

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
географический факультет

кафедра картографии и геоинформатики

на правах рукописи

Родионова Татьяна Васильевна

**Исследование динамики термокарстовых озер в
различных районах криолитозоны России по
космическим снимкам**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук по специальности
25.00.33 - картография

Научный руководитель:
в. н. с., д. г. н. Кравцова В. И.

Москва 2013

Оглавление

Введение.....	3
1. Термокарстовые озера как объект исследования.....	8
1.1. Причины образования и особенности развития термокарста.....	8
1.2. История развития термокарстового рельефа.....	15
1.3. Состояние исследований динамики термокарстовых озер.....	18
1.4. Выводы.....	32
2. Методика исследования динамики термокарстовых озер.....	34
2.1. Общая методическая схема исследования динамики термокарстовых озер.....	34
2.2. Характеристика основных материалов исследования.....	36
2.3. Выбор и предварительная обработка материалов.....	39
2.4. Этап дешифрирования водных объектов.....	43
2.5. Оценка надежности дешифрирования термокарстовых озер.....	48
2.6. Оценка возможностей взаимного сопоставления космических снимков со спутника Landsat одинакового и разного разрешения.....	64
2.7. Этап выявления изменений площади термокарстовых озер.....	69
2.8. Анализ выявленных изменений.....	74
2.9. Выводы.....	76
3. Результаты исследований динамики термокарстовых озер в различных районах России.....	79
3.1. Выбор районов исследования.....	79
3.2. Север Европейской России.....	84
3.3. Западная Сибирь.....	94
3.4. Север Восточной Сибири и Дальнего Востока.....	116
3.5. Центральная Якутия.....	143
3.6. Котловины Забайкалья.....	158
3.7. Сопоставление результатов региональных исследований.....	168
3.8. Выводы.....	172
Заключение.....	174
Список использованной литературы.....	177
Список иллюстративного материала.....	188
Приложение (отдельный том): Схемы динамики термокарстовых озер, составленные по разновременным космическим снимкам на фрагменты эталонных участков в пределах различных районов криолитозоны России.....	1 – 123

Введение

Актуальность темы исследования. Характерную черту криолитозоны, занимающей 65% территории России, составляет развитие процессов термокарста и предопределяемые ими формы рельефа – термокарстовые котловины и термокарстовые озера. В условиях потепления климата проявляется большой интерес к исследованию процессов развития термокарста как реакции криолитозоны на повышение температуры воздуха. Однако труднодоступность территории многолетней мерзлоты, высокая степень ее заболоченности не позволяют проводить такие исследования на местности, особенно в пределах больших территорий. В настоящее время стало возможно выполнять их с внедрением дистанционного зондирования Земли. Изменение площади хорошо дешифрируемых на аэрокосмических снимках термокарстовых озер – их динамика – используется как показатель активизации термокарстовых процессов и деградации мерзлоты.

Начиная с начала 2000-х годов зарубежными и отечественными учеными выполнены многочисленные исследования динамики термокарстовых озер, основанные на анализе разновременных космических снимков. В некоторых из них указывается на прямую взаимосвязь между изменением площади озер и потеплением климата, в других такая связь не прослеживается. При этом в пределах одной и той же территории у разных исследователей наблюдаются противоречивые результаты, что обусловлено недостаточной разработанностью методик аэрокосмических исследований динамики термокарстовых озер в имеющихся работах.

Поэтому актуальна разработка надежной методики исследований динамики термокарстовых озер по космическим снимкам, а экспериментальные исследования в различных районах криолитозоны России, проведенные на основе общей для всех районов разработанной методики, позволят выявить причины изменений и ответить на вопрос – могут ли термокарстовые озера служить индикаторами реакции криолитозоны на современное потепление климата, что является не менее актуальной задачей.

Цель диссертации – разработка методики исследований динамики термокарстовых озер по космическим снимкам, обеспечивающей достоверные результаты, и на ее основе – анализ динамики термокарстовых озер в различных географических районах, что позволит выявить особенности этой динамики и факторы, влияющие на изменение площади озер, а также определить возможность использования термокарстовых озер в качестве индикатора состояния криолитозоны при современном потеплении климата.

Для достижения поставленной цели потребовалось:

- проанализировать состояние имеющихся исследований динамики термокарстовых озер, выявить их особенности и недостатки;

- оценить надежность дешифрирования термокарстовых озер по космическим снимкам со спутника Landsat;
- разработать методику исследований динамики термокарстовых озер по космическим снимкам, обеспечивающую достоверное сопоставление разновременных снимков, надежность их дешифрирования, учет погрешности определения площади озер по ним;
- выявить основные особенности и факторы, определяющие динамику термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России.

Методы исследования. Работа основана на исследованиях динамики термокарстовых озер, проводившихся автором путем сопоставления разновременных аэрокосмических снимков и выполненных за период 2009 – 2013 гг. При разработке методики и выявлении основных особенностей динамики термокарстовых озер в различных районах криолитозоны были применены аэрокосмические, геоинформационные, картографические, картометрические и статистические методы.

