На правах рукописи

Веремеева Александра Анатольевна

Формирование и современная динамика озерно-термокарстового рельефа тундровой зоны Колымской низменности по данным космической съемки

25.00.25 – геоморфология и эволюционная география

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Пущино, 2017

Работа выполнена в лаборатории криологии почв ФГБУН Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

Научный руководитель: **Ривкина Елизавета Михайловна,**
кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией криологии почв ФГБУН Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

Официальные оппоненты: **Васильев Александр Алексеевич**,
доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории картографического моделирования и прогноза состояния геосистем криолитозоны ФГБУН Института криосферы Земли СО РАН
Спектор Валентин Владимирович,
кандидат географических наук, заведующий лабораторией общей геокриологии ФГБУН Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», географический факультет

Защита состоится " 6 " октября 2017 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 002.046.03 при ФГБУН Институте географии РАН по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29. Телефон +7 (495) 959-00-32, e-mail: d00204603@igras.ru

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на интернет-сайте Института географии РАН: http://www.igras.ru/1350

Автореферат разослан "___ " _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук, Е. А. Белоновская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Приморские низменности Якутии, рельеф которых сформировался в голоцене вследствие деградации поздненеоплейстоценовых высокольдистых отложений ледового комплекса (Катасонов, Бискэ, 1959; Томирдиаро, 1980; Каплина, 2009), привлекают в последние десятилетия особое внимание исследователей, что связано с наблюдаемым в высоких широтах процессом потепления климата (Overland et al., 2015).

Реакция мерзлотных ландшафтов на климатические изменения проявляется в активизации термокарстовых и термоэрозионных процессов, что приводит к перестройке гидросети (Григорьев и др., 2009; Vonk et al., 2015 и др.). Ведущим рельефообразующим процессом на приморских низменностях Якутии в голоцене является термокарст (Воскресенский, 2001), в результате которого сформировались останцовые возвышенности – едома, сложенная синкриогенными высокольдистыми преимущественно пылеватыми суглинками с мощными полигонально-жильными льдами, и озерно-термокарстовые котловины (аласы). В многолетнемерзлых отложениях приморских низменностей Якутии содержатся значительные запасы органического углерода (Strauss et al., 2013; Olefeldt et al., 2016; Shmelev et al., 2017), которые в случае увеличения глубины оттаивания будут способствовать новообразованию метана, диоксида углерода и других парниковых газов и их эмиссии в атмосферу (Schuur et al., 2015). Для оценки запасов углерода в мерзлых отложениях на выбранной территории необходимо знать площади распространения рельефообразующих четвертичных отложений.

Согласно метеорологическим наблюдениям, среднегодовая температура воздуха в районе пос. Черский в низовьях р. Колыма с 1970 по 2010 гг. повысилась с -12 до -9°С, а температура пород на глубине 15 м увеличилась с -10,5 до -9°С (Romanovsky et al., 2010). Изменение площади термокарстовых озер, характерных для районов распространения ЛК, может рассматриваться как важный индикационный признак реакции ландшафтов на климатические изменения (Кравцова, Быстрова, 2009). Одним из методов, позволяющих оценивать изменения ландшафтов во времени, являются методы дистанционного зондирования (Jorgenson, Grosse, 2016). К сожалению, данные аэрофото- и космической съемки охватывают только последние 70 лет. Дистанционные данные этого периода можно использовать для того, чтобы понять, отражаются ли современные изменения климата на изменении площади термокарстовых озер. Для анализа современной динамики озер необходимо реконструировать историю развития термокарстовых процессов с конца неоплейстоцена - начала голоцена. Несмотря на то, что активные исследования четвертичных отложений и рельефа приморских низменностей Якутии ведутся с конца 1950-х гг. (Баранова, 1957; Катасонов, Бискэ, 1959), четвертичные отложения большей части территории

представлены лишь на карте масштаба 1:1000000 (Государственная геологическая…, 2000). Геологические карты масштаба 1:200000 составлены только на участки выходов кристаллических пород. Использование данных космической съемки позволяет уточнить границы разных типов четвертичных отложений уже существующих карт с целью выявить тенденции формирования термокарстового рельефа в голоцене. Подобные исследования проводились ранее лишь на небольших по площади участках Анабар-Оленекской низменности (Grosse et al., 2006), а также в районе дельты Лены (Grosse et al., 2005; Morgenstern et al., 2011, 2013; Günther et al., 2013).

Цель работы – выявление закономерностей динамики озерно-термокарстового рельефа в районах распространения ледового комплекса тундровой зоны Колымской низменности в голоцене по данным космической съемки.

Основные задачи работы:

1. На основе использования дистанционных данных и применения ГИС-технологий разработать методику геоморфологического анализа озерно-термокарстового рельефа районов распространения ЛК.
2. Провести картографирование четвертичных отложений тундровой зоны Колымской низменности по космическим снимкам Landsat с целью уточнения границ их площади.
3. Оценить площадь термокарстовых озер, выявить закономерности их динамики за голоцен.
4. Выделить типы озерно-термокарстового рельефа и дать их характеристику.
5. Установить закономерности изменения площади термокарстовых озер на основе сопоставления разновременных космических снимков среднего разрешения за последние 50 лет.
6. По данным аэрофото- и космических снимков сверхвысокого разрешения выявить детальные изменения озерно-термокарстового рельефа.

Методы и материалы, используемые в работе. Работа основана на использовании данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) и применении ГИС-методов. Разработка методики анализа озерно-термокарстового рельефа районов распространения ЛК проведена совместно с сотрудниками лаборатории геоинформационных технологий и дистанционного зондирования Института геологии и минералогии СО РАН. Для верификации дистанционных данных проведены полевые исследования по их дешифрированию в районе мыса Мал. Чукочий в 2009 г.

Основой для картографирования и выявления закономерностей формирования озерно-термокарстового рельефа в голоцене стали космические снимки Landsat, топографические карты масштаба 1:200000 и построенная по ним цифровая модель рельефа (ЦМР). Для анализа современной динамики площади и количества термокарстовых озер использовались космические снимки Landsat и CORONA. Для детального исследования изменений рельефа в районе мыса

Мал. Чукочий использованы аэрофото- и космические снимки сверхвысокого разрешения. Космические снимки CORONA и ЦМР тундровой зоны Колымской низменности были предоставлены профессором Гидо Гроссе (Guido Grosse), космические снимки GeoEye и ЦМР района мыса Мал. Чукочий – доктором Франком Гюнтером (Frank Günther) – сотрудниками Института морских и полярных исследований им. А. Вегенера (Потсдам, Германия). Для анализа закономерностей динамики термокарстовых озер использовались данные наблюдений за температурой воздуха и осадкам на метеостанциях Черский и Андрюшкино.

Личный вклад автора. Автором проведены полевые исследования по дешифрированию космических снимков в районе мыса Мал. Чукочий в 2009 г., отбор и обработка космических снимков Landsat. Выполнено картографирование четвертичных отложений, составлены карты типов озерно-термокарстового рельефа, глубин расчленения рельефа, выделены морфологические типы едомы, проведен анализ рельефа и его современной динамики на основе сопоставления разновременных космических снимков.

Защищаемые положения:

1. На основе составленной карты четвертичных отложений тундровой зоны Колымской низменности по космическим снимкам Landsat установлено, что едома, сложенная ледовым комплексом, в значительной степени переработана термокарстом в голоцене и сохранилась на 16 % территории, при этом аласы занимают 72 %.

2. Проведена типизация озерно-термокарстового рельефа по соотношению площади, занимаемой едомой и термокарстовыми озерами, и дана его характеристика. Установлено, что наибольшая площадь едомы сохранилась на территориях, характеризующихся наибольшими значениями средних углов уклонов поверхности, относительными превышениями абсолютных высот, а также развитой гидросетью.

3. Выявлено, что средняя площадь термокарстовых озер (заозеренность) тундровой зоны Колымской низменности в пределах распространения отложений ЛК составляет 14,7 %. Большая часть сформированных в позднем неоплейстоцене – раннем голоцене термокарстовых озер спущена и существует в уже сформированных аласных котловинах. Уменьшение площади озер за голоцен составляет 82 %.

4. Установлен тренд уменьшения площади термокарстовых озер тундровой зоны Колымской низменности за период с 1965 по 2015 гг. На территории междуречья рек Алазея и Бол. Чукочья общая площадь озер уменьшилась на 7 %. Установлено, что за период 1999–2015 гг. уменьшение площади термокарстовых озер происходило быстрее, чем за период 1965–1999 гг.

5. Взаимосвязи изменения межгодовой динамики площади термокарстовых озер с исследуемыми климатическими показателями (сумма температур воздуха за летние месяцы, количество осадков за летние месяцы, за холодный период и за предыдущий год за период с октября по сентябрь) не выявлено.

6. На основе анализа дистанционных данных сверхвысокого разрешения установлено, что с 1972 г. на фоне увеличения температуры воздуха и количества осадков за летний период увеличивается площадь и количество мелких озер на заболоченных поверхностях едомы. Увеличивается и площадь участков развивающихся байджерахов.

Научная новизна работы:

1. Впервые разработана методика анализа озерно-термокарстового рельефа районов распространения ЛК на основе использования дистанционных данных и ГИС-технологий.

2. Впервые составлена карта четвертичных отложений тундровой зоны Колымской низменности с использованием космических снимков Landsat, соответствующая масштабу 1:200000, что позволило существенно уточнить границы ЛК относительно геологической карты масштаба 1:1000000.

3. Впервые выделены типы озерно-термокарстового рельефа по соотношению площади, занимаемой едомой и термокарстовыми озерами, и дана их характеристика.

4. Впервые проведена оценка заозеренности тундровой зоны Колымской низменности и установлены закономерности динамики термокарстовых озер за голоцен.

5. Впервые проведен анализ изменения площади и количества термокарстовых озер тундровой зоны Колымской низменности за период с 1965 по 2015 гг. и выявлены закономерности динамики площади озер на основе геолого-геоморфологического анализа территории.

