

УДК 631.459.43

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЕЛЕЙ В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ ЧУКОТКИ

© 2023 г. Ю. В. Генсировский^{1,*}, В. А. Лобкина¹, А. А. Музыченко¹,
Л. Е. Музыченко¹, М. В. Михалев¹, Н. Н. Ухова²

¹ Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Сахалинский филиал, Южно-Сахалинск, Россия

² Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

*e-mail: gensirovskiy@mail.ru

Поступила в редакцию 09.11.2022 г.

После доработки 02.03.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2023 г.

Сели повсеместно наблюдаются в горах Чукотки, где их распространение и характеристики во многом определяются вечной мерзлотой. Мы использовали данные полевых исследований 2019 г. и ГИС-анализ ЦМР для оценки вероятности увеличения частоты формирования селей в континентальных и прибрежных районах Чукотки в связи с текущими изменениями климата.

Ключевые слова: Арктика, Чукотка, изменения климата, сель, мерзлота

DOI: 10.31857/S2076673423020060, **EDN:** RUGATZ

ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия исследований в Российской Арктике напрямую связаны с ресурсным потенциалом этой территории. Освоение месторождений полезных ископаемых охватывает всё большие площади. Помимо нефтегазовой отрасли с сопутствующей инфраструктурой развиваются горнодобывающая и перерабатывающая промышленности на рудных месторождениях. Металлы добываются как карьерным, так и шахтным способами. Производство и первичная переработка в районах извлечения полезных ископаемых приводят к расширению существующей и возведению новой жилищной и хозяйственной инфраструктуры. Кроме того, с 2021 г. действует правительственная программа, предлагающая гражданам Российской Федерации взять в пользование “Арктический гектар”, который можно использовать и для строительства индивидуального жилья, и для предпринимательской деятельности. Результатом этого становится вовлечение в хозяйственный оборот ранее неиспользованных территорий.

При освоении горной территории Арктики увеличиваются риски возникновения опасных экзогенных геодинамических процессов, связанных с геологическими, геокриологическими и климатическими особенностями региона. Одно из таких широко распространённых опасных явлений — сели, которое до сих пор недостаточно

изучено. Первые исследования селевых процессов в Российской Арктике начались в 1970-х годах. Данные этих исследований нашли отражение в выпущенной мелкомасштабной карте селевых районов СССР (Флейшман, Перов, 1986). В дальнейшем проводились эпизодические наблюдения за селевыми процессами и поступали отрывочные сведения о формировании селей. В 2008 г. в состав Национального атласа России (<https://nationalatlas.ru>) вошла карта селей масштаба 1:15000 000, где площадь селеопасной территории в Российской Арктике оказалась больше по сравнению с прежней версией карты селей (Флейшман, Перов, 1986; Перов, 2012).

Проблема распространения селей в Арктике поднималась в работах (Gude, Scherer, 1998; Hestnes, 1998; Romanenko, 2018); характерные типы селевых потоков рассматривались в (Sarunova, Sarunov, 2004); картирование селей и расчёта их характеристик — в работе (Hestnes, 1998); прогнозирование схода широко распространённых в Арктике водоснежных потоков, сочетающих в себе характеристики снежных лавин и селей, в (Sidorova et al., 2001; Chernous et al., 2018).

Отмечено, что формирование селей на арктических территориях неоднократно приводило к ущербу во многих странах. Например, в 1969 г. публиковались материалы о сходе селей на севере Аляски около населённого пункта Умиат (Anderson et al., 1969). Массовый сход оползней и селей

неоднократно фиксировался на Шпицбергене (Норвегия) в районе Лонгйира; в 1972 г. выпадение 30.8 мм жидких осадков вызвало сход 80 селей (Larsson, 1982). Следующий случай массового образования селей отмечался 14–15 октября 2016 г. Причиной схода селей послужило наложение факторов теплого и дождливого лета, в результате которого максимальная толщина деятельного слоя достигла 1.0–1.5 м, и выпадения 18 мм осадков (Christiansen et al., 2016). В обоих случаях фиксировались завалы автодорог и повреждение объектов инфраструктуры.

Массовый сход селей отмечался недалеко от Абиску (север Шведской Лапландии) (Rapp, Nyberg, 1981). 23 июня 1979 г. выпадение 30–50 мм жидких осадков в районе Ниссунвагге вызвало сход около 200 селей. Следующий случай формирования селей был зафиксирован 20–21 июля 2004 г. в Латньявагге после выпадения около 72 мм жидких осадков в течение 48 ч (Beylich, Sandberg, 2005).

Отмечается несколько случаев, когда селями перекрывалась автострада Аляска. Летом 1967 г. на нее сошел селевой поток в районе оз. Клуэйн (Юкон, Канада) (Hughes et al., 1972). В июле 1988 г. произошел массовый сход селей в том же районе (Evans, Clague, 1989), автострада Аляска была блокирована в восьми местах. Наиболее крупным потоком был перекрыт 500-метровый участок трассы; в это же время автострада была блокирована селевыми потоками на шести участках в районе оз. Мунчо (Британская Колумбия, Канада). Во всех случаях причиной схода селей послужило выпадение большого количества осадков.

На территории Северной Исландии (Исафьордюр) зафиксирован сход 6 селей в период с 10 по 12 июня 1999 г. Формирование селевых потоков стало следствием резкого повышения температуры воздуха до 14–17°C, которое вызвало интенсивное снеготаяние и привело к обводнению склонов. Отложениями были замыты 5 садов, канализационная система, автодороги и подвалы нескольких домов (Decaulne, Saemundsson, 2006).

В Российской Арктике формирование селей, наносящих ущерб, происходило неоднократно (Зюзин, 2006; Polar Bulletin, 2022; Snegohod..., 2022). Самой крупной селевой катастрофой считается сход водоснежного потока 5 июня 1991 г. на р. Кекурная (Чукотка). Причиной образования потока стало резкое повышение температуры воздуха, приведшее к интенсивному таянию снега. Сход селя привёл к гибели 8 человек и разрушению временных построек (Перов, 2012; Романенко, 2018). Ранее (9 июня 1984 г.), в этом же бассейне отмечалось формирование водоснежного потока, который снёс и засыпал автомобиль (Тибилев, 2007).

Как видно из перечисленных случаев, основная причина формирования селей в Арктике — переувлажнение грунтов дождевыми и талыми водами. Отсюда следует вывод, что основные факторы, ограничивающие распространение селей в этом регионе, — это климат с небольшим количеством жидких осадков и наличие многолетнемерзлых пород (далее — ММП). Однако вследствие комплексного воздействия климатических факторов температура ММП повышается, что отмечают многие исследователи (Стрелецкий и др., 2015; Hjørt et al., 2018; Biskaborn et al., 2019).

Мониторинговые наблюдения, проводимые в российской Арктике, в том числе в рамках Международной программы по циркумполярному мониторингу деятельного слоя (CALM) и Международного проекта по термическому состоянию вечной мерзлоты (GTN-P), показывают опускание кровли ММП (Стрелецкий и др., 2015) и увеличение мощности сезонноталого слоя. Оттаивание мерзлоты приводит к появлению в селевых бассейнах дополнительного объёма воды, вдобавок к влаге, поступающей с выпадающими жидкими осадками. Увеличение количества влаги, накапливаемой в грунтах, в дальнейшем будет снижать их несущую способность, что приведёт к росту числа случаев формирования селей и оползней на территории, а также к изменению характеристик этих процессов.