Исследование опиралось на разработанные в лаборатории аэрокосмических методов классические приемы изучения динамики географических объектов по разновременным аэрокосмическим снимкам (Ю.Ф. Книжников, В.И. Кравцова, И.А. Лабутина, Е.А. Балдина); методы оценки надежности аэрокосмического картографирования (Л.Е. Смирнов, Б.Б. Серапинас); научно-методические принципы тематического картографирования (К.А. Салищев, И.П. Заруцкая); современные методы геоинформационного картографирования (А.М. Берлянт, И.К. Лурье, В.С. Тикунов, Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарев); теоретические основы и труды в области мерзлотоведения (В.А. Кудрявцев, Н.Н. Романовский, Э.Д. Ершов, А.И. Попов, В.Н. Конищев, Н.А. Шполянская, Н.В. Тумель); исследования, посвященные изучению термокарста (С.П. Качурин, В.Л. Суходровский, Е.М. Катасонов, Ю.Л. Шур, Н.П. Босиков); современные исследования динамики термокарстовых озер (В. Riordan, К. Hinkel, L. Smith, В.В. Елсаков, Ю.М. Полищук, Н.А. Брыксина, С.Н. Кирпотин, G. Grosse, A. Mongenstern, В.И. Кравцова).

Использованные материалы. В качестве основных материалов для изучения динамики термокарстовых озер использованы: космические снимки со спутника Landsat и разведывательного спутника Corona (камера KeyHole), распространяемые Геологической службой США, аэрофотоснимки масштаба 1:25 000 и 1:60 000, предоставленные ПНИИИС; космические снимки сверхвысокого и очень высокого пространственного разрешения со спутников WorldView-1, GeoEye, IRS-P5 (Cartosat), SPOT-5, предоставленные ИТЦ “СКАНЭКС”.

В качестве дополнительных материалов для выявления причин и основных особенностей динамики термокарстовых озер были использованы метеорологические данные (величины

атмосферных осадков и температуры воздуха) ВНИИГМИ-МЦД; топографические карты масштаба 1:100 000 и 1:200 000, а также разнообразные тематические карты разных масштабов.

Основные защищаемые положения.

1. Разработана методика исследования динамики термокарстовых озер по аэрокосмическим снимкам, предусматривающая при автоматизированном определении изменений озер учет разрешения сравниваемых снимков, исключение из анализа малых озер с недостаточной полнотой дешифрирования и количественную оценку изменений площади отдельных озер с учетом погрешности их определения.

2. Количественная автоматизированная оценка изменений площади озер должна сочетаться с составлением картографических материалов – схем динамики озер, обеспечивающих визуальный пространственный географический анализ.

3. Динамика термокарстовых озер определяется сложным комплексом факторов. Преобладающее уменьшение их площади по территории криолитозоны в целом связано с повсеместной перераспределяющей деятельностью соединяющих озера водотоков, эрозией и зарастанием озер. Незначительное локальное увеличение вызвано действием термоабразии и термокарста в районах высокольдистых многолетнемерзлых пород. Влияние этих факторов может также осложняться новейшими тектоническими движениями. Значительные периодические изменения площади озер обусловлены колебаниями количества атмосферных осадков. В районах интенсивного освоения разнонаправленные изменения вызваны антропогенной деятельностью. Прямого влияния современного потепления климата на динамику термокарстовых озер не выявлено.

Научная новизна. В разработанной автором методике для обеспечения надежного определения изменений площади термокарстовых озер введены ограничения по площади анализируемых озер (пороги), впервые экспериментально обоснованные.

Новизной характеризуется предложение о необходимости составления картографических материалов – схем динамики термокарстовых озер для обеспечения визуального пространственного анализа в сочетании с автоматизированным определением и количественным анализом показателей изменений.

Впервые получены однотипные количественные данные об изменении площади термокарстовых озер по широкому спектру районов криолитозоны и выявлено, наряду с повсеместным влиянием на динамику термокарстовых озер гидрологических процессов (перераспределяющей роли водотоков и эрозионной деятельности рек) и зарастания озер, влияние колебания атмосферных осадков. Выявлена опосредованная роль современных тектонических движений в динамике озер, проявляющаяся во влиянии на перераспределяющую деятельность водотоков.

Неоднократно высказывавшееся положение об индикационной роли изменений термокарстовых озер как показателей деградации вечной мерзлоты впервые поставлено под сомнение.

Практическая значимость. Предложенная методика исследования динамики термокарстовых озер по космическим снимкам со спутника Landsat, разработанная на эталонных участках, может быть использована при более широком территориальном анализе изменений площади термокарстовых озер (сезонных, межгодовых, многолетних) в различных районах распространения термокарстовых озер.

Предложенные в разработанной автором методике ограничения по площади анализируемых озер (пороги) при использовании снимков разного пространственного разрешения могут быть определены и учтены в аэрокосмических исследованиях динамики других географических объектов.

Выявленные автором факторы, оказывающие влияние на изменение площади термокарстовых озер, рекомендуется учитывать при анализе динамики термокарстовых озер, чтобы минимизировать вероятность ошибочных выводов о причинах наблюдаемых изменений площади озер.

Внедрение. Отдельные результаты исследования реализованы в рамках государственного контракта НОЦ 14.740.11.0200 ("Картография, геоинформатика и аэрокосмическое зондирование в географии", 2010-2012 гг.), гранта РФФИ 10-05-00267 ("Учение об аэрокосмической стереомодели местности", 2012 г.) и программы НШ 3405.2010.5 ("Разработка методологических основ интеграции картографических, геоинформационных и аэрокосмических технологий для исследований в области геоэкологии, рационального природопользования и создания образовательных ресурсов", 2010 г.).