6. Впервые выполнен анализ межгодовой динамики термокарстовых озер за период с 1999 по 2015 гг. и проведено сопоставление изменения площади озер с метеорологическими данными.

7. Впервые проведен детальный анализ изменений озерно-термокарстового рельефа на основе сопоставления дистанционных данных сверхвысокого разрешения за период с 1972 по 2013 гг.

Практическая значимость. Данные по распространению четвертичных отложений районов развития отложений ЛК необходимы для расширения фундаментальных знаний об эволюции рельефа территории в голоцене и его современной динамики. Составленная карта четвертичных отложений имеет большое значение для оценки количества органического вещества и парниковых газов, захороненных в мерзлых отложениях. Результаты оценки современной динамики рельефа и термокарстовых озер могут быть использованы при хозяйственном освоении и прогнозирования развития территории в условиях изменяющегося климата. Разработанная методика

геоморфологического анализа рельефа тундровой зоны Колымской низменности на основе использования ГИС-технологий и дистанционных данных может использоваться для решения аналогичных задач в других районах распространения ледового комплекса. Результаты исследований вошли в отчет по гранту РФФИ 14-05-31368 мол_а, в отчет программы президиума РАН № 15 "Природные катастрофы и адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата" и в отчеты международной рабочей группы по исследованию отложений ЛК (IPA action group "The Yedoma region: synthesis of circum-arctic distribution and thickness").

Апробация работы. Результаты работы были представлены на конференциях: Международная конференция "Криогенные ресурсы полярных регионов" (Салехард, 2007); 9th International Conference on Permafrost (Fairbanks, USA, 2008); 5-я международная конференция по криопедологии (Улан–Удэ, 2009); International Polar Year Oslo Science Conference (Norway, 2010); 4-я конференция геокриологов России (Москва, 2011); VII Всероссийское совещание по изучению четвертичного периода (Апатиты, 2011); Международная конференция "Earth Cryology: XXI century" (Пущино, 2013); 4th DUE Permafrost User Workshop (Frascati, Italy, 2014); 4th European Conference on Permafrost (Évora, Portugal, 2014); 12-я Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (Москва, 2014); Международная конференция "Permafrost in XXI Century: basic and applied researches" (Пущино, 2015); The 2016 European Space Agency Living Planet Symposium (Prague, Czech Republic, 2016); 11th International Conference On Permafrost (Potsdam, Germany, 2016).

По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 134 страницах машинописного текста. Состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 16 таблиц и 65 рисунков. Список литературы включает 227 наименований, в том числе 83 на иностранных языках.

Благодарности. Автор ценит и помнит моральную поддержку в написании работы и помощь в формулировке цели и задач исследования д. г.-м.н. Д.А. Гиличинского. Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю к.г.-м.н. Е. М. Ривкиной за неоценимую поддержку работы, ценные рекомендации и конструктивные замечания. Автор выражает огромную благодарность за консультации, поддержку работы и возможность участия в полевых исследованиях д.б.н. С. В. Губину, а также д.г.-м.н. И. Д. Зольникову и к.т.н. Н. В. Глушковой за организацию стажировки в Институте геологии и минералогии СО РАН, консультации по использованию данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ), ГИС-

технологий и помощь в разработке методики анализа рельефа. Автор искренне благодарит к.г.н. Ф.А. Романенко и к. г.-м.н. В. Е. Тумского за ценные научные консультации по теме диссертации, а также к.г.н. Е. А. Балдину, д.г.-м.н. С.М. Фотиева, д.г.н., С. А. Огородова, к.г.н. А. И. Кизякова за полезные замечания и рекомендации. Автор выражает большую благодарность сотрудникам Института морских и полярных исследований им. А. Вегенера (Потсдам, Генмания) – доктору Франку Гюнтеру за научные консультации и техническую поддержку при анализе динамики рельефа и площади термокарстовых озер, а также предоставление космических снимков GeoEye и ЦМР на участок мыса Мал. Чукочий, Ингмару Ницше за помощь в обработке космических снимков Landsat и профессору Гидо Гроссе за консультации по применению ДДЗЗ и предоставление космических снимков CORONA и ЦМР на территорию тундровой зоны Колымской низменности. Автор выражает признательность В.Е. Остроумову, к.г.н. Д.Г. Шмелеву за обсуждение отдельных результатов работы, а также всем сотрудникам лаборатории криологии почв ИФХиБПП РАН за теплую и дружескую рабочую атмосферу. Большую помощь в проведении полевых исследований оказали А.Т. Скотников и научный сотрудник Северо-Восточной научной станции Тихоокеанского института географии ДВО РАН С.А. Зимов, которым автор выражает благодарность. Важную поддержку в написании работы оказали сотрудники лаборатории экологии д.б.н. В. В. Снакин, к.г.н. В. Р. Хрисанов и Г. В. Митенко Института фундаментальных проблем биологии РАН, за что автор выражает им благодарность.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Формирование озерно-термокарстового рельефа при оттаивании ледового комплекса и его современная динамика

1.1. Распространение ледового комплекса. Ледовым комплексом (ЛК) называют сингенетически промерзшие полифациальные осадки мощностью до 40–60 м преимущественно алевритового состава, включающие мощные полигонально-жильные льды (Соловьев, 1959; Конищев, 1981; Тумской, 2012; Schirrmeister et al., 2013 и др.). Толщи ЛК формировались в периоды криохронов неоплейстоцена (Тумской, 2012; Конищев, 2013). Наиболее молодой ЛК, называемый едомным надгоризонтом или едомной свитой, формировался в период 60–12,5 тыс.л.н. (Решения..., 1987; Каплина, 2009; Schirrmeister et al., 2002a, b). В настоящей работе рассматривается только ЛК едомной свиты, являющийся рельефообразующим и формирующий останцовые водораздельные поверхности, называемые едомой (Баранова, 1957; Каплина и др., 1986). Отложения ЛК широко распространены на аккумулятивных низменностях Евразии и Северной Америки (Томирдиаро, 1980; Strauss et al., 2016). Одним из наиболее обширных по

площади районов их широкого распространения является Колымская низменность. Для объективного представления о распространении отложений ЛК необходимы карты четвертичных отложений масштаба 1:200000. К настоящему времени такие карты существуют лишь на отдельные участки в районах выходов кристаллических пород. На большую часть территорий распространения отложений ЛК такие карты отсутствуют. Использование космических снимков Landsat с разрешением 30 м позволяет провести картографирование четвертичных отложений и получить представление о распространении термокарстовых процессов в голоцене в районах распространения отложений ЛК.

1.2. История изучения и современные представления о формировании озерно-термокарстового рельефа районов распространения ЛК северо-востока Евразии. Под *термокарстом* большинством исследователей понимается совокупность физико-геологических процессов и явлений, связанных с вытаиванием подземных льдов и сопровождающихся просадками грунта, что приводит к появлению отрицательных форм рельефа или микрорельефа. (Сумгин и др., 1940; Соловьев, 1973; Романовский, 1977; Шур, 1977; Гречищев и др., 1980; Босиков, 1991 и др.). В результате *термокарста* образуются отрицательные формы рельефа – *озерно-термокарстовые котловины*, называемыми в Якутии *аласами* (Соловьев, 1962).

Исследованию термокарста и формированию озерно-термокарстовых котловин при оттаивании ЛК на территории России посвящено большое число публикаций (Вельмина, 1957; Баранова, 1957; Катасонов, 1979, 1982; Качурин, 1961; Романовский, 1961; Соловьев, 1962; Томирдиаро, 1969; Шило, Томирдиаро, 1969, 1970; Великоцкий, 1972; Иванов, 1972, 1982; Мухин, 1974; Ложкин и др., 1975; Каплина, Ложкин, 1979; Суходровский, 1979; Воскресенский, Плахт, 1982; Ложкин, Прохорова, 1983; Плахт, 1985; Шур, 1988; Шаманова, 1991; Босиков, 1991; Романенко, 1997; Тумской, 2002; Каплина, 2009; Morgenstern et al., 2013 и др.).

В районах распространения ЛК озерный термокарст является главным рельефообразующим процессом, формируя характерный аласный рельеф (Соловьев, 1962). Предпосылкой для развития термокарста в районах распространения отложений ЛК служит наличие мощных жильных льдов и общая высокая льдистость отложений, а основной причиной развития термокарста является превышение мощности СТС глубин залегания подземных льдов (Кудрявцев, 1958; Качурин, 1961). Важную роль в возникновении и развитии термокарста играют физико-географические факторы: геологическое строение, тектоника, климат, в конечном итоге формирующие рельеф, а также эрозионная сеть, почвенный и растительный покровы (Качурин, 1961; Шур, 1988 и др.).

Радиоуглеродные датировки отложений ЛК и аласных толщ, а также результаты моделирования показали, что прекращение накопления ЛК и начало массового образования

термокарстовых озер произошло 13–12 тыс. л.н., а озерное осадконакопление сменилось болотным уже к бореальному времени (Тумской, 2002; Каплина, 2009). Смена озерного осадконакопления болотным 11–10 тыс. л.н. говорит о возникновении в этот период эрозионной сети, в результате чего происходил активный спуск термокарстовых озер. После климатического оптимума голоцена 9,5–8 тыс. л.н. при последующем похолодании климата вплоть до сегодняшнего времени происходило снижение активизации термокарстовых процессов, развитие которых принимало локальный характер.

1.3. Изучение озерно-термокарстового рельефа и его динамики по данным аэрофото- и космической съемки. Дистанционные данные применялись в изучение рельефа приморских низменностей Якутии с конца 1950-х гг. Для характеристики озерно-термокарстового рельефа рядом авторов использовались аэрофотоснимки (Баранова, 1957; Колпаков, 1982; Каплина и др., 1986). Доступность космических снимков и начало активного использования ГИС-технологий с 2000-х гг. дали возможность проводить анализ термокарстового рельефа на новом уровне.