Цель работы — изучение условий формирования селей в зоне распространения ММП в меняющемся климате на примере двух селеопасных районов Чукотки. Для данного исследования авторами учтены такие параметры селевых бассейнов, как абсолютные высоты, углы и экспозиции склонов, наличие четвертичных отложений и количество осадков. Оценка селевой деятельности в пределах изучаемой территории проводилась на основе данных полевых наблюдений, а также анализа картографического материала и ряда опубликованных статей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Районы исследования. Чукотский автономный округ расположен на северо-востоке России (рис. 1, а). По селевому районированию данная территория относится к холодной селевой зоне восточного региона Колымско-Чукотской области. Отличительным фактором, характеризующим селевой процесс в пределах этой территории, является сплошное распространение ММП, в зоне которого находятся более 90% территории Чукотки. Остальные 10% приходятся на зону прерывистого распространения ММП.

Ландшафтная структура горных областей достаточно однообразна и представлена тундровыми и мерзлотно-таежными ландшафтами. Гляци-

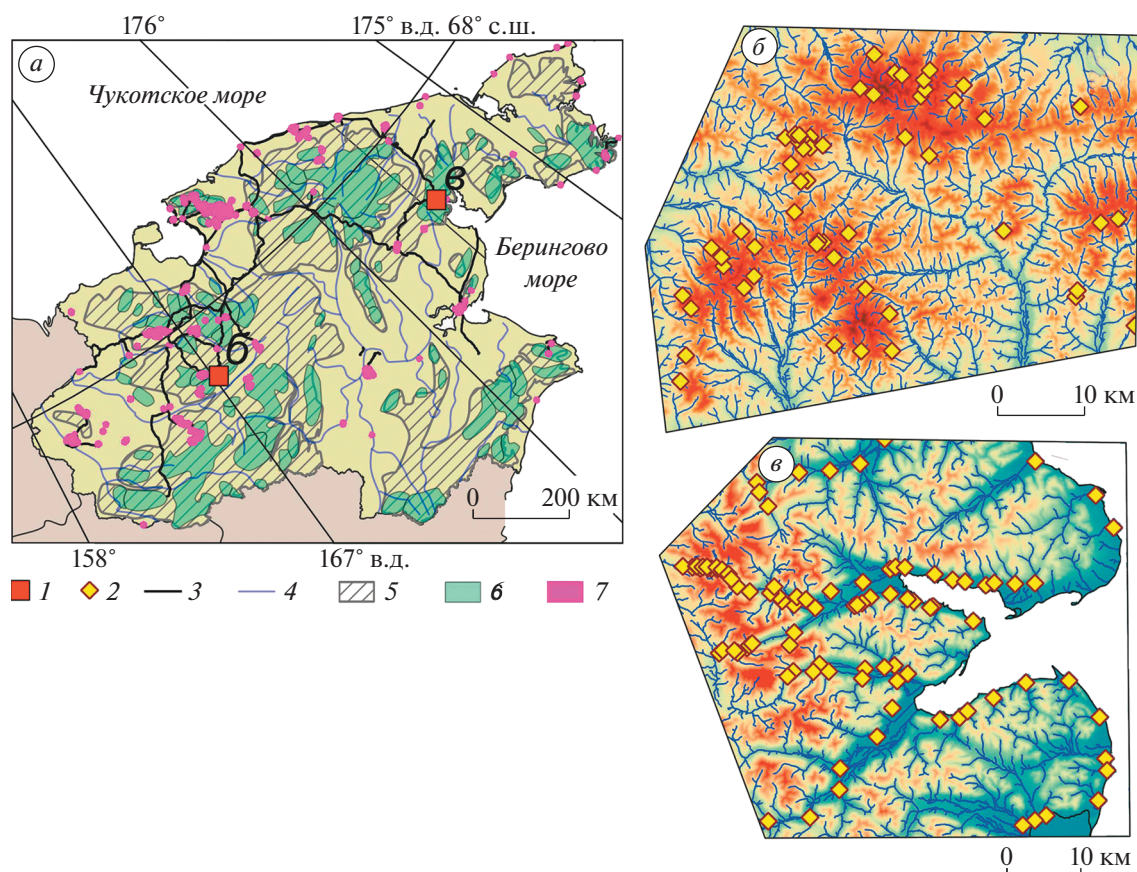


Рис. 1. Карта территории холодной селевой зоны Восточного региона с выделенной Колымско-Чукотской провинцией, характеризующейся повсеместным распространением многолетнемерзлых пород. Карта селевой опасности (а); “Континентальный” район (б); “Прибрежный” район (в): 1 – обозначение районов исследований; 2 – участки селепроявления; 3 – дороги; 4 – реки; 5 – селевая опасность территории по оценке СФ ДВГИ ДВО РАН; 6 – селевая опасность территории по данным Национального атласа России; 7 – объекты горнодобывающей промышленности.

Fig. 1. The map of cold mudflow Eastern region territory with selected Kolyma-Chukchi province characterized by ubiquitous permafrost distribution – map of mudflow danger (a); “Continental” area (b); “Coastal” area (c): 1 – study areas marks; 2 – mudflow localities; 3 – roads; 4 – rivers; 5 – mudflow danger of territory according evaluation of Sakhalin Branch of FEGI FEB RAS; 6 – mudflow danger of territory according the National Atlas of Russia data; 7 – mining industry sites.

ально-нивальные и гольцовые комплексы характерны для высоких хребтов с альпийским рельефом и кое-где сохранившимися современными ледниками, ниже которых господствуют каменисто-лишайниковые и мохово-лишайниковые тундры. Подгольцовый пояс образуют листовничные редколесья и заросли кедрового и ольхового стланика в сочетании с лишайниково-кустарничковыми тундрами (<https://nationalatlas.ru>).

В горах Чукотки много четвертичных отложений. Поступление твердого материала в селевые русла происходит за счёт развитых на бортах селевых бассейнов склонового крипа, солифлюкции, осыпей и обвалов. Накопленные в тальвегах коллювиальные и делювиальные отложения из щебня и дресвы при достаточном обводнении служат твердым материалом, переносимым селем.

В работе рассмотрены два района формирования селей. Первый, “континентальный” район, согласно физико-географическому районированию, расположен в пределах Северо-Восточной Сибири (<https://nationalatlas.ru>), в Анюйском нагорье (Анюйский хребет) (см. рис. 1, б). По морфологическим признакам рельеф территории относится к среднегорному; наивысшие отметки Анюйского хребта превышают 1700 м. В формировании среднегорного рельефа большую роль играют водно-эрозионные процессы. Горы прорезаны глубокими речными долинами. Глубина расчленения рельефа изменяется в пределах от 300 до 800 м. Приводораздельные поверхности по большей части преобразованы длительными процессами криогенной денудации, что отчётливо прослеживается в сглаженных формах гребней и уступов на склонах, смягчении очертаний дену-

дационных воронок (Север..., 1970), выполаживании участков склонов до 20–25°. Склоны покрыты глыбовыми осыпями и курумниками. ММП имеют повсеместное распространение. Мощность сезонноталого слоя на рассматриваемой территории может превышать 2.5 м (Котов, 2006; Егоров и др., 2022; www.permafrost.su).