Апробация работы. Результаты исследования докладывались на российских и международных научных конференциях и совещаниях: на XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов" (г. Москва) в апреле 2009 г.; на российских конференциях "Восьмое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу" и "Девятое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу" (г. Томск) в октябре 2009 и октябре 2010 г.; на Четвертой конференции геокриологов России (г. Москва) в июне 2011 г.; на X Международной конференции по мерзлотоведению TICOSP (г. Салехард) в июне 2012 г.; на конференции "Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы" (г. Москва) в июне 2013 г.; на 6-ой Международной конференции "Земля из космоса – наиболее эффективные решения" (г. Москва) в октябре 2013 г.

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из которых 2 – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д.г.н. В.И. Кравцовой за помощь в проведении исследования и написании работы; заведующему лабораторией аэрокосмических методов, д.г.н, профессору Ю.Ф. Книжникову, к.г.н. И.А. Лабутиной, к.г.н. Е.А. Балдиной, к.г.н. Тутубалиной и всем сотрудникам лаборатории аэрокосмических методов за обсуждение работы на семинарах; Б.Б. Серапинасу за консультации в области оценки надежности результатов исследования; Н.В. Тумель, В.Л. Суходровскому, А.Б. Чижову за обсуждение промежуточных результатов и предоставление консультаций в области мерзлотоведения; Е.И. Пижанковой, А.В. Гаврилову за помощь в проведении исследования на территории Яно-Индигирской низменности; Инженерно-Технологическому Центру “СКАНЭКС” за предоставление для работы космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения; производственному и научно-исследовательскому институту по инженерным изысканиям для строительства (ПНИИИС) за предоставление для работы аэрофотоснимков; а также всем сотрудникам кафедры картографии и геоинформатики за поддержку при работе над диссертацией.

1. Термокарстовые озера как объект исследования

1.1. Причины образования и особенности развития термокарста

Огромная площадь территории нашей страны и разнообразие ее географических условий определяют разнородность и многообразие распространенных на ней явлений природы. Одно из своеобразных явлений природы на территории нашей страны – это многолетнемерзлые горные породы, которые занимают 65% ее площади (рисунок 1.1). Они развиты в северных, северо-восточных и восточных районах страны. Образование их, как и наземных оледенений, обусловлено космическими и планетарными причинами, но поддерживаются они современными климатическими условиями. Территория, на которой развиты многолетнемерзлые породы, называется криолитозоной.