Изменение площади термокарстовых озер может рассматриваться как важный индикационный признак реакции мерзлотных ландшафтов на современное потепление климата (Кравцова, Быстрова, 2009). В настоящее время во многих регионах Арктики отмечается активизация термокарстовых и термоэрозионных процессов в результате потепления климата и увеличения глубин оттаивания сезонно-талого слоя, что приводит к изменению водного баланса и перестройке гидросети (Григорьев и др., 2009; Конищев, 2011 и др.). Активные исследования динамики термокарстовых озер с использованием дистанционных данных начались с 2000-хх гг. Однако, районы приморских низменностей Якутии изучены слабо.

На изменение заозеренности оказывают влияние как климатические факторы, так и криолитологическое строение пород и рельеф. Анализ работ по изучению динамики заозеренности районов сплошного распространения ММП показал, что на территории приморских низменностей Арктики с морским климатом, в том числе и на территориях распространения ЛК, преобладающей тенденцией является уменьшение заозеренности, в то время как в условиях экстраконтинентального климата центральной Якутии наблюдается увеличение площади термокарстовых озер.

Глава 2. Физико-географическая характеристика тундровой зоны Колымской низменности

Район исследований целиком расположен в пределах распространения ЛК и ограничен на востоке Халлерчинской тундрой, сложенной песчаными отложениями, а с запада – цепочкой

скальных останцов кряжа Суор-Уята и районом левобережья р. Алазея. Площадь тундровой зоны Колымской низменности, исключая Халлерчинскую тундру, составляет 44406 км^2.

Верхняя часть рельефообразующей толщи сложена преимущественно ЛК позднего неоплейстоцена и сформированными в результате его оттаивания в голоцене отложениями аласного комплекса (Решения..., 1987). В конце неоплейстоцена 12–13 тыс. л.н. в результате потепления климата и активизации термокарста, термоденудации и термоэрозии высокольдистые отложения ЛК подверглись значительной переработке и формированию аласного комплекса, состоящего из трех горизонтов, отражающих стадии развития аласной котловины (Романовский, 1961; Плахт, 1985; Каплина, 2009 и др.). Направленность новейших тектонических движений во многом предопределила степень переработки поздненеоплейстоценовых равнин термокарстовыми и термоэрозионными процессами в голоцене, характер заозеренности и типы речных долин (Баранова, 1957; Патык-Кара и др., 1982; Каплина и др., 1986). В настоящее время регион в целом испытывает незначительное поднятие. Отметки высот рельефа постепенно изменяются от 70–90 м на юге тундровой зоны Колымской низменности до 5–10 м на побережье Восточно-Сибирского моря. Преобладающими типами рельефа являются полого-холмистая едомная и озерно-болотная (аласная) аккумулятивные равнины (Государственная геологическая..., 2000).

Тундровая зона Колымской низменности расположена в зоне сплошного распространения ММП. Температура мерзлоты на подошве слоя годовых колебаний составляет -12...-9°С. Средняя мощность СТС составляет от 25–35 см на северных прибрежных участках до 40–50 см на границе с лесотундрой (Федоров-Давыдов и др., 2004).

Тундровая зона Колымской низменности по климатическому районированию Б. П. Алисова (1956) относится к океанической области Арктического климатического пояса и является наиболее континентальным сектором тундровой зоны Северо-Востока России. В формировании климата территории определяющую роль играет азиатский антициклон и влияние Восточно-Сибирского моря. Текущие по равнинной местности реки имеют незначительный уклон и медленное течение. Тундровая зона Колымской низменности отличается высокой степенью заозеренности по сравнению с другими районами севера Якутии (Кравцова, 2009).

На территории тундровой зоны Колымской низменности в северной части распространены мерзлотные тундровые глееватые и глеевые почвы, на юге территории - мерзлотные болотные, и тундровые перегнойно-глеевые почвы (Еловская, 1979). Слабая активность биогеохимических процессов обуславливает высокую литогенность большей части развивающихся здесь почв (Губин, 2001). Специфика климатического и почвенно-грунтового режимов отражается на

растительности. Для тундровой зоны Колымской низменности характерно распространение бугорковых и кочкарных влагалищнопушицевых тундр на положительных формах рельефа и полигонально-валиковых болот – на отрицательных (Андреев, Перфильева, 1980).

Глава 3. Объекты и методы исследований. Дистанционные данные и ГИС-методы при изучении формирования озерно-термокарстового рельефа и его современной динамики

Объектом исследований являются рельефообразующие четвертичные отложения и рельеф тундровой зоны Колымской низменности. Для представления о развитии термокарстовых процессов в голоцене и распространении четвертичных отложений проведено их картографирование для всей территории тундровой зоны Колымской низменности в пределах распространения отложений ЛК. Оценка динамики озерно-термокарстового рельефа проводилась для всей территории тундровой зоны Колымской низменности и на ключевых участках (рис. 1).

Основой для составления карты четвертичных отложений, карты распространения заболоченных участков едомы и оценки динамики изменения площади термокарстовых озер стали космические снимки американских спутников Landsat с разрешением 30 м. Для верификации ДДЗЗ проводилось полевое дешифрирование космического снимка Landsat 7 ETM+ и GeoEye.

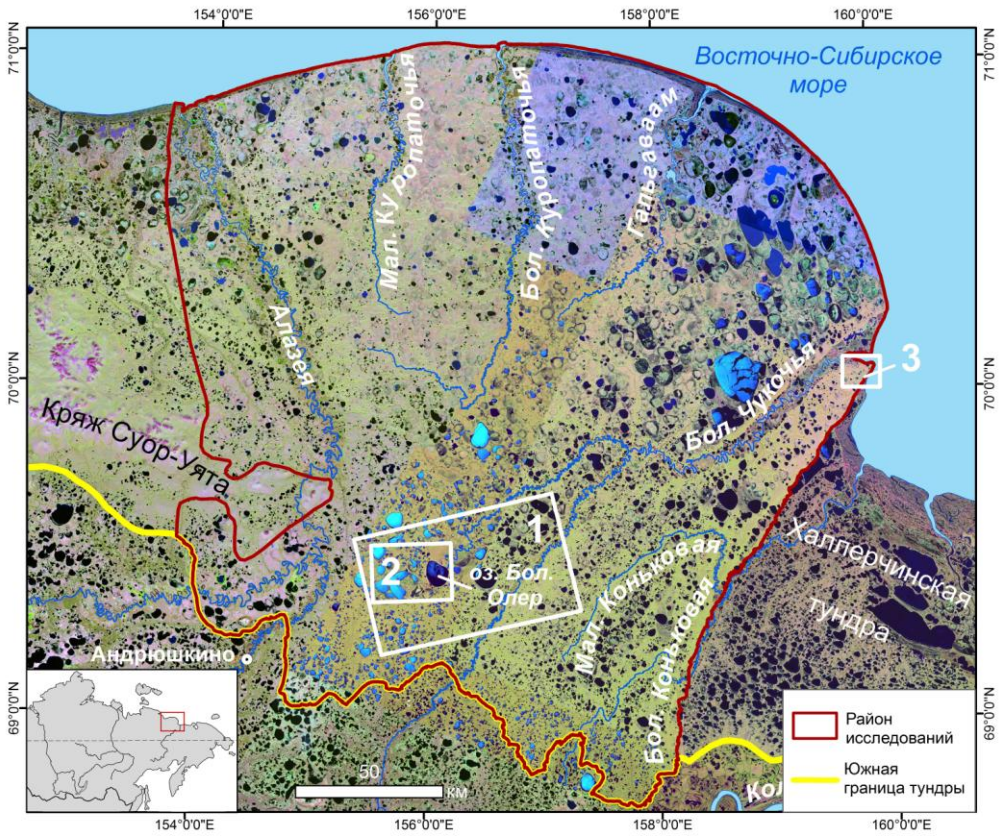

Рис. 1. Расположение ключевых участков:
1 – междуречье рек Бол. Чукочья и Алазея в среднем их течении; 2 – район озера Бол. Олер; 3 – район мыса Мал. Чукочий.

При картографировании площади рельефообразующих четвертичных отложений использовались спектральные характеристики космических снимков, отражающие особенности растительного покрова, подстилающей поверхности и морфологических черт рельефа, а также высотные данные топографических карт масштаба 1:200000 и построенной по ним ЦМР.

Для характеристики озерно-термокарстового рельефа автором разработана методика для анализа рельефа на основе подхода, созданного для картографирования и мониторинга гетерогенных природно-территориальных комплексов с использованием ДДЗЗ (Зольников и др., 2010, 2011). Особенности развития термокарста в голоцене в районах распространения ЛК можно охарактеризовать следующими параметрами: удельная площадь едом, аласов и термокарстовых озер, морфологические типы едомы, глубина расчленения рельефа. Построены карты удельной площади едомы, аласов и заозеренности. Показатель "удельная площадь едом / аласов / озер" представляет собой отношение площади, занимаемой едомой / аласами / озерами, к площади всей исследуемой территории, далее этот показатель называется "едомность"/"аласность"/"заозеренность". Для каждого параметра выбрано три класса значений. При пересечении карт едомности и заозеренности по их соотношению получено 9 классов (табл. 1). Для выделения типов озерно-термокарстового рельефа учитывались как преобладающие по площади классы, так и сочетание классов. На этом основании было выделено 8 типов рельефа. На основании сопоставления карт проведен анализ распространения типов рельефа в сравнении с ЦМР и построенной по ней картой средних углов уклонов поверхности. Составление карты глубин расчленения рельефа проведено на основе разницы абсолютных отметок высот поверхности едомы и урезов воды термокарстовых озер и днищ аласов, взятых с топографической карты масштаба 1:200000.

