура воздуха, °C, τ – продолжительность промерзания на конец месяца холодного периода, ч, Q_ϕ – теплота фазового перехода, Вт·ч/м³, C_{om} – объемная теплоёмкость мерзлых пород, Вт·ч/м·°C, h_m – условная мощность слоя теплоизоляции (снежного покрова), м.

Глубины оттаивания рассчитывается несколько иначе:

$$Z = \sqrt{\frac{2\lambda_t s n_{TS} DDT_a}{\rho L \omega}},$$

где λ_t – коэффициент теплопроводности талой породы, Вт/м·°C, ρ – объемная масса горных пород, кг/м³; ω – суммарная влажность пород.

Результаты и обсуждение

Необходимые для расчетов значения климатических параметров были привлечены из базы данных метеостанции г. Воркуты, теплофизические характеристики – из материалов ГКУ РК «Геокриологическая служба». В первую очередь, по результатам расчетов за период 2010–2023 гг. было проведено сопоставление глубин промерзания и оттаивания грунтов слоя ИГЭ-1, представленного техногенными образованиями неоднородного состава, в области бровки срыва оползня в его

центральной и северной частях, где эти отложения представлены мощностью свыше 2 м, и оценены геокриологические условия оползневого склона до подошвы деятельного слоя. Техногенные образования имеют следующий состав: щебень, дресва, галька, гравий, встречаются включения суглинка. Сохранение или нарастание мерзлого слоя в геологическом массиве отсутствует в виду того, что наблюдается лишь сезонное промерзание верхних горизонтов с некоторым непостоянным сохранением по годам мерзлого слоя максимальной мощностью 0.36 м (рис. 2). В целом за период расчета за время года со среднесуточными температурами воздуха выше нуля весь промерзший грунт успевает оттаять. Максимальная глубина промерзания на данном оползневом участке составляет 2.39 м. Также была рассчитана толщина деятельного слоя из решения Стефана, заданного как:

$$z = \sqrt{\frac{2\lambda_t s n T_s DDT_a}{\rho L \omega}},$$

где s – масштабный коэффициент, DDT_a – сумма градусо-дней температуры оттаивания воздуха.

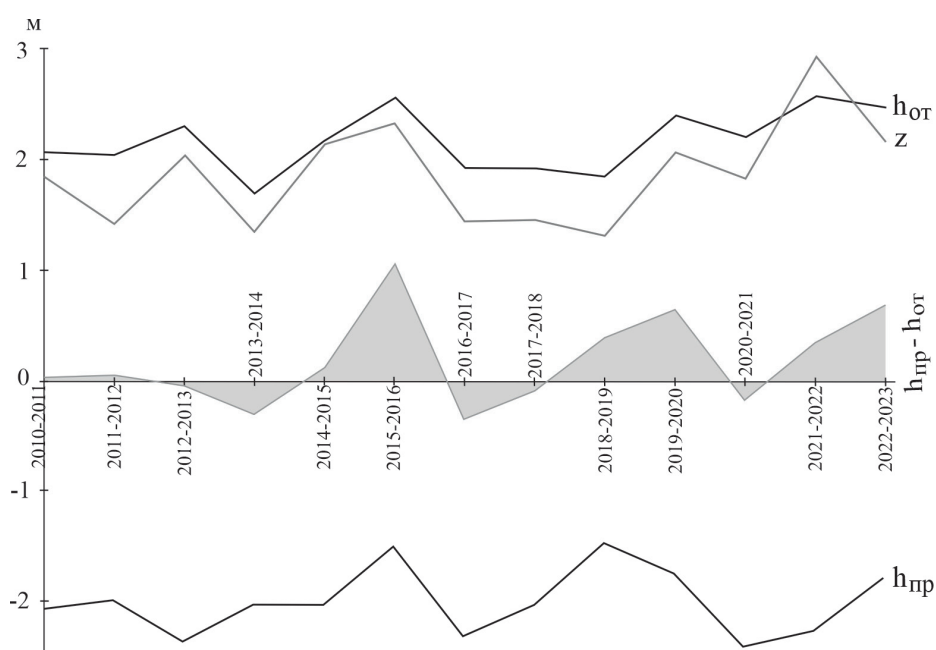


Рис. 2. Динамика промерзания и оттаивания грунтов: $h_{от}$ – глубина оттаивания; $h_{пр}$ – глубина промерзания; z – мощность деятельного слоя

Fig. 2. Thawing and freezing dynamics: $h_{от}$ – thaw depth; $h_{пр}$ – freeze depth; z – active layer thickness

Данное уравнение дает адекватное решение в случае, когда рассматривается только один подповерхностный горизонт геологического разреза с развитой мощностью, которая включает в себя толщину деятельного слоя. Результаты расчетов и их соотношений представлены в табл. 1. Средние различия между толщиной деятельного слоя и сезонной глубиной оттаивания составили от 1 до 31 % при коэффициенте корреляции ($K_{кор}$) 0.93. Такая сильная связь значений по таблице Чеддока свидетельствует о схожей динамике глубины оттаивания грунтов и мощности деятельного слоя. Значения n -фактора выше 1.0 отражают температуру на поверхности земли выше, чем воздуха: такие аномалии отмечаются в сезоны оттаивания 2014–2015 и 2021–2022 гг. Какие-либо положительные корреляции между n -факторами, средними температурами воздуха теплого периода, продолжительностью теплого периода и динамикой оползневого процесса не наблюдаются, однако аномалии случились в одни из самых прохладных сезонов оттаивания.

