

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ


На правах рукописи

МАСЛАКОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ИЗМЕНЕНИЕ МЕРЗЛОТНЫХ УСЛОВИЙ ПРИМОРСКИХ
РАВНИН ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ
ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ**

25.00.31 – Гляциология и криология Земли

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – *Конищев Вячеслав Николаевич*
Профессор, доктор географических наук,
- Официальные оппоненты** – *Веркулич Сергей Романович – доктор географических наук, ФГБУ «Арктический и Антарктический Научно-Исследовательский Институт», заведующий Отделом географии полярных стран*
- Васильев Александр Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, главный научный сотрудник*
- Котов Павел Игоревич – кандидат геолого-минералогических наук, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник*

Защита диссертации состоится «11» октября 2018 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.11.04 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д.1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: malyn2006@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/99072498/>
Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.11.04,
кандидат географических наук

 А.Л. Шныпарков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Регион Восточной Чукотки характеризуется выгодным географическим положением в плане перспектив развития крупных инфраструктурных объектов. В то же время, это удалённая и труднодоступная территория, в связи с чем современная и прогнозная динамика мерзлотных условий и связанные с ней экзогенные геологические процессы, определяющие устойчивость техногенных объектов, мало изучены. Влияние антропогенной нагрузки на многолетнемёрзлые породы в регионе, представленной береговыми поселениями коренных жителей, до сих пор изучено слабо. В связи с этим, инженерные сооружения на освоенных территориях региона испытывают негативное воздействие со стороны изменяющихся природных, в первую очередь, мерзлотных, условий.

Объектом исследования являются сезонноталый слой и верхние горизонты многолетнемёрзлых пород приморских низменностей Восточной Чукотки, а также криогенные процессы, протекающие в них.

Предметом исследования в работе является динамика характеристик состояния приповерхностной толщи мерзлых пород под воздействием определяющих её природных и антропогенных факторов.

Цель работы – оценка текущих и прогнозных изменений параметров многолетнемёрзлой толщи и сезонноталого слоя и интенсивности криогенных процессов Восточной Чукотки под воздействием природных и антропогенных факторов в масштабе нескольких десятилетий.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1) обобщение и анализ метеорологической информации и изучение прогнозных региональных изменений климата;
- 2) выявление природных факторов, определяющих геокриологические условия и интенсивность криогенных процессов в регионе;
- 3) изучение межгодовых и внутрисезонных флуктуаций параметров сезонноталого слоя (СТС) и верхних горизонтов многолетнемёрзлых пород по результатам режимных наблюдений;
- 4) оценка межгодовой интенсивности протекания наиболее типичных для региона – береговых эрозионных процессов в прибрежной криолитозоне;
- 5) оценка интенсивности антропогенной нагрузки на многолетнемёрзлые породы;
- 6) прогноз эволюции многолетнемёрзлых пород под воздействием природных и антропогенных факторов в обозримом будущем (2030 год).

Материалы, используемые в работе. В работе были использованы данные полевых исследований, анализа дистанционного зондирования, моделирования параметров теплообмена мерзлых толщ и криогенных процессов, полученные автором (2012-2016 гг.), открытые сведения, полученные на площадках Циркумпольного мониторинга деятельного слоя (CALM), а также фондовые материалы изыскательских организаций, предоставленные Администрацией Чукотского района ЧАО.

Личный вклад автора. В основу работы легли результаты полевых мерзлотных исследований: мониторинга температуры почвы, мощности слоя сезонного оттаивания, величины осадки и пучения, проективного покрытия растительного покрова, а также динамики процессов термоэрозии и термоабразии, проанализированных автором с применением различных методов в 2012-2016 годах. На основании полученного материала, с привлечением данных измерений, выполняемых в регионе по программе Циркумпольного мониторинга сезонноталого слоя (Circumpolar Active Layer Monitoring program – CALM) и находящихся в открытом доступе, анализа фондовых материалов инженерно-геологических изысканий, автором найдены взаимосвязи мерзлотных параметров в естественных условиях и на нарушенных территориях, а также выполнен прогноз динамики сезонноталого слоя и активизации криогенных процессов в природных условиях и при различной степени антропогенной нагрузки на ключевых участках региона Восточной Чукотки. Автором разработана методика оценки влияния мерзлотно-литологических и геоморфологических факторов на скорость разрушения морского берега и региональные особенности береговых процессов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Межгодовая вариация мощности сезонноталого слоя Восточной Чукотки на 83-97% определяется значениями летней температуры воздуха и количеством осадков. С начала XXI в. на фоне отсутствия статистически значимых трендов климатических характеристик, мощность СТС увеличивается со скоростью 0,7 см (1,1-1,4%) в год, чего не наблюдается на сопредельных территориях.
- 2) Скорость отступления берега на участке побережья Мечигменского залива выросла с 0,2 до 2,5 м/год за 1967-2014 гг. Изменился характер разрушения берега, что связано увеличением длительности безледного периода и ростом штормовой деятельности. Дифференциация скоростей отступления в пределах рассматриваемого участка связана с мерзлотно-литологической и морфометрической неоднородностью берега.

- 3) Техногенное воздействие на грунты оснований даже в пределах сельских поселений приводит к снижению уровня кровли мерзлых пород: глубина сезонного протаивания на территориях застройки в 2-3 раза больше, чем на окружающих ненарушенных территориях. Здания и коллектора коммуникаций, построенные в 1950-70-х гг., имеют под собой круглогодичные техногенные талики.
- 4) Прогноз развития мерзлотной обстановки в поселении Лорино показал, что к 2030 году рост мощности сезонноталого слоя по отношению к историческому периоду (1850-2006 гг.) в зависимости от сценария изменения климата составит 150-200%. Снижение несущей способности вмороженных свай, в зависимости от характера эксплуатации инженерных сооружений, будет достигать 70%, а рост сил морозного пучения – 90%.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) Получены новые данные о температурном, влажностном режиме и мощности СТС на приморских равнинах Восточной Чукотки, установлены факторы, динамика и тенденции их изменений.
- 2) Количественно охарактеризованы тенденции в динамике морского берега на репрезентативном участке берингоморского побережья Восточной Чукотки временным интервалом до 50 лет.
- 3) Установлены мерзлотно-литологические и морфологические характеристики берегов Восточной Чукотки, определяющие их размываемость. На основании размываемости определен вклад этих факторов в отступление берегов.
- 4) Установлены характер и степень антропогенного воздействия территорий поселений коренных народов Крайнего Севера, ведущих традиционное хозяйство, на состояние мёрзлых пород.
- 5) Разработаны сценарии изменения природных и антропогенных факторов, определяющих состояние мерзлых пород. Определены возможности адаптации сельского поселения к изменению мерзлотной обстановки.

Практическая значимость исследования. Сведения о текущей и прогнозной динамике параметров многолетнемёрзлых пород и интенсивности криогенных процессов, позволят учесть фактор меняющейся природной среды и эффективно проводить безаварийную эксплуатацию существующих и строительство проектируемых инженерных объектов в регионе. Результаты работы применялись для инвентаризации источников парниковых газов в сельских поселениях Арктики в соответствии с национальными обязательствами в Рамочной Конвенции по изменению климата ООН.