Анализ изменения заозеренности тундровой зоны Колымской низменности проведен с использованием космических снимков Landsat за период с 1973 по 2015 гг. Количественная оценка изменения площади термокарстовых озер ключевого участка 1 междуречья рек Алазея и Бол. Чукочья в среднем их течении (рис. 1) для разных типов озерно-термокарстового рельефа проведена на основе сопоставления космических снимков CORONA за 1965 г. с разрешением 5 м и Landsat 8 за 2014 г. Проведен анализ изменения площади и количества термокарстовых озер ключевого участка 2 района оз. Бол. Олер (рис. 1) по космическим снимкам CORONA за 1965 г. и Landsat за 1999 и 2015 гг. в разных типах озерно-термокарстового рельефа. Для анализа межгодовой динамики озер ключевого участка оз. Бол. Олер проведено сопоставление отдельных термокарстовых озер по космическим снимкам Landsat с 1999 по 2015 гг. Для детального анализа

динамики озерно-термокарстового рельефа ключевого участка 3 района мыса Мал. Чукочий (рис. 1) проведено сопоставление аэрофотоснимка 1972 г. с разрешением 0,8 м и космических снимков GeoEye 2009 и 2013 гг. с разрешением 0,5 м. Разрешение аэрофото- и космических снимков позволило оценить динамику площади и количества мелких озер размером от 4 м^2 заболоченных участков едомы и участков активных байджераховых склонов.

Глава 4. Закономерности формирования рельефа тундровой зоны Колымской низменности в голоцене

4.1. Распространение четвертичных отложений тундровой зоны Колымской низменности по данным космических снимков Landsat. Уточнены границы площади четвертичных отложений тундровой зоны Колымской низменности и составлена карта их распространения, соответствующая масштабу 1:200000 (рис. 2). Основные типы четвертичных отложений, преобладающие по площади, представлены поздненеоплейстоценовым ЛК едомного надгоризонта, голоценовыми аласными и аллювиальными отложениями. Поздненеоплейстоценовые равнины тундровой зоны Колымской низменности на 72 % переработаны термокарстом в голоцене и сохранились на 16 % от всей площади исследуемой территории.

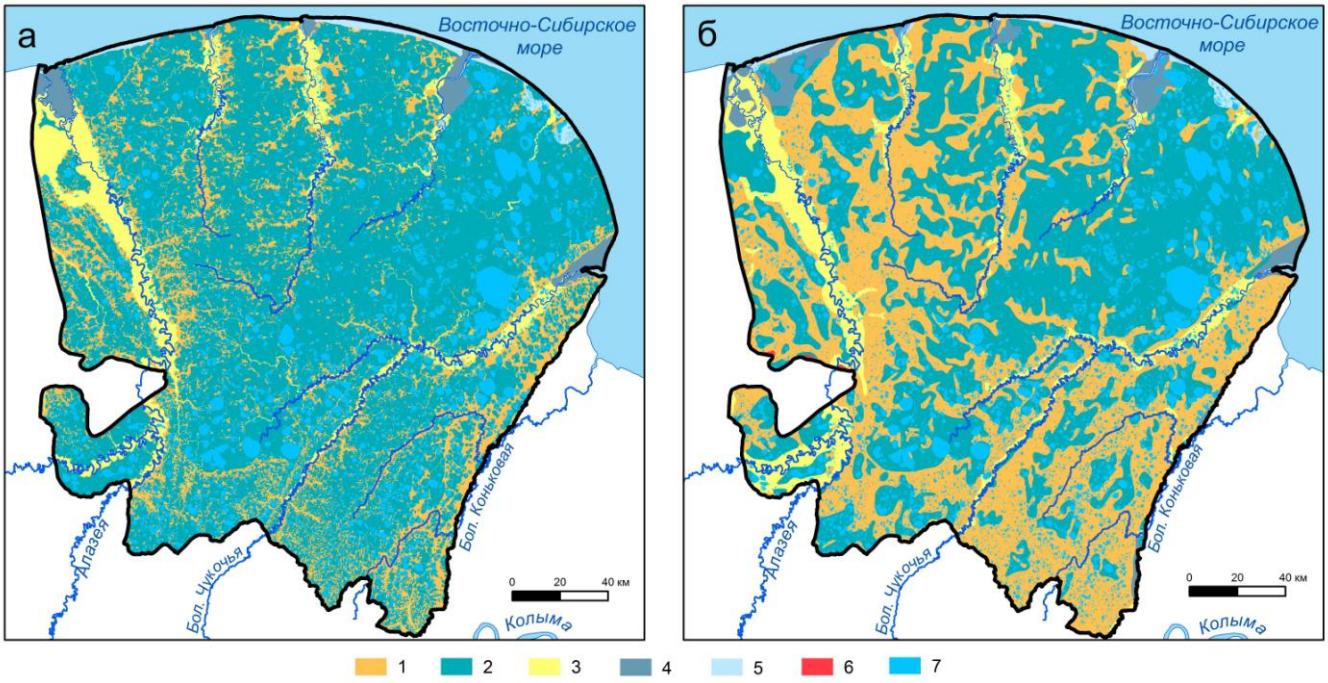

Рис. 2. Сопоставление выделенных четвертичных отложений по снимкам Landsat (*а*) и по карте четвертичных отложений м-ба 1:1 000 000 (б) (Государственная геологическая…, 2000а). 1 – отложения ледового комплекса едомного надгоризонта (LIII_{2-4}); 2 – отложения аласного комплекса (lbIV); 3 – аллювиальные отложения (aIV); 4 – аллювиально-морские отложения (amIV); 5 – морские отложения (mIV); 6 – выходы кристаллических пород; 7 – термокарстовые озера.

Сопоставление площади четвертичных отложений, выделенных на основе дешифрирования космических снимков с данными геологической карты масштаба 1:1000000 (Государственная геологическая..., 2000а) показало, что площадь отложений ЛК на карте масштаба 1:1000000 завышены в 2,5 раза (рис.2).

4.2. Типы озерно-термокарстового рельефа и их характеристика. По выделенным на основе космических снимков Landsat контурам едомы и озер составлены карты их удельной площади. Мы выделили участки с высокой (23–78 %), средней (5–23 %) и низкой едомностью (<5 %). Средняя заозеренность тундровой зоны Колымской низменности в пределах распространения ЛК составляет 14,7 %. Выделены участки с высокой (>15 %), средней (2-15 %) и низкой (<2 %) заозеренностью. Озера были объединены по размеру в 4 группы: малые (менее 1,7 км^2), средние (1,7–8,5 км^2), крупные (8,6–31 км^2) и очень крупные (более 31 км^2). Малые озера составляют 99 % от количества всех озер и 44 % от их площади. Остальные группы озер по площади занимают менее 1 % от числа озер, но более 50 % от всей площади озер. На основании анализа карт едомности и заозеренности выделено 9 классов по соотношению их площади (табл.2). На этом основании построена карта их распространения (табл. 2, рис. 3). По преобладанию площади класса или сочетания классов выделено 8 типов озерно-термокарстового рельефа (рис. 3, табл. 3).

Анализ карты распространения типов озерно-термокарстового рельефа показал, что аласы преобладают во всех типах рельефа, но их удельная площадь и степень заозеренности различаются. Районы с низкой или средней едомностью, как правило, характерны для участков с низкими абсолютными высотами, однако, они встречаются и на высоких геоморфологических уровнях.

Средние глубины расчленения рельефа по построенной нами карте составляют 20–25 м, что соответствует литературным данным (Архангелов и др., 1979; Каплина и др., 1981 и др.). По нашим данным, районы с максимальными глубинами расчленения рельефа приурочены к депрессиям, где едома сохранилась в виде останцов. В районах более высоких участков равнины глубины термокарстового расчленения снижаются, что, по-видимому, говорит о том, что мощность ЛК здесь изначально была меньше.

Морфология едом является важным показателем особенностей развития рельефа в голоцене и отражает воздействие как эндогенных, так и экзогенных факторов рельефообразования в голоцене. Нами выделено пять морфологических типов едом: массивный, массивно-останцовый, холмисто-останцовый, разреженный массивно-останцовый и островной (рис. 4).

Таблица 1. Классы, полученные при пересечении карт едомности и заозеренности

Едомность	**Заозеренность**		
	Высокая (> 15 %)	Средняя (2–15 %)	Низкая (< 2 %)
высокая (23–78 %)			
Средняя (5–23 %)			
Низкая (<5 %)			