Таблица 1. Расчетные параметры и их взаимосвязи
Table 1. Calculated parameters and their relationships

Период, гг. Параметр	2010– 2011	2011– 2012	2012– 2013	2013– 2014	2014– 2015	2015– 2016	2016– 2017	2017– 2018	2018– 2019	2019– 2020	2020– 2021	2021– 2022	2022– 2023
n-фактор	0.84	0.50	0.83	0.65	1.04	0.86	0.59	0.61	0.54	0.78	0.70	1.13	0.82
Глубина оттаивания, м	2.06	1.99	2.36	2.02	2.04	1.49	2.29	2.03	1.46	1.73	2.39	2.25	1.77
Мощность деятельного слоя, м	1.87	1.42	2.03	1.36	2.17	2.33	1.45	1.48	1.33	2.07	1.83	2.07	1.83
$K_{кор}$ между глубиной и мощностью	0.93												
Разброс значений глубины и мощности, %	10.2	30.9	11.2	21.2	0.1	0.9	24.8	23.3	27.9	13.3	17.9	4.3	11.5
$T_{сред}$ теплого периода, °C	7.1	10.9	8.6	7.6	7.8	10.8	9.5	9.6	8.8	9.4	8.1	7.7	10.0

Закключение

В свете того, что в настоящее время растет потребность в мониторинге и моделировании деятельного слоя в криолитозоне, весомую роль играет надежность и производительность *n*-фактора. Одновременно с этим на развитие экзогенных процессов на этих же территориях влияют климатические факторы, хотя и в разной степени. Расчеты показали, что прямая зависимость между *n*-фактором оттаивания и динамикой наблюдаемого оползневой процесса в долине р. Воркута отсутствует. Однако, с целью установления механизма активизации/затухания этого процесса, создания алгоритма его протекания и прогнозирования рекомендуется проводить как краткосрочные (сезонные с частым шагом измерений), так и долгосрочные (годовые вариации) инструментальные исследования температурного поля тела оползня и прилегающих областей на участках с разным типом растительного покрова с параллельным измерением влажности грунтов.

Благодарности

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».

Автор выражает благодарность Государственному казенному учреждению Республики Коми «Геоэкологическая служба Республики Коми» за предоставленные данные.

Литература

1. Вихоть А. Н. Исследование оползневой процесса в условиях сезонномерзлых грунтов (оползневый склон долины р. Воркута) // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 606–617. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.606-617 306.
2. Вихоть А. Н., Лютоев В. А. Взаимосвязь динамики оползневой процесса в долине реки Воркуты и основных климатических параметров // Известия Коми НЦ Уральского отделения РАН. Серия: Наука о Земле». 2024. № 3 (69). С. 106–115. DOI 10.19110/1994-5655-2024-3-106-115 106.
3. Заключение по результатам обследования технического состояния берегового склона Шахтерской набережной г. Воркуты в 2019–2020 гг. / Ред. М. Ю. Петухова. Воркута. Изд-во: ГКУ РК «Геоэкологическая служба», 2020. 56 с.
4. Carlson H. Calculation of Depth of Thaw in Frozen Ground // Frost Action in Soils: A Symposium. Washington, DC: Highway Research Board Special Report 2, National Research Council. 1952. P. 192–223.
5. Hugh A. L. Henry. Climate change and soil freezing dynamics: historical trends and projected changes / Hugh A. L. Henry // Climatic Change. 2008. V. 87. P. 421–434. DOI 10.1007/s10584-007-9322-8.

6. Jorgenson M. T., Kreig R. A. A model for mapping permafrost distribution based on landscape component maps and climatic variable // *Proceedings of the Fifth International Conference on Permafrost*. V. 1. Trondheim, Norway: Tapir Publishers. 1988. P. 176–182.
7. Smith M. W., Riseborough D. W. Permafrost monitoring and detection of climate change // *Permafrost and Periglacial Processes*. 1996. V. 7, No. 7. P. 301–309.
8. Tian S., Liang T., Xianzhang L., Kong X., S. Li, D. Cai Cyclic behaviour of coarse-grained materials exposed to freeze-thaw cycles: experimental evidence and evolution model // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. V. 167, No. 167. P. 102815. DOI 10.1016/j.coldregions.2019.102815.