Апробация работы. Промежуточные результаты работы, а также основные положения диссертации докладывались и обсуждались на многочисленных российских и международных конференциях и семинарах: Научно-практическая конференция молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве» (Москва, 2011, 2012, 2013 гг.), Международный молодежный научный форум «Ломоносов» (Москва, 2011, 2012, 2013 гг.), «Международная конференция по криосфере: изменения, воздействия и адаптация» (Санья, КНР, 2012 г.), Международный конгресс «Экология северных территорий» (Новосибирск, 2013 г.), Научно-практической конференции «Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы» (Москва, 2013 г.), 4-й Европейская конференция по мерзлотоведению (Эвора, Португалия, 2014 г.), Арктическая научная неделя (Хельсинки, Финляндия, 2014 г.), Семинар Европейского Космического Агентства по вечной мерзлоте (ESA – CliC – GTN-PIPA - DUE Permafrost workshop, Фраскати, Италия, 2014 г.), Арктическая научная неделя (Тояма, Япония, 2015 г.), Региональный конгресс Международного географического союза (Москва, 2015 г.), Арктические рубежи 2016 (Тромсё, Норвегия, 2016 г.), 11-я Международная конференция по мерзлотоведению (Потсдам, Германия, 2016 г.). По теме диссертации опубликовано 32 печатных работы, включая 3 в базах Scopus, WoS и RSCI.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (144 наименования) и 1 приложения. Материал работы изложен на 129 страницах машинописного текста, содержит 24 таблицы, 51 иллюстрацию.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю, д.г.н., проф. Конищеву В.Н., а также к.г.н. Краеву Г.Н. за всестороннюю помощь при проведении исследований и написании работы. Автор также выражает благодарность д.б.н. Замолодчикову Д.Г. и Зеленскому Г.М. за помощь в проведении полевых исследований, к.г.-м.н. Гребенцу В.И., д.г.-м.н., проф. Васильчуку Ю.К., Соколовой Л.А., к.г.н. Кизякову А.И., к.г.-м.н. Трегубову О.Д., к.г.н. Грищенко М.Ю. и к.г.н. Абрамову А.А. за помощь в получении и обсуждении промежуточных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, изложена научная новизна, показана практическая значимость исследования.

Глава 1. Физико-географическая характеристика и история геокриологических исследований Восточной Чукотки

В разделе 1.1 обозначаются границы изучаемого района, а также даётся его физико-географическая характеристика. Восточная Чукотка – это часть Чукотского полуострова, которая омывается Чукотским морем с севера, и Беринговым морем с востока и юга. За западную границу условно принята линия водораздела, проходящая по хр. Искатень Чукотского нагорья (Рисунок 1). Эта территория представляет собой низкое нагорье, сложенное мезозоидами, и окружённое участками приморских равнин (Рисунок 2). Область расположена в зоне субарктического и арктического морского климата. Лето пасмурное и прохладное ($t_{июл} +8..+10^{\circ}\text{C}$), зима длинная, умеренно холодная ($t_{январь} -24...-26^{\circ}\text{C}$). В речных долинах распространены типичные тундры, а на склонах и вершинах гор – лишайниковыми тундрами и гольцами.

Суровые природные условия определили сплошное распространение мёрзлых пород мощностью до 600 м и сформировали характерные геокриологические особенности в регионе: а) снижение температуры, возрастание мощности многолетнемёрзлых пород и уменьшение мощности сезонноталого слоя с юго-востока на северо-запад; б) прерывистость мерзлой толщи под влиянием русловых и термокарстовых процессов; в) распространение эпигенетически промёрзших плейстоценовых отложений, сформировавшихся под влиянием оледенений и морских трансгрессий, и голоценовых сингенетических мёрзлых пород; г) широкое распространение залежеобразующих льдов различного генезиса; ж) разнообразие криогенных процессов.

В разделе 1.2 описывается история геокриологических исследований на Чукотке. Первые геокриологические исследования здесь начали проводиться с 1935 г., когда Главным управлением Севморпути была организована Анадырская мерзлотная станция (АНИМС). Сотрудниками станции (П.Ф. Швецов, Н.А. Граве, В.М. Пономарев, И.А. Некрасов, А.С. Любомиров, Н.А. Тепкин, В.С. Кривощёков и др.) был проведён большой объём исследовательских работ в регионе.

Свойства многолетнемёрзлых пород Восточной Чукотки, их мощность и температурный режим анализируются в работах Н.А. Граве (1959), Б.И. Втюрина (1964), Ш.Ш. Гасанова (1969, 1980), В.Е. Афанасенко с соавторами (1989), Н.Ф. Колесникова и И.Р. Плахта (1989) и др. История формирования и стратиграфия



Рисунок 1. Карта-схема региона исследований (данные о распространении многолетнемёрзлых пород: <http://nsidc.org/data/ggd318.html>)

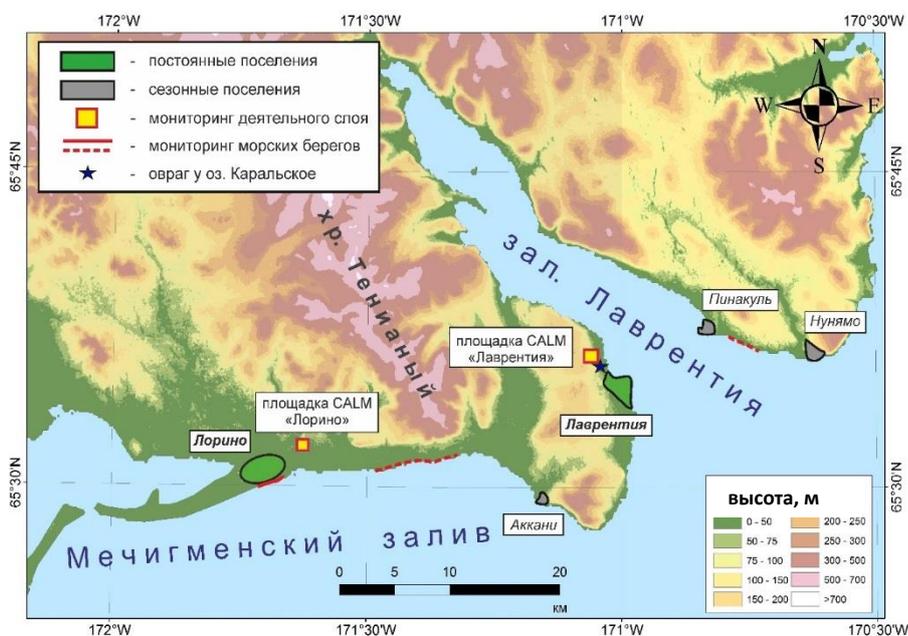


Рисунок 2. Карта-схема исследований динамики сезонноталого слоя и экзогенных процессов на Восточной Чукотке.

многолетнемёрзлых толщ подробно описаны в работах Ш.Ш. Гасанова (1969), А.А. Свиточа (1980) и В.Ф. Иванова (1982, 1986).

В 1988 г. в 15 км к югу от г. Анадыря был создан геокриологический стационар (полигон) Дионисия, на котором мониторинг

геокриологических условий проводится и по сей день (Котов, 1998), что делает его самым старым из действующих на Чукотке. В 1990-х гг. в рамках программы Циркумпольного мониторинга сезонноталого слоя

(CALM) вблизи г. Анадыря А.Н.