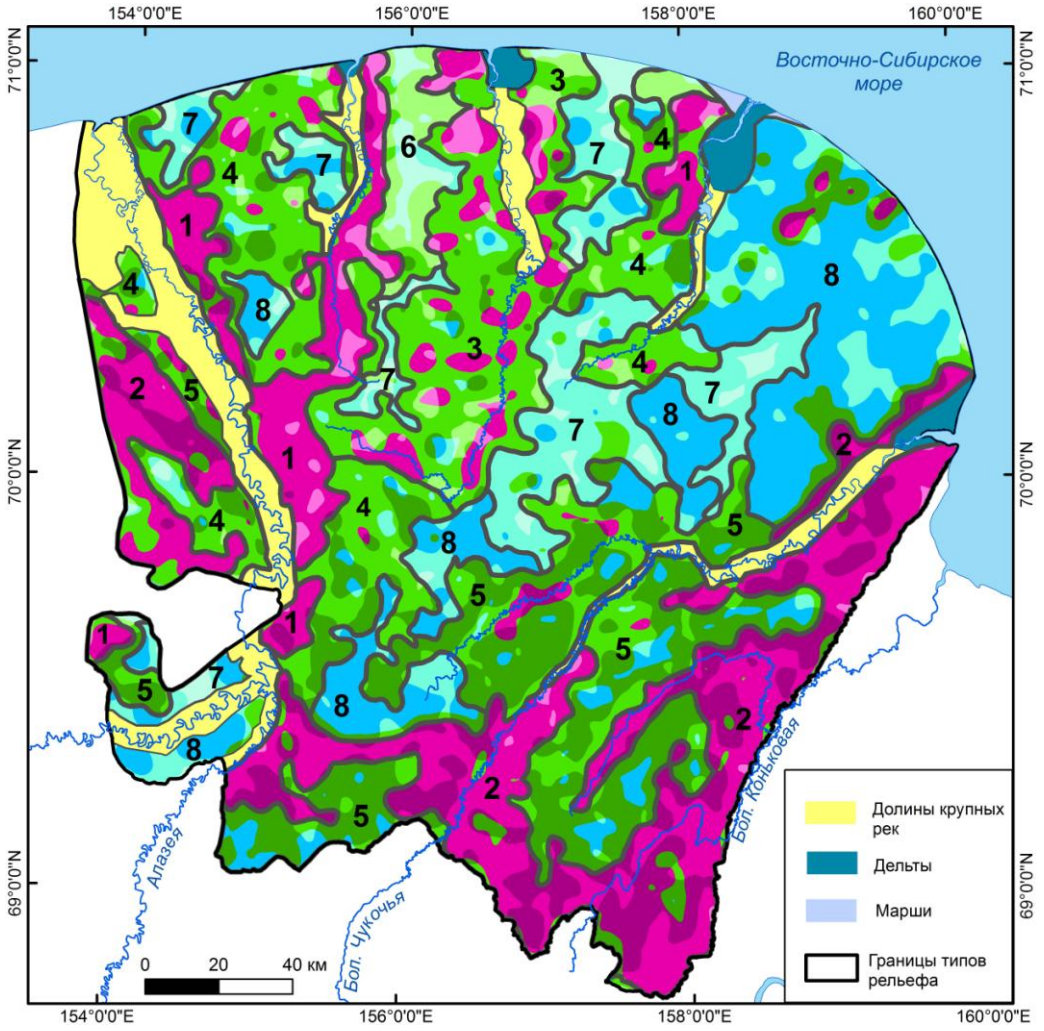

Рис. 3. Типы озерно-термокарстового рельефа по соотношению едомности и заозеренности (табл. 1):
1 - высокая едомность, средняя заозеренность;
2 – сочетание высокой едомности, высокой и средней заозеренности;
3 - сочетание участков высокой едомности и заозеренности и средней едомности и заозеренности;
4 - средняя едомность, средняя заозеренность;
5 - средняя едомность, высокая заозеренность;
6 - низкая едомность, средняя и низкая заозеренность;
7 - средняя и низкая едомность, низкая заозеренность;
8 - низкая едомность, высокая заозеренность.
Границы контуров долин рек, дельт и маршей взяты с карты четвертичных отложений масштаба 1:1000000 (Государственная геологическая..., 2000а).

Выделенные типы озерно-термокарстового рельефа характеризуются различными показателями, отражающими пространственную дифференциацию воздействия различных рельефообразующих факторов в голоцене (табл. 2).

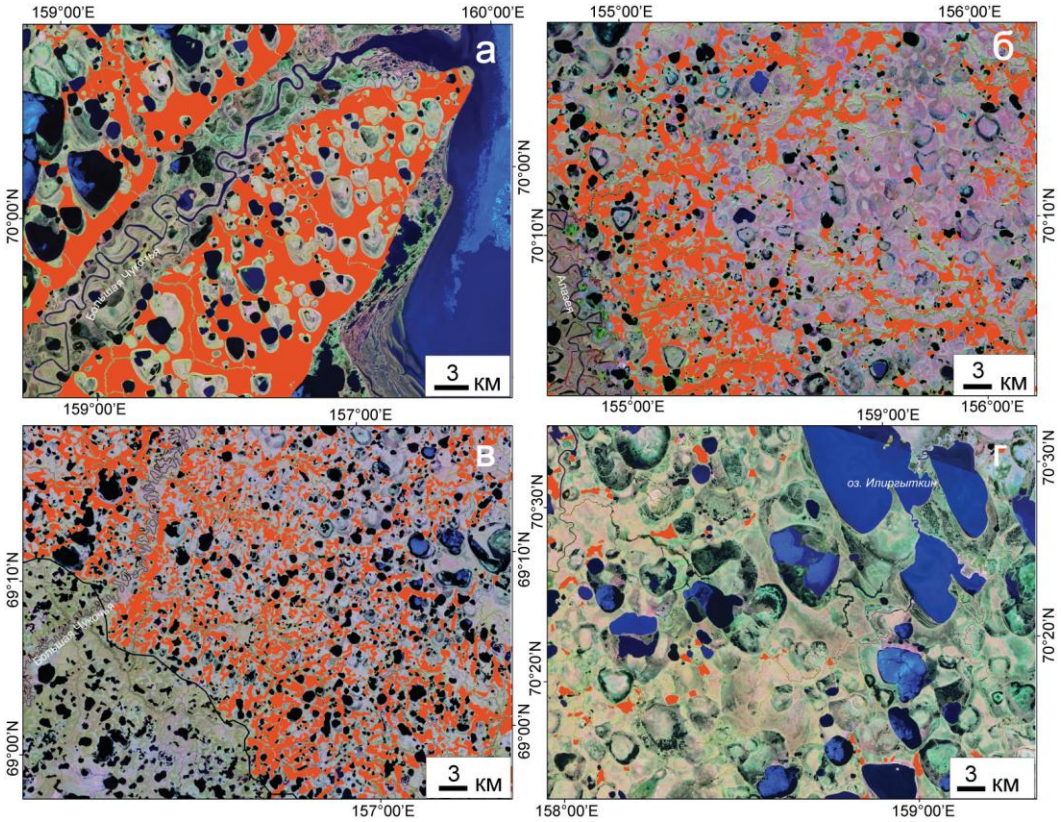

Рис. 4. Основные морфологические типы едом:
а – массивный,
б – массивно-останцовый и разреженный массивно-останцовый,
в – холмисто-останцовый,
г – островной.
Едома показана красным цветом.

Таблица 2. Характеристика типов озерно-термокарстового рельефа

Типы озерно-термокарстового рельефа по преобладающему сочетанию удельной площади едом и озер (% от всей площади)	Абсолютные высоты, м	Средние углы уклонов поверхности, в градусах	Характеристика гидросети	Глубины расчленения рельефа, м	Морфотипы едомы
1. Высокая едомность, средняя заозеренность (7 %)	20-50	5-6	Хорошо развитая гидросеть из ручьев, впадающих в близлежащие крупные водотоки, преобладают мелкие озера	20-40	Массивно-останцовая и массивная
2.Высокая едомность, высокая и средняя заозеренность (20 %)	30-60	5-6	Хорошо развитая гидросеть из ручьев, впадающих в близлежащие крупные водотоки, преобладают мелкие озера с участием средних	20-50	Массивная и холмисто-останцовая
3. Сочетание участков высокой едомности и заозеренности, и средней едомности и заозеренности (9 %)	10-30	3-5	Развитая гидросеть из ручьев, преобладают мелкие озера с участием средних	20-40	Разреженная массивно-останцовая
4. Средняя едомность, средняя заозеренность (7 %)	10-35	2-3	Развитая гидросеть из ручьев, преобладают мелкие озера с единичным участием средних	10-30	Разреженная массивно-останцовая и островная
5. Средняя едомность, высокая заозеренность (19 %)	20-50	2-4	Слаборазвитая гидросеть, преобладают мелкие озера с участием средних и крупных озер	10-40	Островная
6. Средняя и низкая едомность и низкая заозеренность (2 %)	10-30	0-2	Слаборазвитая гидросеть, единичные мелкие озера	10-20	Островная
7. Низкая едомность, средняя и низкая заозеренность (11 %)	10-25	1-2	Слаборазвитая гидросеть, мелкие озера с участием средних и крупных	10-30	Островная
8. Низкая едомность, высокая заозеренность (17 %)	0-20	0-1	Слаборазвитая гидросеть, мелкие, средние, крупные и очень крупные озера	10-40	Островная

4.3. Развитие термокарста и изменение заозеренности в голоцене. Данные о распространении четвертичных отложений в голоцене позволяют получить представление об интенсивности термокарстовых процессов. Аласы занимают 72 % от всей площади исследуемой территории. По аналогии с градациями едомности, мы выделили участки с высокой (95–100 %), средней (77–95 %) и низкой (22–77 %) аласностью. Имеющиеся радиоуглеродные датировки ЛК и аласных отложений разных районов северной Якутии, а также результаты моделирования показали, что активизация термокарстовых процессов произошла 13–12 тыс. л. н. и большая часть аласных котловин формировалась в течение 2,5 тыс. лет 12,5–10 тыс. л.н. (Тумской, 2002; Каплина, 2009; Walter et al., 2014). Таким образом, можно рассматривать распространение аласных котловин как показатель заозеренности территории тундровой зоны Колымской низменности в раннем голоцене. Соотношение площади современных озер к площади аласов дает представление об изменении заозеренности в голоцене. Уменьшение площади термокарстовых озер за голоцен на участках с разной аласностью составляет 81–83 %. Сопоставимое для всех классов аласности уменьшение площади термокарстовых озер в голоцене объясняется тем, что термокарстовые озера были связаны с существующей эрозионной системой и, в итоге, с абсолютным базисом эрозии (Воскресенский, Плахт, 1982).

Глава 5. Современная динамика озерно-термокарстового рельефа тундровой зоны Колымской низменности

5.1. Изменение заозеренности тундровой зоны Колымской низменности с 1965 по 2015 гг. по данным космических снимков CORONA и Landsat. На основе анализа космических снимков за 1973 гг., 1999–2001 гг. и 2013–2015 гг. установлено, что произошел частичный или полный спуск отдельных термокарстовых озер с 1973 по 1999–2001 гг., с 1999–2001 по 2013–2015 гг. и постепенное уменьшение площади части озер с 1973 по 2015 гг. (рис. 5).

Сопоставление карты распространения дренируемых озер за период с 1972 по 2015 гг. с картами едомности, заозеренности, ЦМР, картой средних углов уклонов поверхности и глубин расчленения рельефа показал, что частичный или полный спуск термокарстовых озер происходит преимущественно на более возвышенных участках с высокими или средними значениями средних углов уклонов поверхности и глубин расчленения рельефа, с высокой или средней едомностью и с высокой заозеренностью. Спуск озер происходит через существующую эрозионную сеть.