Второй, “прибрежный” район селеобразования расположен в части Чукотки (хр. Искатень), относящейся к Северо-Притихоокеанской стране (<https://nationalatlas.ru>) — (см. рис. 1, в). Хребт Искатень имеет абсолютные отметки, превышающие 1300 м; характер рельефа — альпинотипный. Вершины острые, а гребни хребтов скалистые и узкие. Склоны, особенно южной экспозиции, глубоко расчленены и имеют большие уклоны, местами достигающие 60°. Наиболее яркая черта рельефа — распространение процессов криогенной денудации: морозного выветривания и смещения чехла рыхлых отложений вниз по склонам в виде курумников, солифлюкционных потоков и др., а также наличие моренных отложений. Кроме того, в пределах “прибрежного” района сохранились очаги современного оледенения, которые при таянии привносят дополнительную влагу в селевые бассейны (Седов, 1988; Ананичева, Карпачевский, 2016; www.glacru.ru). Разлит водно-эрозионный рельеф, характеризующийся узкими поперечными профилями речных долин, большим количеством денудационных воронок на склонах и широким распространением склонов крутизной 30–35°. Сезонное оттаивание ММП начинается в период с последней декады мая по первую декаду июня. Мощность сезонноталого слоя находится в пределах 0.8–2.0 м (Егоров и др., 2022; www.permafrost.su).

Выбранные районы различаются по физико-географическому и климатическому районированию (Север..., 1970; Рудич, 1985). В 2019 г. здесь проводились экспедиционные работы, в ходе которых выявлены следы прохождения как связных (грязекаменных), так и несвязных (наносоводных) селей, а также водоснежных потоков.

Климатические факторы селеобразования на изучаемой территории — температура воздуха и количество осадков. Среднегодовая температура воздуха в районах распространения ММП обуславливает мощность сезонноталого слоя, а количество осадков — это триггер селевого процесса (Larsson, 1982; Beylich, Sandberg, 2005; Christiansen et al., 2016; Генсировский и др., 2020). Ближайшие к исследуемым территориям метеостанции, имеющие длительный ряд наблюдений, — это Илриней и Эгвекинот. Первая характеризует условия “Континентального” района, а Эгвекинот — “Прибрежного”.

МЕТОДЫ

Оценка селепроявления в пределах исследуемых территорий выполнена на основе данных полевых работ, проведенных летом 2019 г., анализа картографических материалов и ряда опубликованных работ (Романенко, 2018; Генсировский и др., 2020; Заполярный вестник, 2022; Снегоход, 2022). Перед началом полевых работ, с использованием спутниковых снимков изучаемой территории (Esri World Imagery разрешением 0.31–1 м), была составлена карта фактического материала с дешифрированными селевыми бассейнами. Такие бассейны выделялись по таким признакам селевой деятельности, как эрозионные врезы в предполагаемых зонах зарождения селей, селевые валы в зонах транзита, конусы выноса. В ходе проведения полевых работ эта карта была уточнена и дополнена (см. рис. 1, б–в).

При полевых работах проводили описание селевых бассейнов, селевых конусов выноса, оценивали объём селей, дальность выброса, определяли уклон водотоков и ширину селеопасных зон. Характеристики, которые не представлялось возможным получить при полевых работах, уточняли по цифровой модели рельефа (далее — ЦМР) и спутниковым снимкам.

Карты селевой опасности изучаемой территории были созданы на основе ГИС в программе QGIS 3.10 Coruna. ЦМР ArcticDEM (<https://www.pgc.umn.edu>) с высоким пространственным разрешением 2 м — для получения некоторых характеристик селевых бассейнов (углы наклона и экспозиции склонов, абсолютная высота), которые значительно влияют на процесс селеобразования. Определён интервал значений углов наклона склонов в зонах зарождения селей для обоих изучаемых районов. Исходя из данных по экспозициям в растровой ЦМР, содержащих значения от 0 до 360° и выражающих отклонение направления склона от севера (0°) в направлении часовой стрелки, определяли экспозицию склонов для оценки метеорологических факторов, влияющих на селеобразование.

Сведения о четвертичных отложениях приводятся согласно данным Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (<https://www.vsegei.ru>). Использовали карту четвертичных отложений, которая показывает имеющийся в потенциальных селевых массивах материал.

Годовое количество выпадающих осадков рассчитано, исходя из высотного градиента, полученного при наблюдениях твёрдых и жидких осадков в горах Чукотки и представленного в работах (Рудич, 1985; Перов, 2012). Точкой отсчёта послужили данные выбранных для изучаемых районов метеостанций. Метеоданные обрабатывались ранговой корреляцией Спирмена. Стати-



Рис. 2. Селевые отложения в бассейне р. Орловка, относящиеся к Континентальному району: селевое русло, заполненное разновременными отложениями (а); отложения наносоводного селя, сошедшего в мае 2019 г. (б).

Fig. 2. The mudflow deposits in the Orlovka river basin related to “Continental” area: mudflow channel, filled with multi-temporal deposits (a); deposits of low density debris flow occurred in May 2019 (b).

стическая значимость корреляции устанавливалась с использованием таблицы Спирмена, показывающей критические значения, связанные с различными размерами выборки и уровнями достоверности. Для исследования был выбран уровень достоверности $p < 0.01$ и проведена проверка относительно него. Данные об инфраструктуре (дороги, жилые населенные пункты и промышленные объекты) взяты с (<https://www.openstreetmap.org>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

“Континентальный” район (далее – КР). Полевые исследования показали большую селевую активность на территории района. Обследованы селевые водотоки, относящиеся к верховьям бассейнов рек Большой и Малый Анюй. Следы прохождения селей отмечены на водотоках разного порядка (рис. 2).

Зоны зарождения селей находятся на высотах 800–1400 м; углы наклона склонов в этой зоне лежат в интервале 20–40°. В ходе полевых работ выяснено, что максимальные объёмы селей могут превышать 300 тыс. м³ (Генсиоровский и др., 2020). В долинах всех обследованных водотоков прослеживаются селевые валы и селевые русла разного возраста. Высота селевых валов изменяется от 1.0 до 3.5 м. Селевые отложения представлены щебнисто-галечной фракцией с включением глыб и валунов. Доля мелкозема в селевых отложениях достигает 10–15%. Ширина селеопасной зоны в узких V-образных долинах составляет 10–50 м. При выходе селей в корытообразные долины более крупных водотоков потоки распластаываются по конусам выноса, и ширина селеопасной зоны увеличивается до 100–200 м, при этом существенно снижается высота селевой волны – до 0.5–1.5 м. Формируются как связные (грязекаменные), так

и несвязные (наносоводные) сели, а также водоснежные потоки.

В пределах КР выделено 70 селевых бассейнов. Согласно карте четвертичных отложений 75% селевых бассейнов расположено в зоне распространения коллювиальных, гляциальных (моренных), десерпционных и солифлюкционных отложений, а оставшиеся 25% находятся полностью в зоне гляциальных (моренных) и гляциофлювиальных отложений. Среди склонов, на которых формируются сели (табл. 1), преобладают северные – 24% (17 бассейнов) и западные – 19% (13 бассейнов), что объясняется, в том числе, особенностями атмосферной циркуляции. Для этого района характерны северные ветры и субширотный перенос воздушных масс. Немногочисленные летние осадки, приводящие к увлажнению склонов северной экспозиции и формированию на них селей, связаны с вторжением арктических фронтов. Мощный летний антициклон, формирующийся над Восточной Сибирью, способствует притоку тёплых воздушных масс с запада, что вызывает оттаивание ММП на склонах западной экспозиции и поступление дополнительной влаги в грунты.