Котовым были заложены режимные наблюдения за глубиной сезонного протаивания. Воздействие антропогенной деятельности на состояние многолетнемёрзлых пород в

регионе изучается сотрудниками Северо-восточного комплексного научно-исследовательского института (СВКНИИ ДВО РАН) на территории г. Анадыря и в его окрестностях.

В начале 2000-х на Восточной Чукотке, вблизи пос. Лаврентия был организован стационар «Лаврентия» (см. Рис. 2), на котором до сих пор проводится мониторинг параметров СТС и других природных характеристик. В его пределах располагается площадка CALM Лаврентия, отражающая условия слабодренированной мохово-осоковой тундры на суглинистом субстрате. В 2010 г. была обустроена площадка Лорино, расположенная на плоском торфянике, покрытом тундровым разнотравьем.

Глава 2. Изменение параметров сезонноталого слоя и верхних горизонтов многолетнемёрзлых пород

В главе представлены результаты исследования глубины сезонного протаивания пород, факторов определяющих её пространственно-временную изменчивость в регионе за период режимных наблюдений, а также прогноз изменения мощности сезонноталого слоя к 2050 г. по отношению к периоду 2000-2015 гг. Материалом для написания главы являются результаты непрерывных наблюдений за мощностью и температурой СТС в рамках программы CALM. На Восточной Чукотке расположены 2 площадки CALM: Лаврентия и Лорино (см. Рис. 1), для которых охарактеризованы природные условия и приводится методика проведения полевых измерений и камеральной обработки результатов.

Рассмотрено влияние климатических и эдафических параметров на годовой ход сезонного протаивания. Изучение термического режима СТС на площадках CALM Лаврентия и Лорино позволило установить, что максимальная глубина протаивания в году достигается по окончании тёплого сезона (период стабильных положительных среднесуточных температур воздуха и отсутствия снежного покрова), как правило, в начале октября. Связь температуры воздуха и глубины оттаивания хорошо описывает уравнение (1):

$$d_{th} = E \times \sqrt{DDT} \quad (1),$$

где d_{th} – средняя измеренная глубина сезонного протаивания по площадке, см; E – т.н. «эдафический фактор», определяющий глубину сезонного протаивания при определённых значениях тепловых потоков в почву, который зависит от растительного покрова, влажности, состава грунтов и т.д. (для Лорино он составил

1,9, для Лаврентия – 2,34); DDT – сумма положительных среднесуточных температур от начала сезона протаивания до момента проведения измерений ($^{\circ}\text{C}$).

Было установлено, что на протяжении второй половины XX века температура летних сезонов на Восточной Чукотке росла непрерывно, а на стыке столетий рост резко усилился, завершившись стабилизацией. Период стабилизации, фиксируемый на метеостанции Уэлен, начался с 2010-х гг., а в Providения – ещё в 1990-х. Полученные данные подтверждаются метеоданными и прямыми наблюдениями за динамикой глубин сезонного оттаивания на стационаре Дионисия (Анадырь), где рост мощности СТС, начавшийся в конце 1980-х гг., стабилизировался в 2004 году.

Влияние эдафических факторов на пространственное распределение глубин СТС было рассмотрено на примере площадки Лаврентия. Влажность приповерхностного слоя почвы (0-7 см) имеет положительный коэффициент корреляции с глубиной протаивания ($r < 0,4$; $n = 47$). Вклад толщины органогенного горизонта в формирование глубин протаивания отрицательный и меняется во времени: он минимален в начале и в конце сезона протаивания ($r = -0,3..-0,4$; $n = 56$) и максимален в середине ($r = -0,5..-0,6$; $n = 56$).

В разделе 2.4 подробно рассмотрена межгодовая вариация СТС на площадках CALM Восточной Чукотки с начала XXI века (2000-2015 гг.). Для оценки вклада ведущих факторов, влияющих на межгодовую динамику СТС, методом наименьших квадратов был проведён множественный регрессионный анализ и построены уравнения линейной регрессии для площадки Лаврентия (2) и Лорино (3), имеющие в целом, хорошие коэффициенты аппроксимации:

$$d = 1,458 \times \sqrt{DDT} + 0,604 \times W - 0,044 \times P_w - 10,05 \quad (2)$$
$$(R^2 = 0,83; n = 13; p < 0,001);$$

$$d = 1,995 \times \sqrt{DDT} + 0,012 \times P_s + 0,015 \times P_w - 6,57 \quad (3)$$
$$(R^2 = 0,97; n = 6; p < 0,001);$$

где d – максимальная глубина сезонного протаивания, м; DDT – индекс протаивания, $^{\circ}\text{C}$; W – влажность почвы, дол. ед.; P_w – зимние осадки, мм водн. экв.; P_s – летние осадки, мм.

Наибольший вклад (47-94%) в межгодовую динамику СТС на большинстве площадок вносит индекс протаивания (DDT). Осадки / влажность почвы являются вторым по значимости фактором (5-52%), при этом этот вклад может быть как положительным, так и отрицательным. В целом, показано, что наибольшую корреляцию СТС с метеорологическими характеристиками ($R^2 = 0,97$) имеет

площадка Лорино, представляющая условия супераквального ландшафта с относительно неглубоким протаиванием.

Изучение метеопараметров (количество осадков, температура воздуха) за 2000-2015 гг., полученных в результате измерения по метеостанциям Уэлен и Анадырь, а также в результате реанализа данных, не выявили значимых трендов за указанный период. В то же время по результатам полевых измерений для площадок мониторинга Восточной Чукотки наблюдается устойчивый (статистически значимый) рост СТС на протяжении всего периода наблюдений: 0,7 см/год для Лаврентия (2000-2015 гг.) и 2 см/год для Лорино (2010-2015 гг.). Рассчитываемая по уравнению (4) мощность СТС учитывает измеренную глубину сезонного протаивания и добавляет некоторую величину его приращения за счёт теплооборотов, поступающих в почву в период между датой проведения измерений и сроками начала заморозков (окончание периода сезонного протаивания).

$$d = d_{th} \sqrt{\frac{DDT_{max}}{DDT}}, \quad (4)$$

где DDT - сумма градусо-дней на момент проведения измерений с начала периода протаивания до момента измерений, °С; DDT_{max} - сумма градусо-дней за весь период протаивания, °С.

Скорректированные таким образом максимальные глубины сезонного протаивания демонстрируют межгодовой рост выше измеренного: 0,7 см, или 1,1% от всей глубины протаивания в год в Лаврентия, в то время как в виду сильной вариации значений и короткого периода наблюдений, статистически значимым тренд роста СТС для площадки Лорино считается только при $p = 0,42$ ($n = 6$) и составляет 0,7 см, или 1,4% в год.

Площадка CALM Лаврентия отличается устойчивым ростом глубин сезонного протаивания на протяжении 2000-2015 гг. По сравнению с сопредельными территориями Чукотки (район г. Анадыря), Восточной Якутии (низовья р. Колымы) и северо-запада Аляски (п-во Сьюард; м. Барроу), где согласно долгосрочным наблюдениям, после роста мощности СТС в 1990-х гг. наступила его стабилизация.