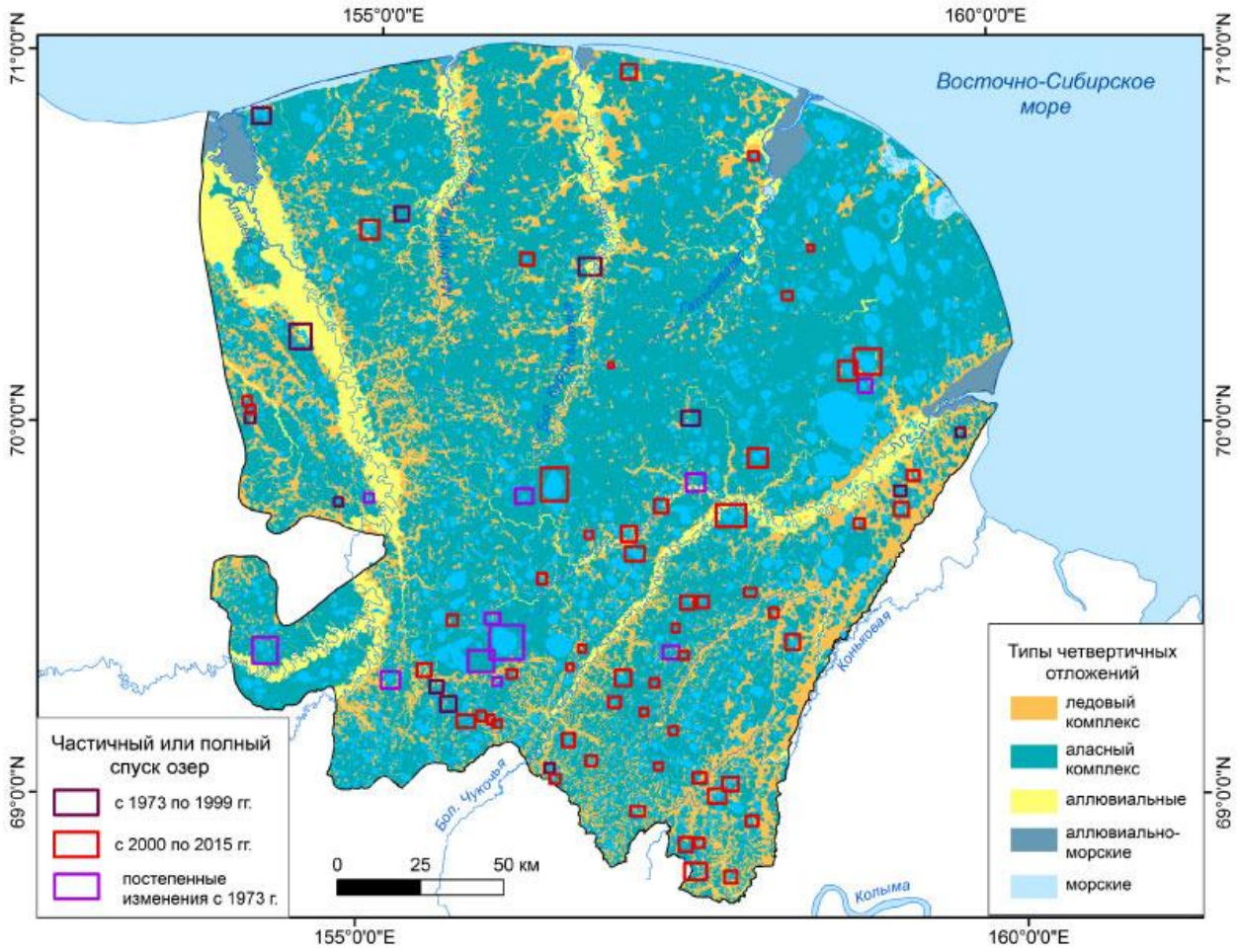

Рис. 5. Распространение дренированных термокарстовых озер на карте четвертичных отложений.

Проведена количественная оценка изменения площади и числа термокарстовых озер участка междуречья рек Алазея и Бол. Чукочья площадью 2800 км^2. Сопоставление космических снимков CORONA (21.07.1965) и Landsat 8 (26.08.2014) показало, что происходит как частичный или полный спуск одних озер, так и увеличение площади других озер (рис. 6). Однако, незначительное увеличение площади отдельных средних и крупных озер не меняет тренда уменьшения суммарной площади озер. Суммарное сравнение площади озер за 1965 и 2014 гг. показало, что площадь озер уменьшилась на 7 %, число озер уменьшилось на 67, а общая заозеренность участка сократилась на 1,5 %.

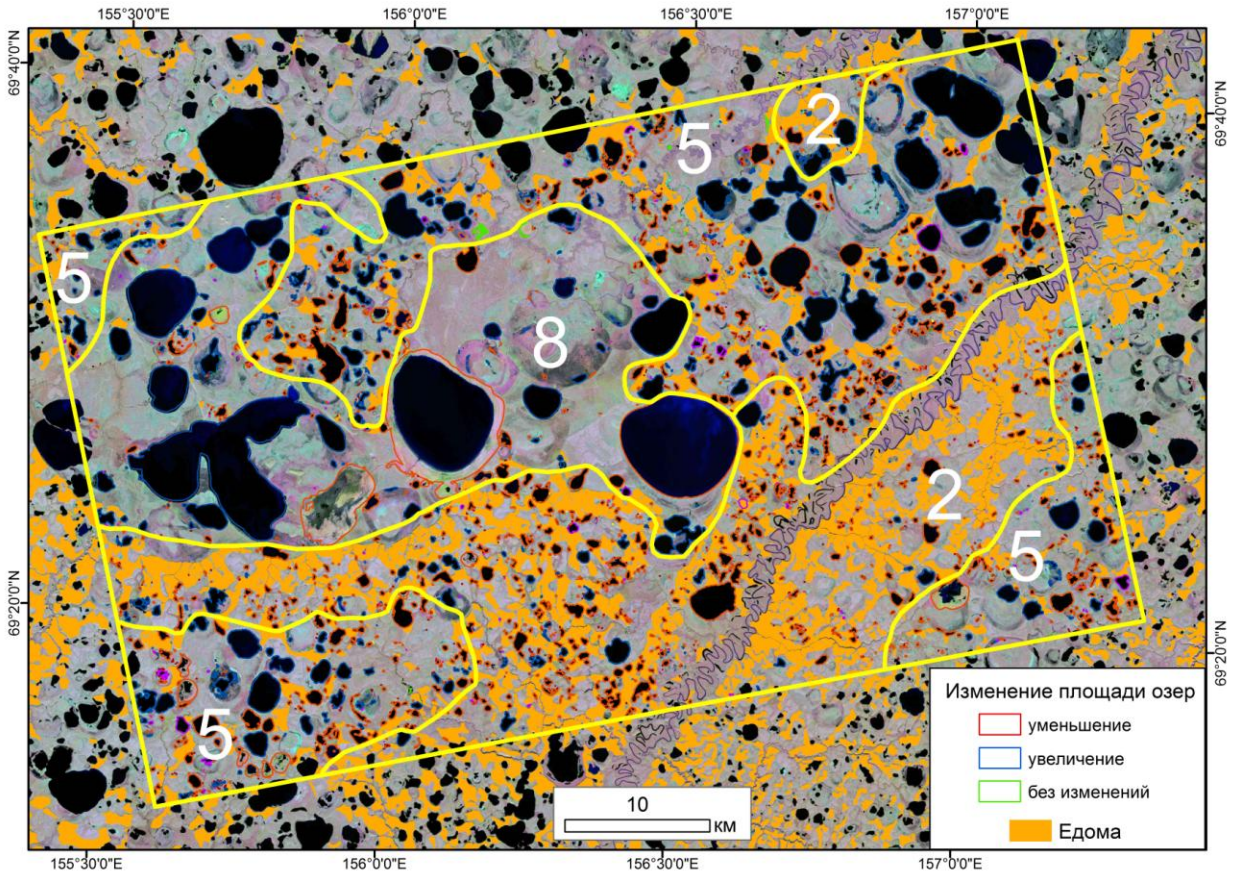

Рис. 6. Сопоставление границ типов озерно-термокарстового рельефа и карты распространения площади озер за 1965 и 2014 гг. Цифрами обозначены типы озерно-термокарстового рельефа в соответствии с рис. 3: 2 - сочетание высокой едомности, высокой и средней заозеренности; 5 - средняя едомность, высокая заозеренность; 8 - низкая едомность, высокая заозеренность. Космический снимок Landsat 8 (24.08.2016).

Так как отдельные озера уменьшаются по площади, а другие увеличиваются, то для выявления закономерностей их распространения было проведено сопоставление карт изменения заозеренности и типов озерно-термокарстового рельефа (рис. 6). Было установлено, что на участках с высокой едомностью в сочетании с высокой и средней заозеренностью, где преобладают малые по площади озера, в целом, происходит их уменьшение. В районах со средней едомностью и высокой заозеренностью, где распространены малые и средние озера, наблюдается уменьшение площади первых и увеличение площади вторых. Для участков с низкой едомностью и высокой заозеренностью, где распространены крупные и очень крупные озера, происходит увеличение большей части таких озер. Вместе с тем, отдельные крупные озера полностью или значительно уменьшились в площади. Сопоставление карты распространения изменений площади озер за 1965 и 2014 гг. с ЦМР показало, что увеличение площади озер происходит преимущественно на участках с пониженными высотами, в то время как уменьшение - на повышенных участках.