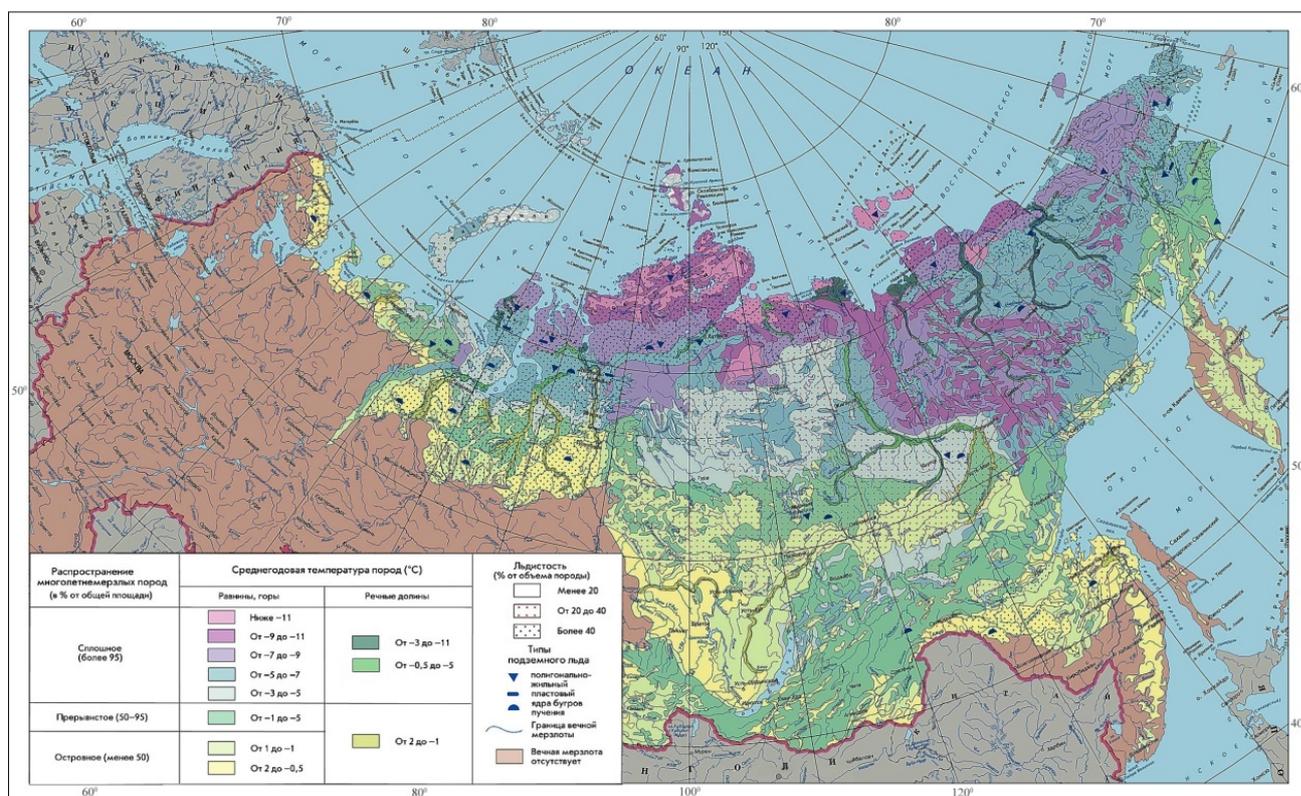


Рисунок 1.1. Уменьшенная копия карты вечной мерзлоты 1:15 000 000 (Национальный атлас России, 2007)

По мерзлотно-температурному режиму выделяют несколько зон многолетней мерзлоты. Южная граница многолетней мерзлоты оконтуривает зону ее островного распространения, где имеются отдельные острова многолетнемерзлых пород мощностью до 25 м; севернее следует зона несплошной (разделенной таликами) многолетней мерзлоты максимальной мощностью до 100 м; и, наконец, большую часть территории севера и северо-востока страны занимает зона сплошной многолетней мерзлоты мощностью от 100–500 до 1000 м и более (рисунок 1.1). Для горных районов в распространении различных типов многолетней мерзлоты наблюдается вертикальная поясность – с увеличением высоты растет мощность многолетнемерзлых пород.

В областях распространения многолетней мерзлоты развиты мерзлотные формы рельефа, образование и развитие которых обусловлено криогенными процессами. К одному из таких криогенных процессов относят процесс термокарста (понятие *термокарст* было введено М.М. Ермолаевым в 1932 году при проведении экспедиционных работ на Ляховских островах). Сущность процесса термокарста заключается в вытаявании подземных льдов и сопровождающих его осадках земли, что, в свою очередь, обуславливает появление просадочных форм рельефа или микрорельефа (Качурин, 1961). Эти просадочные формы чаще всего заполнены водой и представляют собой термокарстовые озера.

Необходимым условием для развития термокарста в естественной обстановке является *наличие подземных льдов* в виде мономинеральных залежей или текстурообразующего льда в рыхлых отложениях, но с льдистостью пород, превышающей ее полную влагоемкость в талом состоянии. Высокая степень льдистости пород является главным условием развития термокарста. Другим необходимым условием является *увеличение глубин сезонного или многолетнего протаивания*. Лишь когда глубина сезонного или многолетнего оттаивания начинает превышать глубину залегания залежи подземного льда или сильнольдистой породы, возможно развитие процесса термокарста. Вода, появившаяся при оттаивании льда, отфильтровывается вверх, а талая кровля проседает, заполняя образующуюся полость и создавая на поверхности понижение. В противном случае в массиве пород на месте вытаявших тел остаются пустоты, не проявляющиеся в рельефе и не создающие термокарстовых форм (Общее мерзлотоведение, 1978). Геоморфологическим фактором, способствующим образованию термокарста и озерных термокарстовых форм, является *равнинный характер территории, затрудняющий сток поверхностных вод* (Романовский, 1993). При благоприятных условиях дренажа, возможности стока вод и выноса рыхлого материала процессы термокарста не приводят к формированию озерных ландшафтов, а способствуют развитию процессов термоэрозии, образованию долинообразных понижений (аласных долин) и систем стока из соединившихся термокарстовых котловин (Общее мерзлотоведение, 1974)

Причины массового развития термокарстовых озер в районах распространения высокольдистых отложений представляются дискуссионными.

В.Л. Суходровский полагает, что преимущественная часть озер, расположенных южнее древнего ледникового покрова (озера, расположенные севернее, имеют ледниковое происхождение), которые принято называть термокарстовыми, имеют флювиальное первичное происхождение. Эти озера существовали на аккумулятивных равнинах еще в позднеплейстоценовое время. Пойменное осадконакопление, сопровождающееся льдообразованием и площадным вспучиванием поверхности, происходило на межозерьях; в озерах льдообразование не происходило. А в наиболее влажные периоды уровень воды в озерах

повышался и способствовал таянию льдистых отложений, слагающих их берега. Тогда и проявлялся процесс термокарста. В.Л. Суходровский предлагает называть эти озера не термокарстовыми, а флювиально-термокарстовыми (Суходровский, 1979, 2012). Однако он не отрицает существования в природе чисто термокарстовых озер. Основной причиной их развития он называет наличие положительного водного баланса. По его мнению, скопление атмосферной воды в естественных или антропогенно обусловленных западинах на участках развития льдистых отложений может стать началом образования термокарстовых озер (Суходровский, 2012). Подобную точку зрения разделяют Г.Ф. Гравис, Н.И. Мухин и Е.М. Катасонов. По их мнению, непосредственной причиной возникновения любых термокарстовых понижений является скопление воды и образование первичных озер на участках развития подземных льдов (Гравис, 1978; Мухин, 1974; Катасонов, 1979, 1982).