Основываясь на полученных сведениях о вариациях глубины сезонного протаивания на мониторинговых площадках Восточной Чукотки под воздействием природных факторов (регрессионный анализ), был выполнен количественный прогноз изменения мощности СТС к 2050 году. Использовалась климатическая модель MIROC-ESM, входящая в группу ансамблей моделей Всемирной программы исследований климата и имеющая хорошую сходимость с наблюдениями в Чукотско-Камчатском

регионе (Анисимов, Кокорев, 2013). Результаты вычислений показывают, что рост глубин сезонного протаивания для условий площадки Лаврентия к 2030 году относительно средних значений за период 2000-2015 гг. составит 17-19 см, а для Лорино (по сравнению со средними значениями 2010-2015 гг.) – 22-25 см. К середине XXI века изменение мощности СТС составит 21-29 и 27-37 см для площадок Лаврентия и Лорино соответственно. В целом, полученные значения согласуются с мелкомасштабными ансамблевыми прогнозами изменения толщины СТС в регионе (Анисимов, Кокорев, 2017).

Глава 3. Динамика экзогенных процессов

В главе проведён обзор влияния природных факторов на динамику наиболее интенсивных экзогенных процессов в изучаемом регионе: овражная термоэрозия, термоабразия, термоденудация и склоновые процессы. На примере ключевых объектов были проведены измерения скорости протекания этих процессов и определены современные тенденции их развития.

В разделе 3.1. рассматривается динамика отступления участка морского берега в пределах пос. Лорино. Изучен механизм разрушения отложений и выявлены ведущие факторы, определяющие пространственно-временную интенсивность деструктивных береговых процессов (термоабразия, термоэрозия, термоденудация, склоновые процессы). В основу анализа лёг собственный материал, собранный автором в процессе проведения полевых работ 2012-2014 гг., космические снимки GeoEye сверхвысокого разрешения (0,5 м), а также картографические материалы инженерных изысканий 1967-1992 гг. При помощи ГИС (ArcGIS) результаты геодезических измерений и архивные карты были наложены на космический снимок и получены скорости отступления бровки берегового обрыва длиной 700 метров за период 1967-2014 гг. Берег отступал со скоростью от 0,2 м/год за период 1967-79 гг. до 1,6 м/год за 2010-2014 гг. при средней величине 0,34 м/год (1967-2014 гг.). Ширина отступившего берега за 2013-2014 гг. превысила аналогичный показатель за 1967-1979 гг. (12 лет). Рост средней скорости отступления берега в последние годы, связан: в первую очередь с сокращением площадей морских ледяных покровов в Арктике в целом и в Беринговом море в частности (АСИА, 2005; Johnson & Eicken, 2016). Например, площадь сезонных морских льдов в Беринговом море в 2005-2015 гг. сократилась на 37% по сравнению с 1985-1995 гг. (<http://www.aari.ru/projects/ECIMO/index.php>), а 2000-е гг. считаются наименее ледовитым десятилетием за период инструментальных наблюдений (State of the Arctic..., 2011).

В виду неоднородности в строении и сложении береговых отложений, отступление изучаемого участка берега происходит неравномерно. Для определения вклада мерзлотно-литологических и геоморфологических факторов в дифференциацию скоростей разрушения береговых отложений было проведено исследование влияния литологии, криогенного строения и прочностных характеристик отложений на размываемость пород. Используя опубликованные материалы (Вялов, 1959; Бастраков, 1977; Шур и др., 1984; Жесткова и др., 1985; и т.д.) и результаты изучения отступления берега в пос. Лорино, в работе была разработана методика определения степени сопротивляемости берега разрушительному воздействию моря и был введён *нормализованный коэффициент размываемости* N [м³/Дж], основанный на *прочностном показателе размываемости* K_{np} (Ершов и др., 1982) и рассчитываемый по формуле (5):

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n K_{np\ i} \times h_i}{h+d} \quad (5),$$

где $K_{np\ i}$ – прочностной показатель размываемости пород для i -го слоя грунта; h_i – толщина i -го слоя грунта, соотносимая к толщине всего разреза; n – количество слоёв в разрезе; h – высота берегового уступа, d – ширина пляжа.

Вводимый параметр учитывает размываемость мёрзлых и талых пород, литологию отложений в береговом обрыве, а также морфометрические параметры берега. Наименьшие скорости отступления берега были характерны для высоты берегового уступа более 15 м, при ширине пляжа более 20 м, в обрывах сложенных гравелистыми и крупными песками, слабольдистыми глинами и суглинками. Сопоставление нормализованного показателя размываемости со скоростями отступления за период прямых измерений (2010-2014 гг.) по створам показал высокую корреляцию (Рис. 3), что доказывает успешную апробацию разработанного метода. Введённый коэффициент N основан на учёте параметров мёрзлых грунтов, получаемых в ходе стандартных инженерно-геокриологических изысканий и расчётными методами, поэтому его применение перспективно для оценок в других освоенных или перспективных к освоению участков прибрежной криолитозоны.

В разделе 3.2 проведён обзор природных факторов, определяющих вероятность возникновения и интенсивность протекания овражной термоэрозии в криолитозоне. Исследуемым объектом является овраг, расположенный примерно в 1 километре на С-3 от села Лаврентия. Он образовался в 2005 г. в результате дренирования Каральского озера (см. Рис. 2). Одной из основных причин, по которым произошёл спуск озера и, соответственно, развитие оврага, являются погодные условия летнего

периода 2005 года, который является самым дождливым за 2000-2015 г. (240 мм при средней величине 163 мм) и относительно тёплым ($DDT = 953^{\circ}\text{C}$ при средней величине 827°C). Совместное воздействие высоких летних температур и большого количества осадков привело к глубокому сезонному протаиванию, которое затронуло верхние льдистые горизонты многолетнемёрзлых пород, формирующих перемычку между озером и ручьём и защищавших озеро от дренирования. Решающую роль в начале катастрофического размыва отложений сыграл уровень воды в озере, повысившийся в результате выпадения большого количества осадков, который определил увеличившийся расход и, соответственно, эродирующую силу потока в ручье. Во время полевых работ в 2012 г. была проведена тахеометрическая съёмка

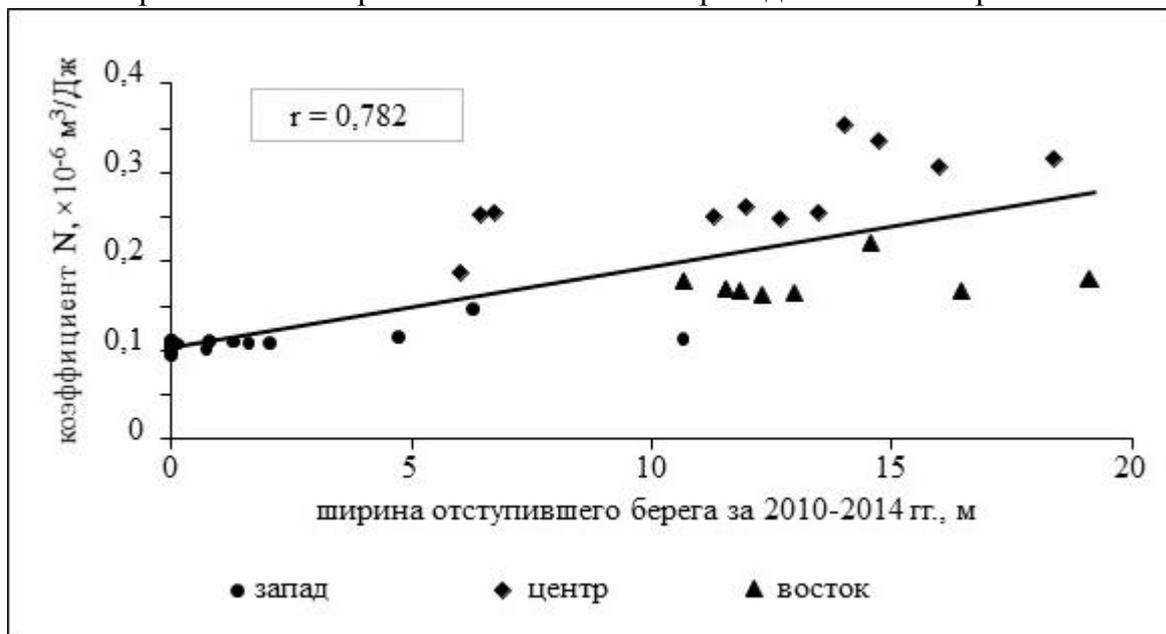


Рисунок 3. Корреляция между значениями ширины отступившего берега за 2010-2014 гг. для различных частей берега и нормализованным коэффициентом размываемости N ($n = 38$).