Ущерб от селей может выражаться в повреждении и разрушении участков автодорог (Анюйск–Билибино–Певек, Певек–Эгвекинот и др.), мостовых переходов, ЛЭП и других объектов, находящихся в селеопасной зоне. Наиболее серьезное воздействие может быть оказано селевыми потоками на горнодобывающие предприятия и их инфраструктуру.

“Прибрежный” район (далее – ПР). При полевых работах собраны данные о селевой деятельности в бассейнах рек Эрвыкиннотеем, Дорожная (рис. 3, а), Матачиная и их притоках, а также по всем водотокам, самостоятельно впадающим в залив Креста (Анадырский залив Берингова моря) в районе пос. Эгвекинот (см. рис. 3, б). Уста-



Рис. 3. Селеопасные участки в районе пос. Эгвекино́т: селевые отложения в русле р. Дорожная (а); мост через ручей Изыска́тский, частично очищенный от селевых отложений после схода селя 16 октября 2016 г. (б).
Fig. 3. The mudflow hazard localities near the Egvekinot settlement: mudflow deposits in Dorozhnaya river channel (a); bridge across the Izykskatskiy creek partially cleared from the mudflow deposits after 16 October 2016 event (b).

новлено широкое распространение селевых потоков на изучаемой территории. Зоны зарождения селей находятся на высотах 600–900 м, но по бортам долин названных рек широко развиты склоновые сели с высотой зон зарождения около 200 м. Сели выносят твёрдый материал в основные русла; как и в предыдущем районе, здесь формируются связные (грязекаменные), несвязные (наносоводные) сели и водоснежные потоки. Твердая составляющая грязекаменных селей состоит из супесчано-глинистого материала с примесью гальки и гравия, а также с включением валунов.

Ширина селеопасной зоны в V-образных долинах водотоков изменяется в пределах 30–60 м. Высота высшего селевого горизонта, определенная по меткам селей на борту притока р. Дорожная, составила 5.5 м. При выходе к морскому побережью и в широкие речные долины сели распластываются по конусам выноса, где ширина селеопасной зоны увеличивается до 150–250 м, при этом высота селевой волны снижается до 1.5–2 м. Максимальные объёмы селей могут превышать 300 тыс. м³ (Генсиоровский и др., 2020).

Авторами выделено 105 селевых бассейнов в ПР. Карта четвертичных отложений показала, что 60% селевых бассейнов расположены в зонах распространения коллювиальных, солифлюкционных и гляциальных отложений, остальные 40% – гляциальных (моренных) и аллювиальных. По результатам картирования селевых бассейнов в ПР установлено (см. табл. 1), что сели формируются на северных – 27% (28 бассейнов), южных – 23% (24 бассейнов) и восточных – 17% (18 бассейнов) склонах. В летний период для горных систем ПР характерны ветры северного (20–30%), южного (43–58%) и юго-восточного (4–8%) направлений. Воздушные массы, приносимые южными и юго-восточными ветрами, насыщены влагой, что способствует дополнительному увлажнению этих склонов, обводнению грунтов и формирова-

нию селевых потоков. Воздушные массы, идущие с северного направления, формируются над более теплой континентальной частью, вызывают повышение температуры воздуха, тем самым способствуя селеформированию.

В селеопасной зоне находится территория пос. Эгвекино́т, а также участки автодорог Эгвекино́т–Иультин и Певек–Эгвекино́т, теплотрасса, проложенная от тепловой электростанции в пос. Озерный до Эгвекино́та, ЛЭП, идущие вдоль перечисленных выше автодорог. Последний из известных случаев массового формирования селей в районе пос. Эгвекино́т отмечен в начале октября 2016 г., когда селевыми потоками были повреждены хозяйственные постройки и мостовые переходы в самом поселке, а за его пределами нарушено полотно автодороги, повреждены и замыты мостовые переходы (Генсиоровский и др., 2020).

Периоды селеформирования. Исходя из имеющихся данных, можно выделить два основных периода селеформирования. *Раннелетний* период формирования селей связан с началом интенсив-

Таблица 1. Распределение селевых бассейнов по экспозициям

Экспозиция склона	Район	
	континентальный	прибрежный
	количество/%	
N	17/24	28/27
NE	7/10	9/9
E	5/7	18/17
SE	8/11	5/5
E	7/10	24/23
SW	6/9	6/6
W	13/19	7/7
NW	7/10	8/8

ного снеготаяния, когда создаются условия для возникновения водоснежных потоков и мало-мощных, преимущественно, несвязных селей. Глубина захвата пород несвязными селями невелика, и обычно в потоки вовлекается каменно-осыпной материал, вынесенный в русло водотоков снежными лавинами и осыпями. В этот момент мощность выпавивания составляет 0.2–0.4 м и проходит несколько ниже верхней границы сезонноталого слоя.

Основной объём влекомого материала остаётся в зоне транзита. Конус выноса растекается широким шлейфом. Высота селевой волны в зоне транзита может достигать 1.3–1.5 м; мощность отложений составляет 0.3–1.0 м. Формирование такого типа селей, согласно имеющимся архивным данным, наиболее вероятно в период с мая по июнь. Возникновение водоснежных потоков обусловлено наличием скальных обнажений и многолетнемерзлых пород, на контакте с которыми происходит переувлажнение приземного слоя снежного покрова, перекрытого плотным метелевым снегом. Дальнейшее накопление влаги приводит к разрушению снежного пласта и переходу снега в текучее состояние. Другая причина образования водоснежных потоков – резкое увеличение температуры воздуха, вследствие чего снег начинает интенсивно таять. В результате талые воды прорывают снежные плотины в руслах водотоков, которые сформировались за счёт схода снежных лавин или метелевого переноса.

Летний период формирования селей связан с выпадением жидких осадков в период наибольшей толщины сезонноталого слоя. Этот период длится с июля по август. Выпадение жидких осадков служит триггером схода селей. Предварительное увлажнение грунтов происходит в процессе оттаивания сезонноталого слоя, таяния позднелетних снежников и водоотдачи с ледников. В этот период формируются крупные связные, наиболее опасные селевые потоки. Глубина захвата пород может достигать всей мощности сезонноталого слоя. В узких долинах высота селевой волны способна превышать 4 м; средняя мощность отложений достигает 1.5–3.0 м, а в отдельных случаях значительно превышает эти величины. Максимальные объёмы селей на территориях обоих рассматриваемых районов могут превышать 300 тыс. м³.

Анализ климатических изменений. В ходе обобщения и анализа имеющихся данных о температуре воздуха и осадках в исследуемых районах выявлен ряд закономерностей, характеризующих изменение этих параметров в течение рассматриваемого в работе периода. На рис. 4 представлен график изменения температуры воздуха, отчётливо показывающий постепенный рост среднесезонной температуры воздуха, усилившийся после 2000 г. В 1966–1999 гг. среднесезонная температура воздуха на метеостанции Илirianей

составляла -13.4°C и была на 1.8°C ниже, чем для периода 2000–2020 гг. (-11.6°C). На станции Эгвекинот за эти же периоды значения среднесезонной температуры воздуха составили -5.9 и -4.2°C соответственно.

Температура воздуха в селеопасный период (с мая по август) также достигала более высоких значений. Наибольший рост температуры в эти месяцы отмечен в 2000–2020 гг. Средние значения температуры воздуха в селеопасные периоды 1966–1999 и 2000–2020 гг. для станций Илirianей и Эгвекинот изменялись, соответственно с 7.1 до 8.5°C и с 5.9 до 6.9°C , т.е. температура по первой станции выросла на 1.4°C , а по второй – на 1.0°C (по материалам метеорологической базы данных АИСОРИ; <http://aisori-m.meteo.ru>).