Большинство исследователей: В.А. Кудрявцев, С.П. Качурин, Т.Н. Каплина, Н.Н. Романовский, А.И. Попов и др. связывают массовое возникновение термокарстовых озер с изменением внешних термодинамических условий существования мерзлых толщ. Анализ палеогеографических изменений на рубеже плейстоцена и голоцена показывает, что основной причиной массового развития термокарста послужило потепление климата, сопровождавшееся увеличением увлажненности (Романовский, 1993).

Причиной возникновения термокарста служит изменение теплообмена на поверхности почвы, при котором либо глубина сезонного оттаивания начинает превышать глубину залегания подземного льда, либо происходит смена знака среднегодовой температуры мерзлых толщ и начинается их многолетнее оттаивание. Изменение теплообмена может быть связано не только с общей деградацией мерзлых толщ, т.е. с исторически возникающими климатическими периодами потепления, но и с изменением составляющих радиационно-теплового баланса поверхности, с динамикой развития растительных, снежных и водных покровов, с иссушением пород сезонноталого слоя и другими изменениями элементов геолого-географической среды (Ершов, 2002). Причины могут быть разделены на две категории – общие и частные. К общим следует относить: общее потепление климата; усиление его континентальности; другие общие физико-географические причины – увеличение мощности снежного покрова и др. К частным – появление трещин различного происхождения (морозобойных, динамических и др.); вытаптывание растительного покрова животными; лесные пожары; вырубki леса, возведение сооружений, распашка земли, проведение дорог и др. (Криолитология, 1985).

Ю.Л. Шур проанализировал причины термокарста, приводимые в работах многих исследователей и представил их совокупность в виде классификации (таблица 1.1), не отрицая существование каждой из причин, будь то изменение теплового баланса или изменение водного баланса (Шур, 1974, 1988).

Таблица 1.1

Причины возникновения термокарста (обобщение имеющихся представлений)

Процессы	Изменение теплового баланса		Изменение водного баланса	
	Увеличение прихода тепла	Уменьшение термического сопротивления поверхности	Увеличение разности осадки – испарение	Изменение условий дренирования
Природные	Потепление климата; усиление континентальности	Смена растительного покрова; минерализация органогенного горизонта	Увеличение количества осадков; уменьшение испарения; увеличение снежного покрова	Неотектонические движения
Техногенные	Искусственные источники тепла	Минерализация органогенного горизонта; уничтожение почвенного покрова; удаление части почвенно-грунтового слоя	Искусственное обводнение	Подпруживание поверхностного стока

Ю.Л. Шур отмечает, что многолетнемерзлые породы и подземный лед являются частью сложной природной системы и климатические изменения в качестве объекта воздействия имеют дело с этой системой в целом, а не только с подземным льдом. В этом одно из принципиальных отличий подземного льда от льда поверхностного, льда ледников, айсбергов, наледей и т.п. Поверхностный лед, находясь в непосредственном контакте с атмосферой или гидросферой, чутко реагирует на климатические изменения; в отличие от него подземный лед получает переработанную “информацию” о климатических изменениях. Безусловно, в тех районах, в которых потепление климата сопровождается повышением средней годовой температуры верхних слоев криолитозоны до положительных значений, происходит развитие термокарста. Однако в большинстве своем многие рассматриваемые факторы и причины влияют лишь на скорость протекания процесса, а не на его возникновение. Ю.Л. Шур также поддерживает точку зрения В.Л. Суходровского, Г.Ф. Гравис, Н.И. Мухина и Е.М. Катасонова. Обводнение отдельных участков обычно предшествует термокарсту и является чаще его причиной, чем следствием. Практически все исследователи соглашаются, что прогрессирующее развитие термокарстового процесса возможно лишь при положительном водном балансе.

Помимо всего прочего, Ю.Л. Шур отмечает влияние неотектоники на развитие термокарста. По мнению автора, уменьшение интенсивности образования термокарстовых озер в настоящее время по сравнению с прошлым их зарождением на участках, характеризующихся тектоническим покоем или поднятием, – закономерный процесс. Тектонические опускания в свою очередь могут быть причиной ухудшения дренированности территории, обводнения

поверхности и зарождения термокарстовых озер. Именно во влиянии на водный режим территории проявляется опосредованная роль неотектоники.

Подытоживая анализ возможных причин развития термокарста, Ю.Л. Шур отмечает, что термокарст возникает и протекает в сложных природных системах, которые претерпевают изменения, отражающиеся в локальной изменчивости компонентов систем, перестройке их пространственной структуры. В такой ситуации неприемлемы концепции, ориентирующиеся только на ведущий фактор (Шур, 1988).

Несмотря на это, в современной литературе до сих пор обнаруживаются элементы упрощенного подхода при анализе взаимосвязей термических и других характеристик мерзлых толщ, температуры и климатических параметров. Большинство прогнозных моделей, описывающих взаимодействие климата и вечномерзлых толщ, однофакторные, учитывающие только прямые связи криолитозоны с отдельными показателями природной среды, в частности с температурой воздуха; в отдельных моделях в лучшем случае добавляются количество осадков и толщина снежного покрова (Конищев, 2009, 2011). Проблема возможных изменений криолитозоны (в том числе, развития термокарста) в условиях потепления климата – сложная геоэкологическая проблема.