5.2. Изменение заозеренности с 1965 г. по 2015 гг. и межгодовая динамика термокарстовых озер ключевого участка "Озеро Большой Олер" с 1999 по 2015 гг. На основе сопоставления космических снимков CORONA (21.07.1965) и Landsat (25.08.1999, 28.08.2015) ключевого участка оз. Бол. Олер установлено, что за период 1999–2015 гг. скорость уменьшения площади озер была выше (0,44 %/ год), чем за период за 1965–1999 гг. (0,32 %/год), что говорит об активизации термокарстовых и термоэрозионных процессов, в особенности на наиболее низменных и заозеренных участках на фоне увеличения температуры воздуха и количества осадков.

Проведен анализ межгодовой динамики площади озер ключевого участка "Озеро Бол. Олер" за период с 1999 по 2015 гг. по космическим снимкам Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ и Landsat 8 и ее сопоставление с данными метеостанции Андрюшкино. Проанализированы следующие группы озер по изменению площади: расположенные в аласных котловинах – увеличивающиеся, уменьшающиеся и без выраженного тренда, и расположенные преимущественно в пределах ЛК (рис. 7).

Анализ межгодовой динамики отдельных термокарстовых озер участка оз. Бол. Олер показал, что синхронные колебания площади происходят у группы увеличивающихся крупных озер аласных котловин, не имеющих стока, и озер, расположенных в пределах ЛК и имеющих выраженный сток. Взаимосвязи изменения межгодовой динамики площади термокарстовых озер с исследуемыми климатическими показателями (сумма температур воздуха за летние месяцы, количество осадков за летние месяцы, за холодный период и за предыдущий год за период с октября по сентябрь) не выявлено.

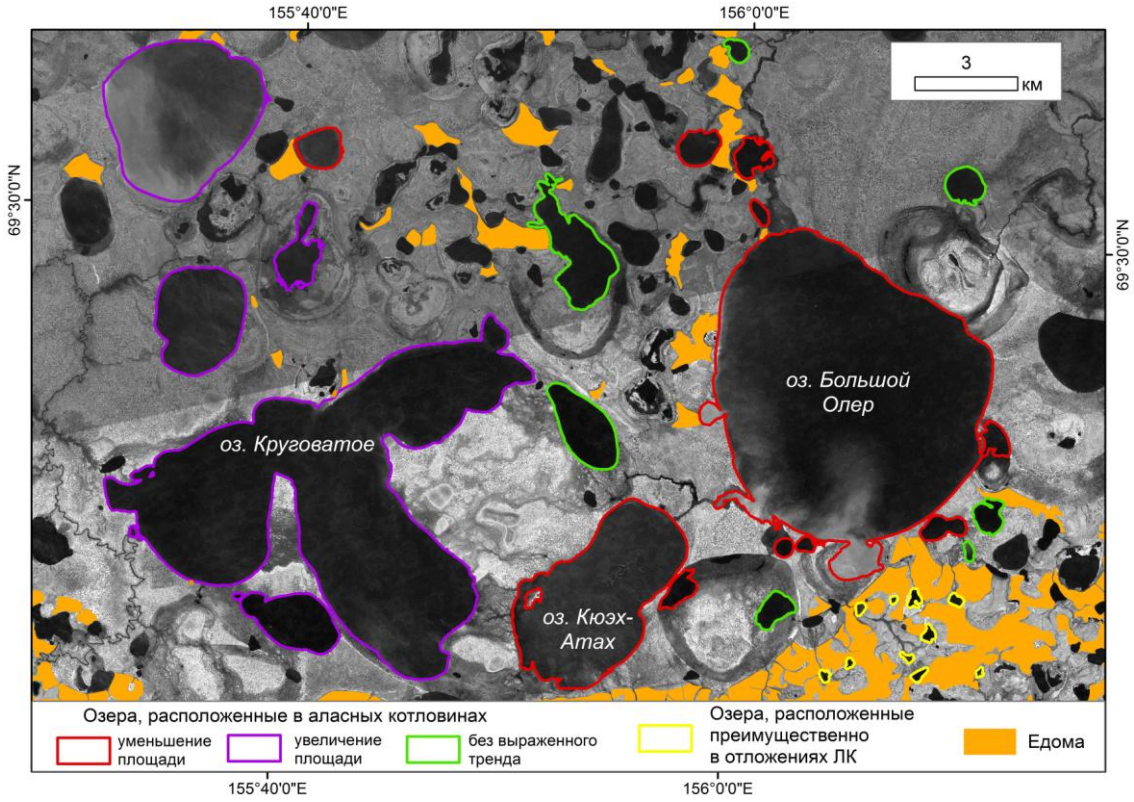

Рис. 7. Расположение групп термокарстовых озер, для которых проведен анализ межгодовой динамики площади с 1999 по 2015 гг. Космический снимок CORONA (21.07.1965).

5.3. Динамика озерно-термокарстового рельефа в районе мыса Мал. Чукочий по дистанционным данным сверхвысокого разрешения. Анализ динамики мелких озер заболоченных участков едомы в районе мыса Мал. Чукочий на основе сопоставления аэрофото- и космических снимков сверхвысокого разрешения показал, что по сравнению с 1972 г. площадь и количество озер в 2009 г. увеличились в 2 раза, а в 2013 г. – в 4 раза (рис. 9). Также увеличилась и средняя площадь озер, равная в 1972 г. 34 м^2, в 2009 г. – 57 м^2 и в 2013 г. – 59 м^2. Анализ метеоданных станции пос. Черский за период с 1960 по 2015 гг. показал, что увеличение площади и количества озер заболоченных участков едомы происходит в результате увеличения температуры воздуха и осадков за летние месяцы.

Оценка изменения площади термокарстовых озер района мыса Мал. Чукочий на основе сравнения аэрофотоснимка 1972 г. и космического снимка GeoEye 2013 г. показала, что происходит увеличение площади термокарстовых озер, расположенных в пределах отложений ЛК и уменьшение площади остаточных термокарстовых озер, расположенных в аласах.

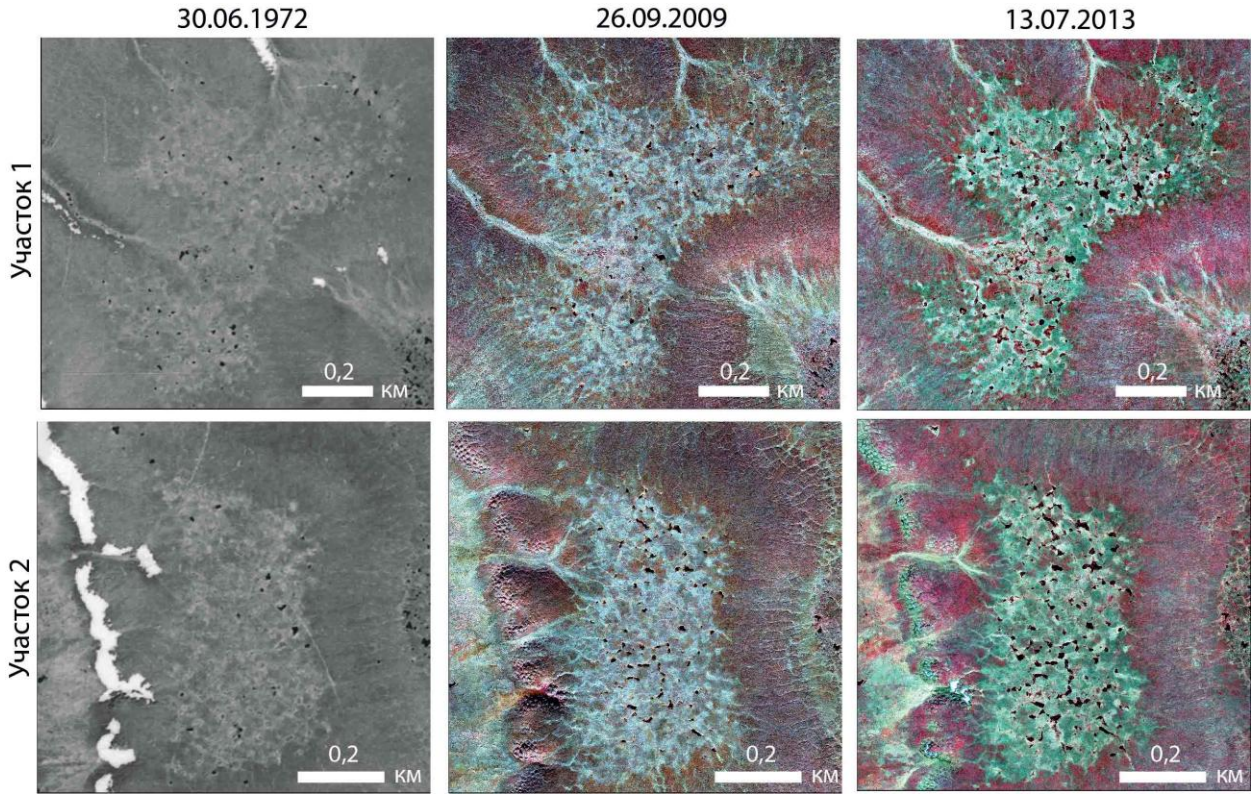

Рис. 9. Динамика озер участков 1 и 2 заболоченных поверхностей едомы (рис. 5.23) за 1972, 2009 и 2013 гг.: сопоставление аэрофотоснимка и космических снимков GeoEye за разные годы.

Важным индикатором активности процессов термоденудации и деградации мерзлоты в результате вытаивания полигонально-жильных льдов служит динамика площади развивающихся байджерахов – останцов минеральных блоков на склонах едомы (Тихомиров, 1958; Шур,

Васильев, 1978). В районе мыса Мал. Чукочий такие участки расположены на склонах едомы морского берега и термокарстовых озер. Сопоставление аэрофотоснимка 1972 г. и космического снимка GeoEye 2013 г. показало, что общая площадь участков развивающихся байджерахов увеличилась на 20 %.

Таким образом, наблюдаемое увеличение площади и числа озер заболоченных участков едомы, увеличение площади термокарстовых озер, расположенных в пределах отложений ЛК, и участков развивающихся байджерахов на фоне увеличения температур воздуха и количества осадков за летний период говорит об активизации процессов деградации мерзлоты с 1972 по 2013 гг. по сравнению с периодом до 1972 г.