Разница в росте температур между метеорологическими станциями объясняется их географическим положением. Станция Илirianей закрыта от морского побережья горными системами, в летний период здесь идет более интенсивный прогрев поверхности суши, что вызывает повышение средней и максимальной температуры воздуха. Станция Эгвекинот расположена в береговой зоне залива Креста. Холодное Берингово море, незначительно прогревающееся лишь к концу августа, определяет затяжную холодную весну и прохладное лето.

Таким образом, согласно имеющимся данным метеорологических наблюдений, можно говорить об устойчивой тенденции роста как среднегодовой температуры, так и температуры воздуха в селеопасный период. Общее повышение температуры приводит к увеличению толщины сезонноталого слоя как в днищах долин, так и в горных районах. Толщина сезонноталого слоя играет существенную роль в формировании селевых потоков на территории Арктики, так как служит естественным ограничителем вовлечения в сель горных пород (Генсиоровский и др., 2020). За последние несколько лет динамика изменения толщины сезонноталого слоя на Чукотке носила разнонаправленный характер, но в целом оставалась положительной (Маслаков и др., 2018). Таким образом, отмечается тенденция на отепление пород в потенциальных селевых массивах и, как следствие, ожидается увеличение объемов селей.

Количество осадков на метеостанции Илirianей уменьшилось. Однако если такое уменьшение осадков за период 1966–1999 гг. было средним ($R^2 = 0.361$, при уровне достоверности $p < 0.01$), то в период 2000–2020 гг. это уменьшение становится более медленным и имеет слабую тенденцию с $R^2 = 0.095$ при том же уровне достоверности $p < 0.01$ (рис. 5). Для селе-опасного периода количество осадков также имеет слабую тенденцию к снижению, разница между периодами незначительна: $R^2 = 0.115$ и $R^2 = 0.098$ (уровень достоверности $p < 0.01$). Для первого периода среднесезонное

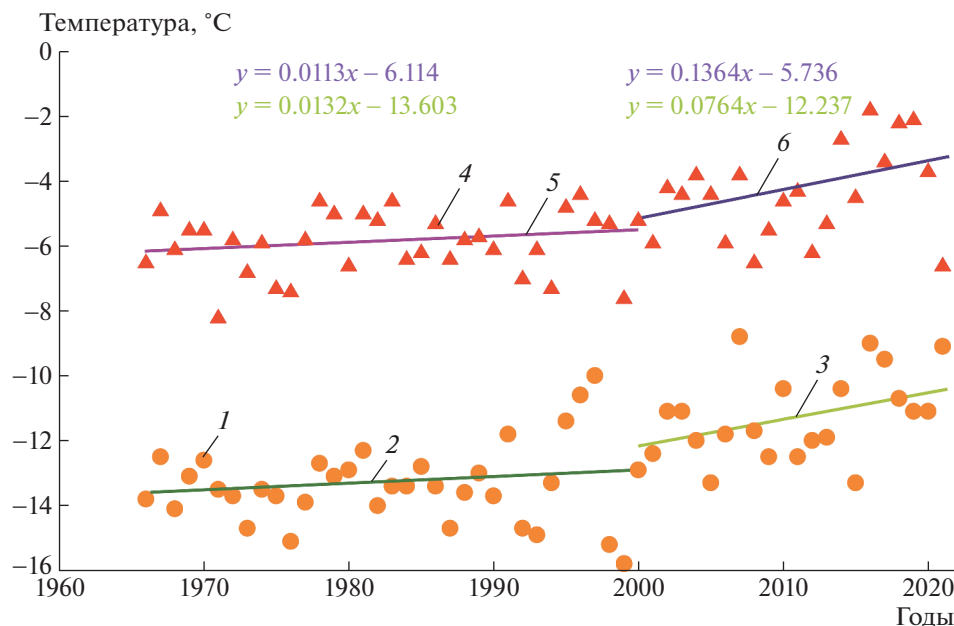


Рис. 4. Среднегодовые значения температуры воздуха и их линейные тренды для станций Илirней, Эгвекино́т (1966–2020 гг.): 1 – Илirней; 2 – линейный тренд с 1966 по 1999 г.; 3 – линейный тренд с 2000 по 2020 г.; 4 – Эгвекино́т; 5 – линейный тренд с 1966 по 1999 г.; 6 – линейный тренд с 2000 по 2020 г.

Fig. 4. Long-term average annual air temperature values and their linear trends at stations Ilirney, Egvekinot (1966–2020): 1 – Ilirney; 2 – linear trend from 1966 till 1999; 3 – linear trend from 2000 till 2020; 4 – Egvekinot; 5 – linear trend from 1966 till 1999; 6 – linear trend from 2000 till 2020.

значение количества осадков составляет 106 мм, а для второго – 64 мм, по данным АИСОРИ (<http://aisori-m.meteo.ru>).

Для станции Эгвекино́т существует слабая тенденция к росту осадков. Значение этого параметра начало увеличиваться в 2000–2020 гг. ($R^2 = 0.161$, при уровне достоверности $p < 0.01$) (см. рис. 5). В селеопасный период количество осадков также медленно увеличивается, при этом их среднегодовое значение, по данным АИСОРИ (<http://aisori-m.meteo.ru>), за период 1966–1999 гг. составляет 226 мм, а за 2000–2020 гг. – 231 мм,

Уменьшение количества жидких осадков на метеостанции Илirней говорит о том, что преобладающим типом останутся сели снегового происхождения. Однако об исключении возможности формирования дождевых селей говорить нельзя. Следует ожидать приток влаги в селевые бассейны за счёт таяния многолетнемерзлых пород вследствие роста температуры воздуха. В таком случае выпадение жидких осадков будет служить триггером образования селей. Средние и максимальные объёмы селей возрастут за счёт увеличения поступления материала со склонов в селевые русла.

Тенденция увеличения количества осадков на метеостанции Эгвекино́т обуславливает дополнительное увлажнение грунтов, что в совокупности с увеличением мощности сезонно-талого

слоя приведет к увеличению не только объёмов, но и частоты формирования селей. При этом будет расти доля селей дождевого происхождения. В настоящий момент считается, что на Чукотке преобладают сели снегового генезиса (Перов, 2012).

Мы проанализировали также многолетние данные о суточных максимумах жидких осадков в течение рассматриваемых периодов селеобразования, так как это – важнейший фактор возникновения селевых потоков. Такая оценка выполнена для селеопасного периода по закону распределения вероятностей; её результаты графически отображены на рис. 6. Все значения, превышающие 98-й перцентиль, показаны выбросами.