При анализе современной динамики криолитозоны в связи с изменениями климата необходимо анализировать всю совокупность свойств меняющегося вслед за изменениями климата ландшафта и его отдельных компонентов, в особенности эффекты, противодействующие проявлению ведущего процесса. Этот анализ должен быть основан на региональных особенностях взаимосвязей в системе климат – ландшафт – криолитозона, поскольку в разных регионах криолитозоны эти взаимосвязи реализуются по-разному, и эти различия еще довольно слабо изучены (Конищев, 2009). Помимо этого, для существенной перестройки криолитозоны требуются направленные изменения климата в течение тысяч лет. Короткопериодные колебания температуры воздуха, с заметно меньшими амплитудами, к которым относят современное глобальное потепление, практически не повлияют на характер криолитозоны в целом (Шполянская, 2010).

Практически всеми исследователями отмечается влияние техногенных факторов на развитие процесса термокарста. *Техногенные термокарстовые просадки* развиваются практически в пределах всей мерзлой зоны. Полное уничтожение торфянистого горизонта и напочвенного покрова, экскавация грунта и некоторые другие техногенные воздействия, либо вообще не имеют аналогов среди природных воздействий, либо соответствуют катастрофическим изменениям в природной среде. Иногда даже небольшие нарушения естественных условий приводят к бурным проявлениям термокарста. Воздействие этого процесса на инженерные сооружения часто носит катастрофический характер и требует

специальных мероприятий для их предотвращения (Общее мерзлотоведение, 1978). Термокарстовые просадки, вызванные деятельностью человека, имеют крайне негативные последствия: начинается заболачивание, образуются бедленды, создающие благоприятные условия для развития термоэрозии (Романовский, 1993).

Выделяют несколько последовательных стадий образования термокарстовых просадок поверхности почвы: образование незначительного понижения поверхности почвы в начальной фазе таяния льда, заполнение этих просадок водой и образование озерка, расширение и углубление озерной просадочной котловины при полном оттаивании льда на данном участке, образование довольно полноводного озера и, наконец, постепенное высыхание или дренирование термокарстового озера (Ефимов, 1950).

Однако при оттаивании льдистых пород возможно как прогрессивное развитие озерного термокарста, когда процесс продолжается до полного оттаивания льдистых пород, так и его затухание. В данном случае многое зависит от льдистости многолетнемерзлых пород. Чем выше льдистость, тем выше вероятность возникновения прогрессирующего термокарста. Как правило, термокарст прекращается при достижении равенства между глубиной сезонного оттаивания и мощностью слоя талых минеральных отложений, а чем меньше льдистость пород, тем быстрее растёт доля талых отложений. К полному затуханию термокарста приводит также искусственное или естественное уменьшение глубины термокарстовых озёр, а тем более их осушение или миграция (перемещение). Поэтому более благоприятные для развития термокарста условия имеют место во влажном климате по сравнению с климатом засушливым (Общее мерзлотоведение, 1978). Именно поэтому в условиях избыточного увлажнения, характерных для арктических низменностей, термокарстовые озёра встречаются повсеместно. Озёра здесь имеют слабый поверхностный сток по небольшим ручьям и “полосам стока”, в результате которого возможно их дренирование и миграция (Романовский, 1993). В районах с засушливым климатом, где испарение с поверхности превышает количество выпадающих осадков, часто возникают бессточные термокарстовые котловины, глубина и площадь озёр в днище которых уменьшается. Многочисленные высыхающие термокарстовые озёра известны в Центральной Якутии (Ефимов, 1950; Соловьев, 1959 и др.). Обмеление и миграция термокарстовых озёр приводит к образованию остаточных термокарстовых или эрозионно-термокарстовых котловин, называемых в Западной Сибири хасыреями, а в Якутии – аласами (Романовский, 1993). Поверхность аласов и хасыреев обычно террасирована. Это является результатом многократного неполного осушения при развитии эрозионной сети. Когда вода удаляется из термокарстового понижения, прекращается ее “отепляющее воздействие” и температурный режим на поверхности пород изменяется, протаявшие породы начинают промерзать, особенно в северных регионах. Промерзание котловины, как правило,

сопровождается льдообразованием с возникновением повторно-жильных и инъекционных льдов, многолетних бугров пучения (Общее мерзлотоведение, 1974). В последующем при благоприятных условиях возможно протаивание этих образовавшихся льдов. Так, протаивание ледяных ядер бугров булгунныхов приводит к образованию крупных округлых, овальных озер; на месте менее крупных гидролакколитов при протаивании ледяных ядер остаются не столь крупные впадины, обычно заполненные водой (Криолитология, 1985).

В связи с более суровыми климатическими условиями на приморских низменностях севера Якутии, в северных частях Западно-Сибирской низменности и на арктических островах возможно устойчивое существование мелких (глубиной до 1–1,2 м) термокарстовых озер, донные отложения которых сезонно оттаивают, но под сезоннотальным слоем залегают высокольдистые отложения. При осадконакоплении донные отложения в них промерзают сингенетически. В днищах таких мелких термокарстовых водоемов могут расти повторно-жильные льды и образовываться полигонально-валиковый микрорельеф.