Заключение

Формирование рельефа районов распространения отложений ЛК, степень интенсивности развития термокарстовых процессов в голоцене и современная динамика рельефа до настоящего времени остаются недостаточно изученными. Использование дистанционных данных и ГИС-технологий позволили провести анализ развития озерно-термокарстового рельефа и его современной динамики тундровой зоны Колымской низменности. На основе космических снимков Landsat среднего разрешения (30 м) проведена оценка распространения площади четвертичных отложений, дана характеристика типов озерно-термокарстового рельефа и выявлены закономерности формирования рельефа в голоцене. Сопоставление разновременных космических снимков CORONA и Landsat позволило установить закономерности современной динамики озерно-термокарстового рельефа, наиболее ярко проявляющейся в изменении площади термокарстовых озер. Анализ дистанционных данных сверхвысокого разрешения (менее 1 м) позволил провести детальный анализ динамики рельефа.

Основные выводы работы:

1. На основе анализа карты четвертичных отложений, составленной автором с использованием космических снимков Landsat, установлено, что едомы, сложенные отложениями ЛК, в значительной степени переработаны термокарстовыми процессами в голоцене и сохранились лишь на 16 % территории. Аласы занимают 72 %. Сопоставление составленной автором карты с данными геологической карты четвертичных отложений масштаба 1:1000000 показало, что площадь распространения отложений ЛК на карте масштаба 1:1000000 завышена в 2,5 раза.

2. Предложена типизация озерно-термокарстового рельефа по соотношению едомности и заозеренности, отражающая особенности формирования рельефа в голоцене. На основе анализа ЦМР, карт глубин расчленения рельефа, морфологических типов едомы и распространения термокарстовых озер по их площади дана характеристика типов озерно-термокарстового рельефа.

Установлено, что наибольшая площадь едомы сохранилась на территориях, характеризующихся наименее благоприятными для развития термокарста условиями: наибольшими значениями средних углов уклонов поверхности (4–6°), относительными превышениями абсолютных высот (20–30 м), а также развитой гидросетью.

3. Показано, что средняя заозеренность тундровой зоны Колымской низменности в пределах распространения ЛК составляет 14,7 %. Большая часть сформированных в позднем неоплейстоцене – раннем голоцене термокарстовых озер спущена и существует в уже сформированных аласных котловинах. Уменьшение площади озер за голоцен сопоставимо для всех классов аласности и составляет 81–83 %.

4. На основе сопоставления разновременных космических снимков установлен тренд уменьшения площади термокарстовых озер тундровой зоны Колымской низменности за период с 1965 по 2015 гг. На территории междуречья рек Алазея и Бол. Чукочья общая площадь озер уменьшилась на 7 %. Уменьшение площади озер происходит преимущественно на относительно возвышенных участках с высокими или средними значениями средних углов уклонов поверхности. При этом у наиболее крупных озер наблюдается увеличение их площади. Установлено, что за период 1999–2015 гг. уменьшение площади термокарстовых озер происходило быстрее, чем за период за 1965–1999 гг., что связано с активизацией термокарстовых и термоэрозионных процессов в результате увеличения температуры воздуха и количества осадков летнего периода.

5. Анализ межгодовой динамики групп озер, расположенных в аласных котловинах (увеличивающиеся, уменьшающиеся и без выраженного тренда) и в пределах ЛК показал, что колебание площади происходит синхронно у увеличивающихся крупных озер аласных котловин, и также у озер, расположенных в пределах ЛК. Взаимосвязь изменения межгодовой динамики площади озер с исследуемыми климатическими показателями (сумма температур воздуха за летние месяцы, количество осадков за летние месяцы, за холодный период и за предыдущий год за период с октября по сентябрь) не выявлена.

6. На основе сопоставления дистанционных данных сверхвысокого разрешения установлено, что с 1972 г. на фоне увеличения температуры воздуха и количества осадков за летний период увеличивается площадь и количество мелких озер на заболоченных поверхностях едомы. Увеличение площади за этот период характерно также для крупных едомных термокарстовых озер. Увеличиваются площади участков развивающихся байджерахов. Все эти факты говорят об активизации деградации мерзлоты.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Veremeeva A.,** Gubin S. Modern tundra landscapes of the Kolyma Lowland and their evolution in the Holocene // Permafrost and Periglacial Processes. 2009. Volume 20. Issue 4. P. 399–406.

2. Губин С.В., **Веремеева А.А.** Органосодержащие почвообразующие породы Северо-Востока России // Почвоведение. 2010. № 11. С. 1334–1340.

3. Шмелев Д.Г., Краев Г.Н., **Веремеева А.А.,** Ривкина Е.М. Содержание углерода в мерзлых отложениях северо-востока Якутии // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII. № 3. С.50–59.

4. **Веремеева А.А.,** Глушкова Н.В. Формирование рельефа в районах распространения отложений ледового комплекса в тундрах Колымской низменности (по данным космической съемки) // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 1. С. 15–25.

5. Shmelev D., **Veremeeva A.,** Kraev G., Kholodov A., Spencer R. G. M., Walker W. S. and Rivkina E. Estimation and Sensitivity of Carbon Storage in Permafrost of North-Eastern Yakutia // Permafrost and Periglacial Processes. 2017. Volume 28. Issue 2. P. 379–390. Doi: 10.1002/ppp.1933.

6. Muster S., Roth K., Langer M., Lange, S., Cresto Aleina F., Bartsch A., Morgenstern A., Grosse G., Jones B., Sannel A.B.K., Sjöberg Y., Günther F., Andresen C., **Veremeeva A.**, Lindgren P.R., Bouchard F., Lara M.J., Fortier D., Charbonneau S., Virtanen T.A., Hugelius G., Palmtag J., Siewert M.B., Riley W.J., Koven C.D., and Boike J. PeRL: A Circum-Arctic Permafrost Region Pond and Lake Database // Earth Syst. Sci. Data. 2017. V. 9. P. 317–348. Doi.org/10.5194/essd-9-317-2017.

Статьи, не входящие в список журналов, рекомендованных ВАК:

Grosse, G., Robinson, J.E., Bryant, R., Taylor, M.D., Harper, W., DeMasi, A., Kyker-Snowman, E., **Veremeeva, A.,** Schirrmeister, L., and Harden, J., 2013. Distribution of late Pleistocene ice-rich syngenetic permafrost of the Yedoma Suite in east and central Siberia, Russia // U.S. Geological Survey Open File Report 2013-1078. 37 p.

Тезисы и материалы конференций:

1. Веремеева А.А., Губин С.В. Подходы к выделению природно-территориальных комплексов в областях активного развития термокарста // Международная конференция "Криогенные ресурсы полярных регионов". Салехард. 2007. Т. 2. С. 121–122.

2. Veremeeva A., Gubin S. Approaches to Allocation of Terrain Complexes in the Areas of Thermokarst Development // 9th International Conference on Permafrost. Fairbanks, USA. 2008.

3. Веремеева А.А., Губин С.В. Организация ландшафтов приморских низменностей севера Якутии и связь ее с формированием почв и почвенного покрова // 5-я Международная конференция по криопедологии. Улан-Удэ. 2009. С. 24–25.

4. Veremeeva A.A., Gubin S.V. Tundra landscapes of the Kolyma Lowland and regularities of the thermokarst lakes distribution // International Polar Year. Oslo Science Conference, 2010.

5. Веремеева А.А. Закономерности организации современного рельефа тундровых ландшафтов колымской низменности – исследование дистанционными методами с использованием ГИС технологий // Тезисы докладов конференции “VII Всероссийское совещание по изучению четвертичного периода”. Апатиты. 2011. С. 107–110.

6. Веремеева А.А. Закономерности организации современного рельефа приморских низменностей севера Якутии, выявленные с помощью спутниковых снимков высокого разрешения // Тезисы докладов конференции “Четвертая конференция геокриологов России”. 2011. Москва. С. 29–35.

7. Veremeeva A.A., Glushkova N.V. Spatial Analysis of Ice Complex Deposits Thawing in Holocene, Kolyma Lowland Tundra Zone // International conference “Earth Cryology: XXI Century”. 2013. Pushchino. P.65.

8. Veremeeva A.A., Glushkova N.V. Thermokarst lakes areas changes study based on the spatial analysis of Kolyma lowland tundra // 4th DUE Permafrost User Workshop (ESA ESRIN, Frascati, Italy), 2014.

9. Veremeeva A.A., Glushkova N.V. The spatial analysis of the Yedoma morphology types in Yakutian coastal lowlands, NE Siberia // EUCOP4, the 4th European Conference on Permafrost, Évora, Portugal. Book of abstract. P. 310.

10. Веремеева А.А., Глушкова Н.В. Изменения площади термокарстовых озер на основе пространственного анализа рельефа для тундровой зоны Колымской низменности // Материалы 12-й Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса 2014, Москва, ИКИ РАН. С. 322.

11. Veremeeva A.A., Glushkova N.V. Yedoma Distribution in the Coastal Lowlands of Yakutia // Intern. Conference "Permafrost in XXI Century: basic and applied researches", Pushchino, Russia, 2015.

12. Veremeeva A.A., Glushkova N.V., Günther F. Permafrost regions vulnerable to thaw: A Landsat, ALOS, and DEM-based analysis of Yedoma relief in the Kolyma Lowland, East Siberia // The 2016 European Space Agency Living Planet Symposium, 2016 (Prague, Czech Republic).

13. Veremeeva A., Glushkova N., Günther F., Nitze I., & Grosse G. Landscapes and thermokarst lake area changes in Yedoma regions under modern climate conditions, Kolyma lowland tundra // XI International Conference on Permafrost. Book of Abstracts. Potsdam, Germany / Günther F. and Morgenstern A. (Eds.). Potsdam, Germany. 2016. P. 620–621. Doi: 10.2312/GFZ.LIS.2016.001.