Для континентального района формирование селей, вызванных только жидкими осадками, в мае и июне представляется маловероятным. Можно говорить, что в июле и августе количество осадков выше 30 мм за сутки – селеформирующее. Однако за рассматриваемый период суточное количество осадков превысило 30 мм лишь дважды: 06.07.1984 – 30.9 мм и 25.08.1976 – 32.8 мм. В прибрежном районе вероятность формирования селей, вызванных жидкими осадками, значительно выше. Если также принять, что селеформирующим является количество осадков выше 30 мм за сутки, то наиболее опасными представляются июль и август, когда отмечено 16 (максимум

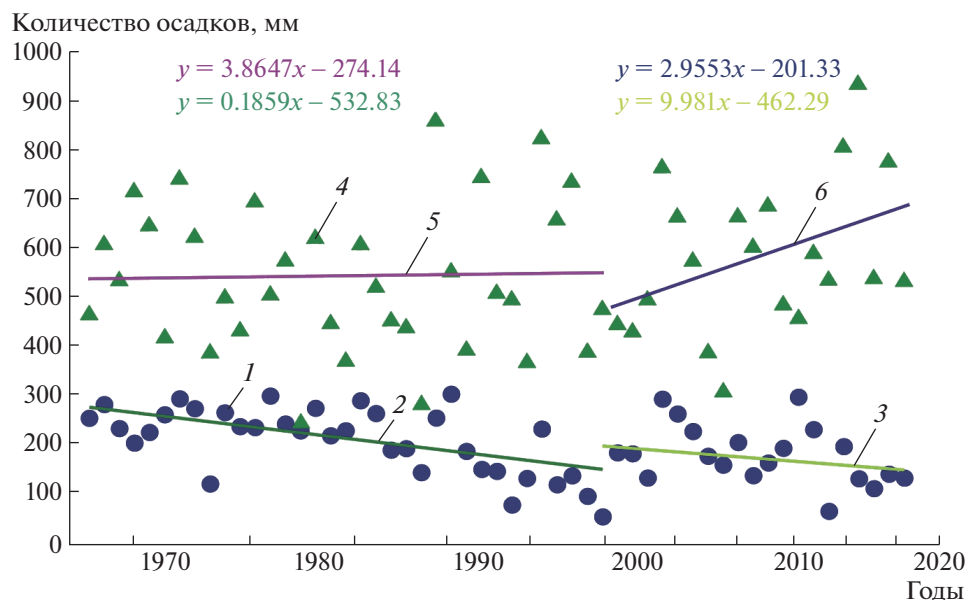


Рис. 5. Среднегодовые значения количества осадков и их линейные тренды для станций Илирней, Эгвекино́т (1966–2020 гг.): 1 – Илирней; 2 – линейный тренд с 1966 по 1999 г.; 3 – линейный тренд с 2000 по 2020 г.; 4 – Эгвекино́т; 5 – линейный тренд с 1966 по 1999 г.; 6 – линейный тренд с 2000 по 2020 г.

Fig. 5. Long-term average annual precipitation quantity values and their linear trends at stations Ilirney, Egvekinot (1966–2020): 1 – Ilirney; 2 – linear trend from 1966 till 1999; 3 – linear trend from 2000 till 2020; 4 – Egvekinot; 5 – linear trend from 1966 till 1999; 6 – linear trend from 2000 till 2020.

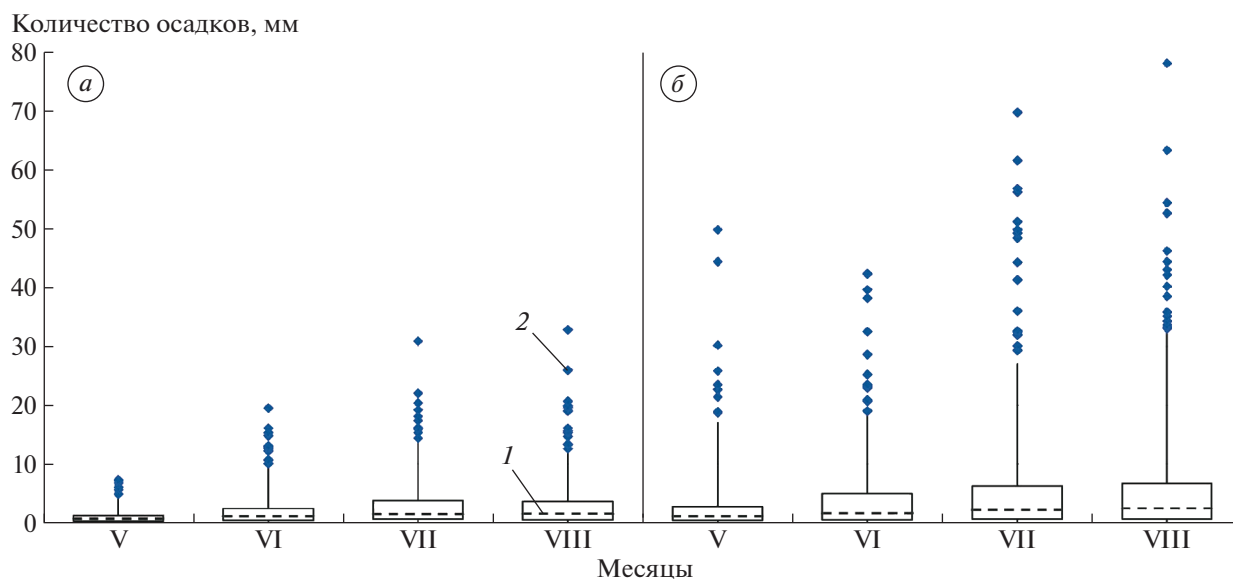


Рис. 6. Распределение суточного количества осадков в селеопасный период: а – Илирней; б – Эгвекино́т; 1 – медиана; 2 – экстремумы.

Fig. 6. Diurnal precipitation quantity distribution for mudflow dangerous period: а – Ilirney; б – Egvekinot; 1 – median; 2 – extremes.

16.07.2013 – 69.7 мм) и 26 (максимум 31.08.1998 – 78.1 мм) таких дней соответственно.

В редких случаях на территории прибрежного района грязекаменные сели формируются вплоть до октября. Это обусловлено принадлежностью района к Тихоокеанской области субарктическо-

го пояса, что обуславливает в осенний период возможность влияния на территорию тёплых циклонов, несущих обильные жидкие осадки, в то время как в континентальном районе, относящемся к Сибирской области субарктического пояса (<https://nationalatlas.ru>), выпадение жидких осадков маловероятно.

ВЫВОДЫ

С 2000 по 2020 г. на Чукотке происходит устойчивый рост среднегодовой температуры воздуха, которая увеличивается и в селеопасный период — с мая по август. Рост температуры в этот период в континентальном районе составил 1.4°C, а в приморском 1.0°C. Повышение температуры приводит к увеличению толщины сезонно-талого слоя как в днищах долин, так и в горах. Опускание кровли многолетнемерзлых пород способствует вовлечению в сели большего объема грунтов. Мощностно-сезонно-талого слоя многолетнемерзлых пород возрастает в результате его оттаивания, что вызывает дополнительное увлажнение грунтов в пределах селевых бассейнов.

Тенденции изменения количества осадков в селеопасный период в рассматриваемых районах разнонаправленны, но в целом эти изменения незначительны. Авторы разделяют мнение других исследователей (Перов, 2012) и также полагают, что селевые потоки снежного происхождения останутся преобладающим типом селей на Чукотке в ближайшем будущем. Тем не менее доля селей, вызываемых выпадением жидких осадков, будет постепенно увеличиваться в приморском районе.