оврага и описание обнажений. Отложения, прорезаемые оврагом, в верховьях имеют высокую видимую льдистость, а в средней его части присутствуют пластовые льды. Вмещающие их породы состоят, в основном, из торфа и суглинистых отложений, которые в талом состоянии легко размываются, оставляя заметный шлейф взвеси в море. Высокая льдистость пород определила быстрый рост оврага: скорость отступления бровки в верхней части в 2012 г. (через 7 лет после образования) достигал 3 метров за 1,5 летних месяца. К 2016 г. рост оврага замедлился, т. к. мёрзлые отложения оказались погребены под слоем талого валунного суглинка.

Таким образом, полевыми и дистанционными методами было установлено, что скорость отступления участка морского берега в пос. Лорино выросла с 0,2 до 2,5 м/год за 1967-2014 гг. Природными факторами, определяющими общее увеличение

интенсивности береговых деструктивных процессов в криолитозоне, являются длительность безледного периода и, соответственно, повышенное количество штормов в этот период, в то время, как мерзлотно-литологические и геоморфологические определяют характер разрушения и дифференциацию скоростей отступления берега на локальном уровне. Овражная термоэрозия наиболее отчётливо проявляется в дождливые и тёплые летние сезоны, а интенсивность этого процесса зависит не только от состава и льдистости отложений, но и от наличия залежеобразующих подземных льдов в разрезе.

Глава 4. Антропогенное воздействие на многолетнемёрзлые породы

В главе проведена комплексная оценка антропогенного воздействия сельских поселений Восточной Чукотки на состояние ММП. Ключевым пунктом для исследований был выбран посёлок Лорино – крупнейший посёлок побережья региона с преобладанием коренных жителей Севера (около 1000 человек; gks.ru). В пределах поселения были выполнены геофизические измерения (Отчёт..., 2013), проведена типизация техногенных воздействий на многолетнемёрзлые породы, выполнено математическое моделирование температурного состояния грунтов под инженерными сооружениями, разработан прогноз развития инженерно-геокриологических условий и проведена оценка опасностей, связанная с возможной активизацией негативных криогенных процессов и явлений.

Посёлок стоит на останце ледниково-морской террасы высотой 15-25 м, сложенной в основном разнородными песками с присутствием полигонально-жильных льдов, которые перекрыты торфом или насыпным грунтом. Температура ММП в пределах застройки колеблется в широких пределах, однако основная их часть относится к низкотемпературным грунтам ($T_0 < -4^{\circ}\text{C}$). По данным георадиолокации, кровля ММП залегает на глубине 150-300 см, в зависимости от теплового воздействия сооружений и антропогенно изменённых территорий.

Все инженерные сооружения и территории в пределах поселения Лорино были классифицированы по степени теплового воздействия на многолетнемёрзлые грунты на 12 классов (Рис. 4): 1) котельные; 2) здания, построенные без учёта мерзлотного фактора; 3) коллектора и коммуникации; 4) здания, приподнятые над землёй, но без соблюдения норм; 5) дома с первыми прототипами холодных проветриваемых подполий (ХПП) 1960-70-х гг. постройки; 6) свалки; 7) здания 2000-х гг. постройки с организованными ХПП; 8) скопления снега по обочинам дорог; 9) пустыри, нарушенные территории, захламливаемые участки; 10) шеды зверофермы; 11) участки,

очищаемые от снега зимой; 12) холодные склады и заброшенные здания. С учётом 5 генерализованных типов литокриогенных оснований, встречаемых в поселении (на рисунке 4 выделены белыми линиями), всего было получено 40 подклассов (рангов – ячеек своеобразной «матрицы»), для каждого из которых был определен геокриологический разрез, преобладающий тип отложений СТС, путём моделирования проанализирована степень теплового воздействия на многолетнемёрзлые породы и, по результатам георадиолокационных измерений при помощи ГИС, рассчитана средняя по площади глубина сезонного протаивания.

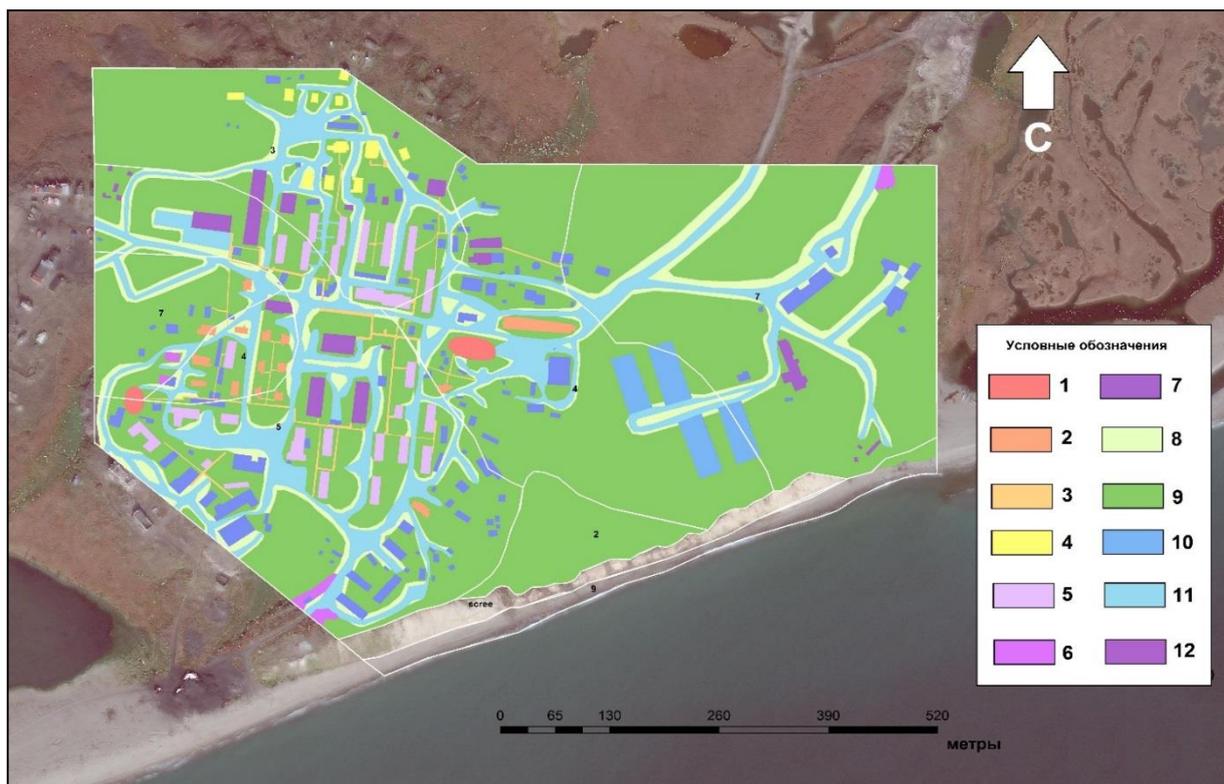


Рисунок 4. Классификация инженерных объектов и территорий в пос. Лорино (пояснения к легенде в тексте).