Таким образом, под термокарстовыми озерами может устойчиво существовать как сезоннотальный слой с температурой поверхности пород дна водоема ниже 0°C, так и талики с температурой поверхности пород дна водоема выше 0°C. Мощность подозерного талика и его размеры в плане зависят от глубины и площади озера, времени его существования, распределения температур донных отложений по площади. Если озеро существует на одном месте очень долго, то конфигурация подозерного талика приобретает стационарную, конечную форму. Под озерами, размер которых по короткой оси превышает удвоенную мощность многолетнемерзлой толщи, образуются сквозные талики. Отсутствие сквозного талика в этом случае свидетельствует о том, что процесс образования талика не завершился. При размерах термокарстовых озер меньше удвоенной мощности мерзлой толщи формируются несквозные подозерные талики (Общее мерзлотоведение, 1978).

Формы термокарстового рельефа существенно зависят от того, какие типы подземных льдов и льдистых отложений подвергаются оттаиванию, а также от особенностей распространения льда в мерзлых породах, форм их локализации и т.д. (Качурин, 1961). При термокарсте по повторно-жильным льдам возможны разные формы его проявления. С одной стороны, при росте ледяных жил возникают повышения (валики) над жилами. Между этими повышениями скапливается вода, содействуя протаиванию льдистых пород, заключенных внутри ледяной сетки. Образуется полигонально-ячеистый рельеф. С другой стороны, вытаивают преимущественно жильные льды, что приводит к формированию полигонального рельефа с провальными озерами и западинами, вытянутыми в виде сети полос (решетки), наследующих жилы льда. В обоих случаях вытаивание ледяных жил приводит к слиянию отдельных впадин между собой и перераспределению (растеканию) минеральной

составляющей пород, слагающих промежутки между жилами по дну растущего озера (Общее мерзлотоведение, 1974). При оттаивании *сингенетических повторно-жильных льдов* (при отсутствии стока из просадочных понижений) образуются разные по размерам (до нескольких километров), но достаточно глубокие (до 3 – 6 м) термокарстовые озера с плоским дном, углубленным на участках активного вытаивания льда до 8 – 10 м и более. При их осушении или миграции (перемещении) образуются аласные котловины. При протаивании *мерзлых отложений с маломощными полигонально-жильными льдами* (мощностью до 4 – 6 м) образуются мелкие озера глубиной до 1,5 – 2 м с прямоугольными очертаниями берегов. При спуске таких озер в днищах формируются остаточные полигональные бугристые формы микрорельефа. Протаивание *эпигенетически промерзавших льдистых отложений без жильных льдов* приводит к формированию разнообразных по форме и глубине озер с мягкими очертаниями берегов. При этом наиболее глубокие из них образуются в связи с протаиванием крупных линз и пластов сегрегационных и инъекционных льдов (Общее мерзлотоведение, 1978).

Наиболее широко термокарстовые образования развиты в пределах аккумулятивных поверхностей, сложенных рыхлыми, особенно пылевато-глинистыми отложениями. Поэтому ареной наиболее массового развития термокарста являются северные приморские низменности субарктического пояса. С удалением на юг признаки развития процесса постепенно затухают, что связано с менее широким распространением подземных льдов. За пределами криолитозоны встречаются лишь реликтовые термокарстовые формы рельефа, часто существенно преобразованные процессами эрозии, денудации и др. (Ершов, 2002).

1.2. История развития термокарстового рельефа

История развития термокарста может быть рассмотрена лишь в связи с историей развития многолетнемерзлых горных пород, от которых этот процесс неотделим (Качурин, 1961).

В истории развития Земли с определенной периодичностью возникали ледниково-криогенные периоды. Различные авторы выделяют разное их количество. Опираясь на абсолютные датировки ледниковых отложений, выделяют следующие ледниковые эры: раннепротерозойскую (2500 – 2000 млн. л.н.), позднепротерозойскую (900 – 630 млн. л.н.), палеозойскую (460 – 230 млн. л.н.) и кайнозойскую (30 – 0 млн. л.н.) (Основы геокриологии, 1998).

Современная криолитозона сформировалась в кайнозойскую ледниковую эру (во второй половине третичного периода началось глобальное похолодание климата), в предшествующие ей 200 млн. лет условий для формирования континентальных ледниковых покровов и многолетнемерзлых пород не было. Для климата кайнозойской ледниковой эры характерны

ритмичные колебания, при которых холодные периоды неоднократно сменялись теплыми, определяя динамику криолитозоны. Выделяют до 20 и более циклов колебания климата, но в целом они объединяются в четыре крупных периода: раннеплейстоценовый, среднеплейстоценовый, позднеплейстоценовый и голоценовый (Основы геоэкологии, 1998).

Несмотря на то, что глобальное похолодание климата началось примерно 30 млн. л.н. формирование мерзлых толщ началось на крайнем северо-востоке Евразии примерно в интервале 2,5–1,5 млн. лет тому назад (рисунок 1.2). Выделяют четыре этапа развития криолитозоны (Романовский, 1993).