При текущих тенденциях изменения климата на Чукотке можно ожидать увеличения количества связанных с селями инцидентов. Ущерб от селей будет выражаться в повреждении и разрушении автодорог, мостовых переходов, ЛЭП и других объектов, находящихся в селеопасной зоне. Наиболее серьезное воздействие селевых потоков будут испытывать горнодобывающие предприятия и их инфраструктура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананичева М.Д., Карпачевский А.М. Современное состояние ледников Чукотского и Колымского нагорий и прогноз эволюции ледниковых систем Чукотского нагорья // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2016. Т. 1. С. 64–83. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-1-64-83>
- Генсиоровский Ю.В., Лобкина В.А., Музыченко Л.Е., Музыченко А.А., Михалев М.В., Степнова Ю.А. Условия формирования селей на Северо-Востоке России // *Геориск*. 2020. Т. XIV. № 3. С. 68–76.
- Егоров Я.А., Бусыгина Е.Н., Рассказов А.А. Изменения мерзлотно-гидрогеологических условий в районе Билибинской АЭС на этапе её эксплуатации. Науч. портал “Атомная энергия 2.0” // *Электронный ресурс*. <https://www.atomic-energy.ru> (Дата обращения: 17.08.2022)
- Жюзин Ю.Л. Водоснежные потоки, в книге “Суровый лик Хибин”. Мурманск: Изд-во ООО “Рекламная полиграфия”, 2006. С. 182–197.
- Котов А.Н. Многолетнемерзлые породы. Природа и ресурсы Чукотки. Магадан: Изд-во СВНЦ ДВО РАН, 2006. С. 31–40.
- Маслаков А.А., Белова Н.Г., Баранская А.В., Романенко Ф.А. Пластовые льды на восточном побережье Чукотского полуострова при потеплении климата: некоторые итоги экспедиций 2014–2018 гг. // *Арктика и Антарктика*. 2018. № 74. С. 30–43.
- Перов В.Ф. Селеведение. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 272 с.
- Полярный бюллетень // *Электронный ресурс*. http://norilsk-zv.ru/articles/vodnye_momenty.html (Дата обращения: 19.08.2022)
- Романенко Ф.А. Селевые потоки на островах и побережьях арктических морей. Тр. 5-й Междунар. конф.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Тбилиси: Грузия, 1–5 октября 2018 г. / Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили. Тбилиси: Универсал, 2018. С. 521–528.
- Рудич К.Н. Тепло и холод Севера. М.: Изд-во Наука, 1985. 80 с.
- Сапунова Г.Г., Сапунов В.Н. Механизм и условия образования водо-снежных потоков ранневесенних оттепелей (на примере Хибин). В кн.: Снежные лавины, сели и оценка риска. М.: Изд-во МГУ, 2004. С. 59–71.
- Север Дальнего Востока / Ред. Н.А. Шилов. М.: Наука, 1970. 488 с.
- Седов Р.В. Ледники хребта Искатень. Материалы гляциологических исследований. 1988. Вып. 62. С. 129–133.
- Тибилев И.В. Благословенные времена презренного золота: чукотские были. СПб.: Дума, 2-е изд., доп., 2007. 544 с.
- Флейшман С.М., Перов В.Ф. Сели. М.: Изд-во МГУ, 1986. 126 с.
- Черноус П.А., Волков А.В., Соколова Д.П. Прогнозирование возникновения водоснежных потоков. Тезисы докладов 5-й Междунар. конф. “Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита”. Тбилиси: “Универсал”, 2018. С. 624–630.
- Anderson D.M., Reynolds R.C., Brown J. Bentonite debris flows in Northern Alaska // *Science*. 1969. V. 164 (3876). P. 173–174. <https://doi.org/10.1126/science.164.3876.173>
- Beylich A., Sandberg O. Geomorphic effects of the extreme rainfall event of 20–21 July 2004 in the Latnjavagge catchment, northern Swedish Lapland // *Geografiska Annaler. Ser. A. Physical Geography*. 2005. V. 87 (3). P. 409–419. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2005.00267.x>
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetz L.J. Permafrost is warming at a global scale // *Nat. Commun.* 2019. V. 10. P. 264–275.
- Decaulne A., Sæmundsson P., Petursson O. Debris flow triggered by rapid snowmelt: a case study in the Gleiarhjalli area, northwestern Iceland // *Geografiska Annaler. Ser. A. Physical Geography*. 2005. V. 87 (4). P. 487–500. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2005.00273.x>
- Evans S.G., Clague J.J. Rain-induced landslides in the Canadian Cordillera, July 1988 // *Geosci. Canada*. 1989. V. 16. P. 193–200.

- Gude M., Scherer D. Snowmelt and slushflows: hydrological and hazard implications // *Annals of Glaciology*. 1998. V. 26. P. 381–384.
- Hestnes E. Slushflow hazard – Where, why and when? 25 years of consulting and research // *Annals of Glaciology*. 1998. V. 26. P. 370–376.
- Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V., Nelson F., Etzelmüller B., Luoto M. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // *Nat. Commun.* 2018. V. 9 (1). P. 5147. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4>
- Hughes O.L., Rampton V.L., Rutter N.W. Quaternary geology and geomorphology, southern and central Yukon (N Canada) // *Proc. of the XXIV Intern. Geological Congress*. Montreal, Canada, 1972. P. 374.
- Larsson S. Geomorphological effects on the slopes of Longyear Valley, Spitsbergen, after a Heavy Rainstorm in July 1972 // *Geografiska Annaler. Ser. A. Physical Geography*. 1982. V. 64 (3–4). P. 105–125. <https://doi.org/10.2307/520639>
- Rapp A., Nyberg R. Alpine debris flows in Northern Scandinavia. Morphology and dating by lichenometry // *Geografiska Annaler. Ser. A. Physical Geography*. 1981. V. 63 (3–4). P. 183–196. <https://doi.org/10.2307/520831>
- Sidorova T., Belaya N., Perov V. Distribution of slushflows in Northern Europe and their potential change due to global warming // *Annals of Glaciology*. 2001. V. 32. P. 237–240. <https://doi.org/10.3189/172756401781819742>
- snegohod.org // Электронный ресурс. https://snegohod.org.ru/html/articles_science_05.htm (Дата обращения: 03.09.2022)
- Streletskiy D., Anisimov O., Vasiliev A. Permafrost degradation, in *Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters*. USA, New York: Elsevier, 2015. P. 303–344.

Citation: Gensiorovskiy Yu.V., Lobkina V.A., Muzychenko A.A., Muzychenko L.E., Mikhalev M.V., Ukhova N.N. The influence of climate changes on mudflow formation in permafrost areas: a case study for Chukotka Peninsula. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (2): 271–282. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423020060

The Influence of Climate Changes on Mudflow Formation in Permafrost Areas: a Case Study for Chukotka Peninsula

Yu. V. Gensiorovskiy^{a, #}, V. A. Lobkina^a, A. A. Muzychenko^a, L. E. Muzychenko^a, M. V. Mikhalev^a, and N. N. Ukhova^b

^a Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Sakhalin Branch, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

^b Institute of the Earth's Crust of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

[#]e-mail: gensiorovskiy@mail.ru

The factors influencing the formation of mudflows in areas of the permafrost are considered. The data of studies performed in two regions of Chukotka – “Continental” (the Anyuysky ridge) and “Coastal” (the Iskaten ridge) were used for this research. The air temperature data series obtained in Chukotka in 2000–2020 demonstrate a steady growth of the average annual values. The air temperature rise estimated for the mudflow–dangerous period (June–August) amounted 1.4°C for the “Continental” area, and 1.0°C for the “Coastal”. This warming affects thickness of the seasonal melt layer of permafrost, mainly in the bottoms of valleys and on the slopes of mountains. This factor promotes the involvement of certain volumes of ground into mudflows. As a result of the research, it was found that the dynamics of the change in the thickness of the seasonal melt layer within the studied areas is positive, which is a consequence of warming and leads to additional moistening of grounds. The two periods of the mudflow formation were identified. During the first one (May–June), the mudflow formation is connected with the onset of intensive snowmelt that is favorable mainly for snow-water streams and loose mudflows. In the second period (July–August), mudflows are mostly caused by liquid precipitations, when the maximum thickness of seasonal melt layer is reached. It is the second period when a release of a large cohesive mud stream is the most probable. On the whole, the results obtained allow making a conclusion that in the near future the predominant type of mudflows in Chukotka will remain those of snow genesis. But, at the same time, under conditions of the climate change, occurrence of the snow-water mud streams will increase, especially in the “Coastal” area.