Глубина сезонного протаивания в пределах различных инженерных сооружений не зависит от их класса по степени тепловыделения: под котельными формируется сезонноталый слой, сопоставимый с фоновым, в то время, как на территориях мусороотвалов, он, в среднем, достигает 2,4 метра. Установлено, что аварии коммуникаций, сопровождающиеся утечками вод, и некорректная эксплуатация инженерных сооружений отражаются в увеличении глубин сезонноталого слоя и ведут к активизации негативных криогенных процессов, таких как пучение, термокарст, а также термоэрозия.

В разделе 4.3 выполнена постановка и решение двумерной нестационарной задачи теплопроводности с условием Стефана для температурного поля в пределах каждого из 40 рангов, выделенных в пределах поселения. Проведённые расчёты

сравнивались с результатами измерений мощности СТС по данным георадиолокационной съёмки. В программе qFrost были подобраны значения теплоточков для всех классов сооружений и для всех типов криолитологических разрезов таким образом, чтобы расчетное и измеренное положения кровли мерзлоты соответствовали. Расчёты показали, что под зданиями, построенными по II принципу (без учёта мерзлотного фактора) и под коллекторами коммуникаций (классы 2 и 3) присутствуют таликовые зоны, обнаружить которые при помощи полевых радиолокационных измерений не представлялось возможным ввиду физической ограниченности метода.

Текущее тепловое состояние грунтов в пределах инженерных сооружений пос. Лорино, было использовано как изначальные условия прогноза. Прогнозирование мерзлотных условий проводилось по 3 сценариям изменения климата (модель CESM1(WACCM)), основанных на изменении концентрации парниковых газов в атмосфере к 2100 году (IPCC..., 2013): а) RCP (Representative Concentration Pathways) 2.6; б) RCP 4.5 и в) RCP 8.5. Расчёты также учитывают 3 условия эксплуатации инженерных сооружений, определяющих величину теплового потока в грунты: 1) понижение температуры многолетнемерзлых пород и уменьшение мощности СТС вследствие принятия соответствующих технических мер и проведения мелиоративных мероприятий; 2) сохранение текущего режима эксплуатации объектов; 3) ухудшение текущего режима эксплуатации объектов. Базовыми климатическими характеристиками, относительно которых были проведены прогнозные расчёты, считаются нормированные температуры воздуха за исторический период (1850-2006 гг.). Таким образом, для сооружений, имеющих регламенты по строительству и эксплуатации (здания с ХПП и коллекторы коммуникаций), разработано 9 сценариев развития ситуации к 2030 году - сроку, до которого разработана стратегия развития поселения Лорино. Все расчёты и прогнозы выполнены на базовый период проведения исследований: 2013-2014 гг. Результаты моделирования представлены в Таблице 1.

Как показали расчёты, при существующих условиях эксплуатации (сохранении текущих параметров теплообмена с инженерными сооружениями) практически во всех классах наблюдается увеличение глубины сезонного оттаивания, местами даже в несколько раз (коллекторы коммуникаций демонстрируют увеличение слоя оттаивания с 1,6 до 3,6 м). Наибольшие изменения обнаружены под домами, построенными по II принципу (2 класс) и коллекторами канализаций (3 класс). Наименьшие изменения

зафиксированы под заброшенными домами и холодными складами, а также зданиями с холодными проветриваемыми подпольями.

Таблица 1. Сравнение расчётов сезонного протаивания при существующих климатических условиях и при трёх вариантах прогноза к 2030 г. (фрагмент).

№	Классы	Модель СТС при современных климатических параметрах, м	Модель СТС по RCP 2.6, м	Модель СТС по RCP 4.5, м	Модель СТС по RCP 8.5, м
I	Котельные	1,00	1,15	1,15	1,15
II	Здания по II принципу СНиП	4,50*	5,12*	5,12*	5,6*
III	Коллекторы коммуникаций	1,60	2,45	2,45	3,6
IV	Здания, имеющие небольшие зазоры между грунтом и перекрытиями	1,85	1,85	1,85	3,6
V	Здания с первыми ХПП	1,60	1,6	1,6	1,85
VI	Свалка	1,87	2,15	2,15	2,15
VII	Здания с современными ХПП	1,60	1,6	1,6	1,85
VIII	Снег у дорог	1,37	1,6	1,6	1,6
IX	Пустыри и нарушенные территории;	1,15	1,35	1,35	1,35
X	Звероферма	1,35	1,85	1,85	1,85
XI	Дороги, площади	1,37	1,6	1,6	1,6
XII	Заброшенные здания и холодные склады	1,60	1,6	1,6	1,6

* при данных условиях вероятно существование талика.

Результаты расчётов по второму и третьему вариантам режимов эксплуатации инженерных сооружений (соответственно нормализация и приведение к стандартам СНиП и СП) и дальнейшее ухудшение условий их теплообмена с грунтами оснований) приведены в Таблице 2.

Было установлено, что наибольший вклад в изменение глубин СТС имеет тепловое воздействие эксплуатируемых зданий и коммуникаций, а не климатические изменения: при умеренном климатическом сценарии средний прирост мощности СТС при ухудшении условий эксплуатации составит 139%, а при сохранении текущих условий эксплуатации – 13%. При отсутствии нарушений условий эксплуатации, т.е. сокращения теплового потока (ремонт или замена

коммуникаций, улучшение работы подполий и т. д.), увеличение мощности СТС будет незначительным (средний прирост СТС при умеренном сценарии составит 4%), либо вообще отсутствовать, а при наиболее благоприятном сценарии (RCP 2.6) местами будет наблюдаться даже уменьшение глубины сезонного протаивания. В то же время, при существующих условиях эксплуатации, только за счёт климатических изменений рост СТС под инженерными объектами составит 17-63%. При ухудшении условий эксплуатации рост СТС под сооружениями может вырасти в среднем на 1,6 метра, расширив существующие и, возможно, сформировав новые таликовые зоны. В совокупности, при негативном климатическом сценарии и ухудшении условий эксплуатации увеличение сезонного протаивания составит 150-200% от существующих значений.

Таблица 2. Результаты моделирования мощности СТС (м) по 3 вариантам условий эксплуатации и для трёх климатических сценариев к 2030 г. (фрагмент).

Характер эксплуатации в будущем		текущие условия			улучшение условий			ухудшение условий		
Классы	Текущие мощн. СТС	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
III. Коллекторы коммуникаций	1,6	2,45	2,45	3,6	2,15	1,85	2,8	3,2	3,2	4,1
IV. Приподнятые здания	1,85	1,85	1,85	3,6	1,85	1,85	1,85	4,6	5,1	5,1
V. Здания с первыми ХПП	1,6	1,6	1,6	1,85	1,35	1,6	1,6	3,2	3,6	4,1
VII. Здания с современными ХПП	1,6	1,6	1,6	1,85	1,6	1,6	1,85	4,1	4,1	4,6

Проведена оценка инженерно-геокриологических опасностей для существующих и проектируемых инженерных сооружений Лорино. В основу оценки был положен анализ опасностей, связанных с возможной активизацией негативных криогенных процессов и изменением мерзлотных условий. Для зоны застройки посёлка Лорино потенциальная опасность может возникнуть при активизации 3 типов негативных мерзлотных процессов и явлений: 1) изменение температуры ММП, ведущее к снижению несущей способности вмороженных свай; 2) сезонное пучение грунтов; 3) комплекс эрозионных процессов.

Несущая способность вмороженных в мёрзлое основание свай – комплексная характеристика, отображающая изменение глубины сезонноталого слоя и температуры многолетнемёрзлых пород. Проведённые расчёты текущих и

прогнозируемых значений этих параметров для каждого из выделенных мерзлотно-геологических разрезов в поселении Лорино позволили определить их пространственно-временную изменчивость, оценить опасность и представить полученные результаты в виде набора карт (Рис. 5). Снижение несущей способности

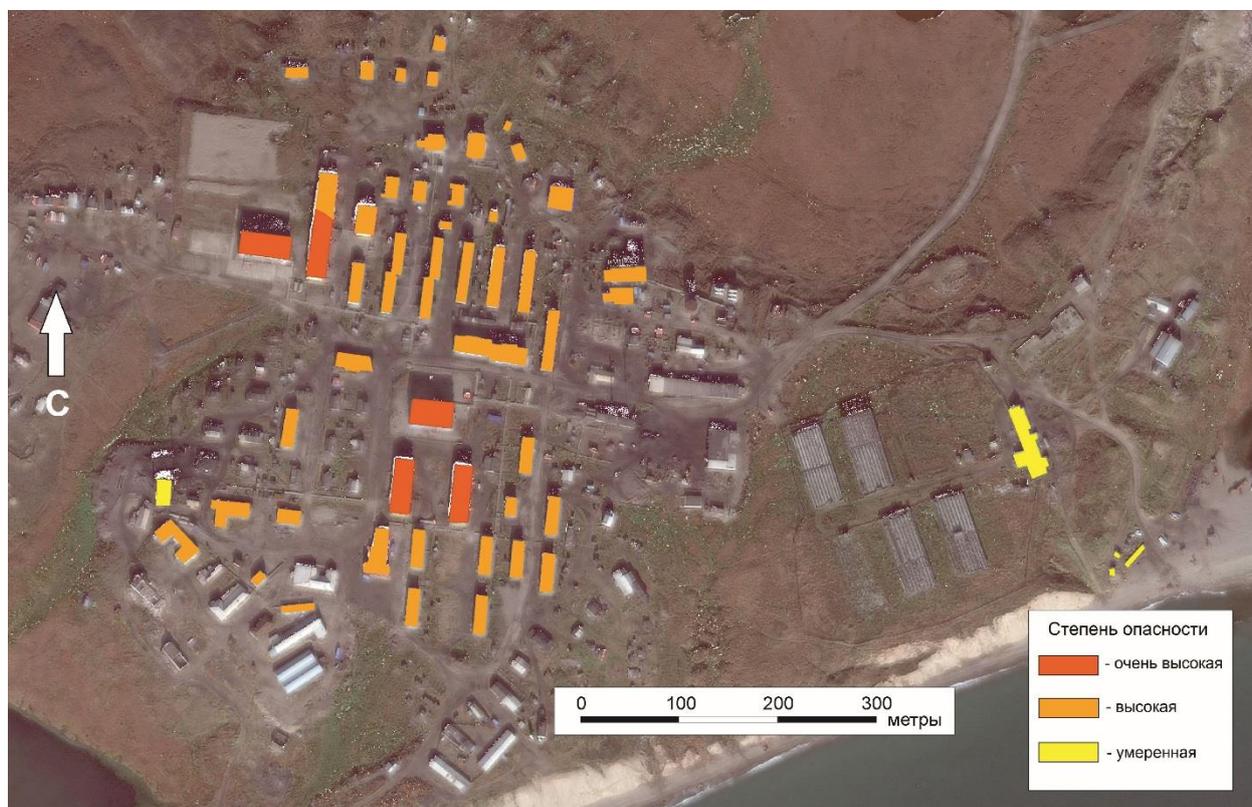


Рисунок 5. Карта-схема распространения опасности для существующих зданий, связанная с прогнозным изменением несущей способности вмороженных свай к 2030 г.

имеет минимальную и низкую опасность (снижение до 8%) лишь для сценариев RCP 2.6 и RCP 4.5 при улучшении или при существующих условиях эксплуатации. При развитии сценария RCP 8.5 только при текущих условиях эксплуатации (снижение несущей способности до 15%) опасность для инженерных сооружений становится умеренной. При ухудшении условий эксплуатации для всех климатических сценариев опасность, связанная с уменьшением несущей способности свай, становится очень высокой (50-70%). Опасность, связанная с ростом касательных сил морозного пучения при текущем режиме или улучшении условий эксплуатации, вне зависимости от климатического сценария, будет минимальной или вовсе отсутствовать. Совершенно другая ситуация при ухудшении условий эксплуатации – опасность при развитии любого климатического сценария будет высокой (рост сил морозного пучения будет достигать 90%). Оценка геокриологических опасностей в зоне хозяйственного освоения, связанных с уменьшением несущей способности вмороженных свай и увеличением касательных сил пучения показала, что степень

опасности зависит в большей степени от характера эксплуатации инженерных сооружений, а климатические изменения здесь играют второстепенную роль.

Для оценки опасностей, связанных с развитием криогенных процессов, был выполнен экспертный прогноз их минимального и максимального развития к 2030 г. Прогнозные скорости отступления берега и роста овражной сети составлялись из расчёта, что при наиболее положительном сценарии развития берег будет разрушаться с интенсивностью, которая наблюдалась в последние 4 года наблюдений (2010-2014 гг.), при этом рост овражной сети замедлится в связи с затрагиваемыми эрозией техногенными, менее подверженными размыву, грунтами. Негативный сценарий прогноза предусматривает дальнейшее сокращение ледовитости Берингова моря, рост летних температур воздуха и количества летних осадков (ИРСС, 2013). Согласно прогнозу, к 2030 г. берег отступит на 20-60 метров, при этом сооружения, расположенные на этом участке, будут уничтожены.

Таким образом, исследования, проведённые в поселении Лорино, выявили, что, несмотря на отсутствие промышленных предприятий и малочисленное население, антропогенное воздействие заметно сказывается на положении кровли и состоянии многолетнемёрзлых пород. Повсеместно на территории застройки наблюдаются повышенные значения глубин СТС, а тепловые расчёты показали наличие таликовых зон под некоторыми классами сооружений. Ансамбль прогнозов развития мерзлотной обстановки к 2030 году свидетельствует о заметном росте глубин сезонного протаивания и активизации негативных криогенных процессов и явлений при ухудшении условий эксплуатации инженерных сооружений. В зависимости от сценария изменения климата, рост мощности СТС будет достигать 150-200% (см. табл. 2), а снижение несущей способности вмороженных свай и рост сил пучения будут достигать 70 и 90% соответственно.