Keywords: Arctic, Chukotka, climate change, mudflow, permafrost

REFERENCES

- Ananicheva M.D., Karpachevskiy A.M. Current state of the Kolyma and Chukchi glaciers and projection of the evolution of Chukchi Highlands' glacial systems. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2016, 1: 64–83 [In Russian]. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2016-1-64-83>

- Gensiorovskiy Yu.V., Lobkina V.A., Muzychenko L.E., Muzychenko A.A., Mikhalev M.V., Stepnova Yu.A.* Debris flow formation conditions in the north-east of Russia. *Georisk. GeoRisk World*. 2020, XIV (3): 68–76 [In Russian].
<https://doi.org/10.25296/1997-8669-2020-14-3-68-76>
- Egorov Ya.A., Busygina E.N., Rasskazov A.A.* The change of permafrost-hydrogeological conditions around the Bilibino Nuclear Power Plant at the stage of its operation, The Scientific portal “The Atomic Energy 2.0”. Retrieved from: <https://www.atomic-energy.ru> (Last access: 17 August 2022). [In Russian].
- Zyuzin Y.L.* *Vodosnezhnye potoki, in Surovyj Lik Hibirin*. The slushflows, in Harsh Face of Khibin. Murmansk: Advertising printing, 2006: 182–197. [In Russian].
- Kotov A.N.* *Mnogoletnemerzlye porody. Priroda i Resursy Chukotki*. Permanently frozen ground, in the nature and resources of Chukotka. Magadan: FEB RAS North-Eastern Research Center, 2006: 31–40 [In Russian].
- Maslakov A.A., Belova N.G., Baranskaya A.V., Romanenko F.A.* The embedded ice of the eastern Chukotka Peninsula coast in conditions of climate warming: some results of expeditions in 2014–2018. *Arktika i Antarktika*. Arctic and Antarctic. 2018, 74: 30–43 [In Russian].
<https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.4.28528>
- Perov V.F.* *Selevedenie*. The mudflow studies. Moscow: MSU, 2012: 272. [In Russian].
- Polar Bulletin. Retrieved from: http://norilsk-zv.ru/articles/vodnye_momenty.html (Last access: 19 August 2022). [In Russian].
- Romanenko F.A.* *Celevye potoki na ostrovah i poberezh'yah arkticheskikh morej*. Debris flows on the islands and coasts of the Arctic seas. Proceedings of the 5th International Conference Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection, Tbilisi, Georgia, 1–5 October 2018. Tbilisi: Publishing House “Universal”, 2018: 521–528 [In Russian].
- Rudich K.N.* *Teplo i holod Severa*. The warmth and coldness of the North. Moscow: Nauka, 1985: 80 [In Russian].
- Sapunova G.G., Sapunov V.N.* *Mekhanizm i usloviya obrazovaniya vodosnezhnykh potokov rannevesennih ottepelej (na primere Hibirin), in Snezhnye Laviny, Seli i Ocenka Riska*. Mechanism and conditions of slushflow formation during early-spring thaws (case study of the Khibiny Mountains), in Snow avalanches, mudflows and risk assessment. Moscow: MSU, 2004: 59–71 [In Russian].
- Sever Dal'nego Vostoka*. North of the Far East. Moscow: Nauka, 1970: 488 [In Russian].
- Sedov R.V.* *Ledniki hrehta Iskaten'. Materialy glyaciologicheskikh issledovanij*. Glaciers of the Iskaten Ridge. Data of Glaciological Studies. 1988. 62: 129–133 [In Russian].
- Tibilov I.V.* *Blagoslovennye vremena prezrennogo zastoia: Chukotskie byli*. Blessed times of despicable stagnation: Chukchi were. Sankt-Petersburg: Duma, issue 2, enlarged edition, 2007: 544 [In Russian].
- Fleishman S.M., Perov V.F.* *Seli*. The mudflows. Moscow: MSU, 1986: 126 [In Russian].
- Chernous P.A., Volkov A.V., Sokolova D.P.* *Prognozirovanie vozniknoveniya vodosnezhnykh potokov*. Slushflow release forecasting. Proceedings of the 5th International Conference Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection, Tbilisi, Georgia, 1–5 October 2018. Tbilisi: Publishing House “Universal”, 2018: 624–630 [In Russian].
- Anderson D.M., Reynolds R.C., Brown J.* Bentonite debris flows in Northern Alaska. *Science*. 1969, 164 (3876): 173–174.
<https://doi.org/10.1126/science.164.3876.173>
- Beylich A., Sandberg O.* Geomorphic effects of the extreme rainfall event of 20–21 July 2004 in the Latnjavagge catchment, northern Swedish Lapland. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*. 2005, 87 (3): 409–419.
<https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2005.00267.x>
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetz L.J.* Permafrost is warming at a global scale. *Nat. Commun*. 2019, 10: 264–275.
- Decaulne A., Sæmundsson P., Petursson O.* Debris flow triggered by rapid snowmelt: a case study in the Gleiarhjalli area, northwestern Iceland. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*. 2005, 87 (4): 487–500.
<https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2005.00273.x>
- Evans S.G., Clague J.J.* Rain-induced landslides in the Canadian Cordillera, July 1988. *Geos. Canada*. 1989, 16: 193–200.
- Gude M., Scherer D.* Snowmelt and slushflows: hydrological and hazard implications. *Annales of Glaciology*. 1998, 26: 381–384.
- Hestnes E.* Slushflow hazard – Where, why and when? 25 years of consulting and research. *Annales of Glaciology*. 1998, 26: 370–376.
- Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V., Nelson F., Etzelmüller B., Luoto M.* Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. *Nat. Commun*. 2018, 9 (1): 5147.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4>
- Hughes O.L., Rampton V.L., Rutter N.W.* Quaternary geology and geomorphology, southern and central Yukon (N Canada). *Proc. of the XXIV Intern. Geological Congress*. Montreal, 1972: 374.
- Larsson S.* Geomorphological effects on the slopes of Longyear Valley, Spitsbergen, after a Heavy Rainstorm in July 1972. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*. 1982, 64 (3–4): 105–125.
<https://doi.org/10.2307/520639>
- Rapp A., Nyberg R.* Alpine debris flows in Northern Scandinavia. Morphology and dating by lichenometry. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*. 1981, 63 (3–4): 183–196.
<https://doi.org/10.2307/520831>
- Sidorova T., Belaya N., Perov V.* Distribution of slushflows in Northern Europe and their potential change due to global warming. *Annales of Glaciology*. 2001, 32: 237–240.
<https://doi.org/10.3189/172756401781819742>
- snegohod.org. Retrieved from: https://snegohod.org.ru/html/articles_science_05.htm (Last access: 03 September 2022) [In Russian].
- Streletskiy D., Anisimov O., Vasiliev A.* Permafrost degradation. Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters. New York: Elsevier, 2015: 303–344.