Заключение

В работе была проведена оценка современных и будущих изменений параметров многолетнемёрзлых толщ и СТС, а также интенсивности криогенных процессов на территории приморских равнин Восточной Чукотки под воздействием природных и антропогенных факторов. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- Межгодовая динамика максимальных глубин сезонного протаивания на мониторинговых площадках CALM Восточной Чукотки на 83-97% определяется суммой положительных среднесуточных температур и количеством летних и зимних осадков. Пространственное распределение мощности сезонноталого слоя зависит от влажности поверхностного слоя почвы и величины органогенного горизонта.

- Динамика глубины сезонноталого слоя за 2000-2015 гг. для площадки CALM Лаврентия демонстрирует статистически значимый рост (на 99%-м уровне вероятности) со скоростью 0,7 см/год, или 1,1%/год. Положительные изменения мощности СТС на Восточной Чукотке в 2000-15 гг. наблюдаются на фоне отсутствия трендов климатических характеристик.

- Региональный анализ изменения мощности сезонноталого слоя на стыке XX-XXI вв. выявил, что в отличие от изучаемого района, для площадок CALM на сопредельных территориях (Низовья р. Колымы, Анадырская низменность, северо-запад Аляски) характерен заметный рост глубин сезонного протаивания в период 1980-1990-х гг. (со скоростью до 1,7 см/год), завершающийся периодом стабилизации 2000-2010-х гг. Указанные вариации повторяют межгодовой ход средних температур воздуха тёплых сезонов, регистрируемых на ближайших метеостанциях.

- Прогноз изменения мощности СТС на мониторинговых площадках CALM Восточной Чукотки, проведённый на основе регрессионных моделей, показал повышение темпов роста глубины сезонного протаивания за период 2015-2030 гг. в среднем на 16-24 см, вслед за которым будет происходить их заметное замедление. Общий прирост мощности СТС к 2050 году составит 19-36 см, или 28-65% от средних величин за 2000-2015 гг.

- Интенсивность разрушения морских берегов, сложенных дисперсными мёрзлыми породами, выросла в последние годы. Исследования, проведённые в пределах ключевого участка берега в пос. Лорино, выявили, что в 1967-1979 гг. скорость отступления составляла 0,2 м/год, а в 2010-2014 гг. она возросла до 1,6 м/год. Причиной этих изменений является сокращение ледовитости Берингова моря, а также рост количества штормов в безледный период.

- На локальном уровне, при одинаковых гидродинамических условиях, дифференциация в скорости и характере разрушения берега определяется геоморфологическими и мерзлотно-геологическими (криолитологическими) факторами. Наименьшие скорости отступления берега характерны для относительно высоких берегов ($h > 15$ м) с широкими пляжами ($d > 20$ м), в отложениях которых

присутствуют породы с низкой степенью размываемости: гравелистые и крупные пески, слабоблистые глины и суглинки. Высокими скоростями отступания отличаются берега, в составе которых присутствуют льдистые торфяные и мелкопесчаные отложения, а также включения залежеобразующих льдов.

- Овражная термоэрозия наиболее активна в дождливые и тёплые летние сезоны, а интенсивность этого процесса зависит от состава и льдистости отложений, а также от наличия залежеобразующих подземных льдов.

- Геофизические исследования и моделирование установили, что глубина сезонного протаивания под различными инженерными сооружениями не зависит от степени тепловыделения в сельских поселениях Восточной Чукотки, а является индикатором эффективности эксплуатации объекта.

- Численное моделирование теплового состояния грунтов в поселении выявило существование техногенных таликовых зон под зданиями и сооружениями, построенными без принятия во внимание строительных норм (СП, СНиП), т. е. без учёта мерзлотного фактора.

- Прогноз изменения мерзлотной обстановки в поселении выявил возможные изменения глубины сезонного оттаивания и размеры таликов к 2030 году в зависимости от 3 сценариев изменения климата и 3 способов эксплуатации инженерных сооружений (всего 9 вариантов сценариев). Было установлено, что основной вклад в изменение мерзлотных параметров вносит степень техногенного воздействия, в то время, как влияние климатических изменений играет второстепенную роль. Рост СТС относительно текущих значений только при климатических изменениях составит 17-63%, в то время как при изменении характера эксплуатации – 0-139%. Приращение мощности СТС в совокупности, при наихудших сценариях, будет составлять 150-200% от современных значений.

- Анализ геокриологических опасностей, связанных с активизацией негативных криогенных процессов и явлений выявил, что по сравнению с современными условиями, снижение несущей способности вмороженных свай и рост сил пучения к 2030 г. будут достигать 70 и 90% соответственно. Выделена также прибрежная полоса шириной 20-60 м, которая будет разрушена эрозионными процессами при максимальном и минимальном прогнозных сценариях.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, включенных в базы Scopus, WoS и RSCI:

1. **Maslakov A.**, Kraev G. Erodibility of permafrost exposures in the coasts of Eastern Chukotka // *Polar Science*. 2016. № 10. P. 374–381.
2. **Maslakov A.**, Kraev G. Coastal hazards within indigenous settlements of Chukchi peninsula // *Engineering Geology for Society and Territory*. Vol. 4. Springer International Publishing AG Torino, 2014. P. 33–36.
3. Краев Г. Н., **Маслаков А. А.**, Гребенец В. И., Калянто Н. Л. Инженерно-геокриологические проблемы на территориях поселений коренных народов Восточной Чукотки // *Инженерная геология*. 2011. № 3. С. 52–57.

Публикации в журналах из перечня ВАК:

4. **Маслаков А. А.**, Рузанов В. Т., Фёдоров-Давыдов Д. Г., Краев Г. Н., Давыдов С. П., Замолодчиков Д. Г., Трегубов О. Д., Шикломанов Н. И., Стрелецкий Д. А. Сезонное протаивание пород в Берингии на фоне современных климатических изменений // *Arctic Environmental Research*. 2017. Т. 17, № 4. С. 283–294.

Прочие публикации:

5. **Маслаков А. А.** Результаты исследований сезонного протаивания пород в районе пос. Лорино (Восточная Чукотка) // *Арктика и Антарктика*. 2017. № 1. С.127-139.
6. **Маслаков А. А.**, Краев Г. Н., Мерзляков В. П. Размываемость береговых отложений в пос. Лорино (Восточная Чукотка) // *Материалы пятой конференции геокриологов России*. Т. 2, ч. 5. Региональная и историческая геокриология. — М.: Университетская книга, 2016. С. 77–83.
7. Замолодчиков Д. Г., Краев Г. Н., **Маслаков А. А.** Стационарные наблюдения за активным слоем и потоками парниковых газов в тундрах Восточной Чукотки // *Стационарные экологические исследования: опыт, цели, методология, проблемы организации: Материалы Всероссийского совещания. Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник*. — М.: Товарищество науч. изд. КМК 2016. С. 55–59.
8. **Маслаков А. А.**, Краев Г. Н. Опасные криогенные процессы на застроенных территориях Восточной Чукотки // *Экология северных территорий. Материалы международного Конгресса*. — Новосибирск: ЗАО ИПП Офсет, 2013. С. 132–139.