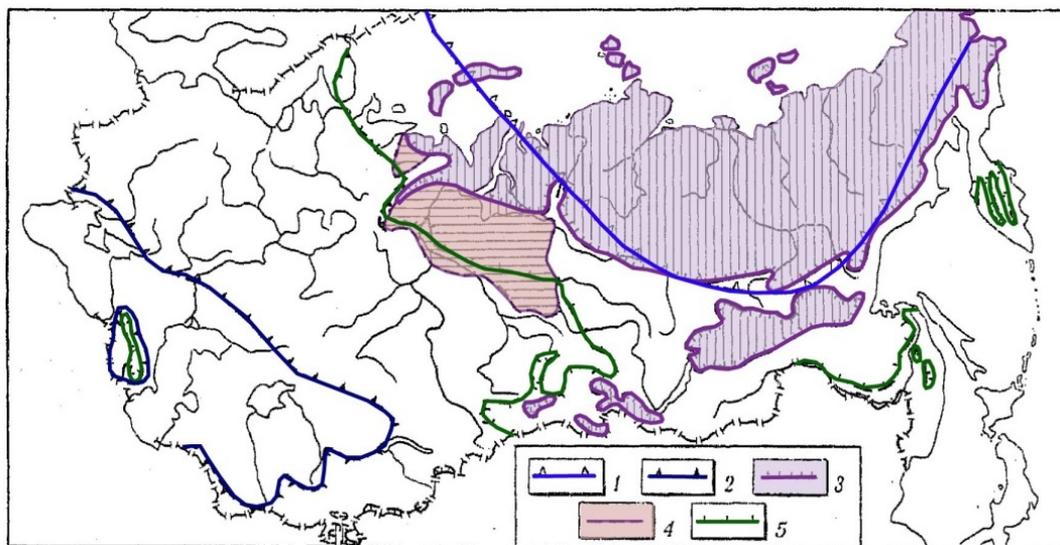


Рисунок 1.2. Возможные границы распространения криолитозоны в кайнозое (по В.В. Баулину, Н.С. Даниловой, К.А. Кондратьевой): 1 – в неогене - раннем плейстоцене; 2 – в позднем плейстоцене; 3 – в климатическом оптимуме голоцена; 4 – в климатическом оптимуме голоцена и позднем голоцене на глубине 70 – 200 м от поверхности; 5 – в настоящее время

Первый этап развития криолитозоны охватывает время с конца плиоцена до начала верхнего плейстоцена (от 2,0 – 1,5 млн. лет до 150 – 110 тыс. лет назад) – включает раннеплейстоценовый и среднеплейстоценовый периоды. В раннем плейстоцене произошли значительные похолодания климата, которые привели к образованию мерзлых толщ и продвижению к югу границы их распространения (рисунок 1.2). В среднем плейстоцене наблюдалось несколько продолжительных циклов похолоданий и потеплений климата, поэтому в холодные периоды (криохроны) мерзлота продвигалась далеко на юг, в теплые периоды (термохроны) происходила деградация мерзлых толщ с юга. В то же время на севере Восточной Сибири происходило накопление высокольдистых субэаральных синкриогенных отложений с мощными повторно-жильными льдами (“ледового комплекса”). В результате сформировались две геоэкологические зоны: северная – с преимущественно непрерывным типом условий проявления многолетнего криогенеза (с колебаниями термодинамического уровня теплообмена в отрицательном диапазоне) и южная – с преимущественно прерывистым типом условий

проявления многолетнего криогенеза (с чередованием многолетнего протаивания и промерзания литосферы). Для этапа также были характерны трансгрессии и регрессии Полярного бассейна на севере низменных равнин. В результате трансгрессий в их контурах формировались засоленные отложения, а мерзлые толщи деградировали под дном моря. При регрессиях происходило многолетнее промерзание отложений и расширение криолитозоны к северу. При этом в Западном и Восточном секторах Российской Арктики трансгрессивно-регрессивный режим проявлялся неодинаково. Равнины Западного сектора практически во все этапы плейстоцена формировались в условиях преимущественно морского осадконакопления, а равнины Восточного сектора формировались в условиях континентального осадконакопления (Шполянская, 2012).

Описываемый этап завершился в начале позднего плейстоцена, в казанцевское (микулинское) межледниковье (термохрон), которое многие исследователи считают весьма теплым. Несмотря на деградацию мерзлоты и смещение ее границ к югу, в Центральной Якутии, в приморских низменностях Северо-Востока и в Западной Сибири севернее 66° с.ш. продолжалось накопление отложений “ледового комплекса”, что свидетельствует о более суровых геофизиологических условиях, чем современные.

Второй этап развития криолитозоны охватывает период с позднего плейстоцена до раннего голоцена включительно (от 150–90 до 9,6–8 тыс. лет назад). Этот этап отличается повышенной суровостью и сухостью климата. На период 22–18 тыс. лет назад по реконструкциям А.А. Величко приходится максимум суровости геофизиологических условий. Этот период им назван “климатическим минимумом плейстоцена”, а территория, занятая многолетнемерзлыми породами – “великой криогенной областью”. Следы глубокого сезонного промерзания и грунтовые жилы обнаружены до побережья Черного моря; вся Сибирская платформа, Забайкалье и Прибайкалье были заняты многолетнемерзлыми породами. Поздний плейстоцен – это время глобальной регрессии Мирового океана. Снижение уровня моря по сравнению с современным оценивается в среднем примерно в 100 м. Вышедшие из-под уровня моря породы промерзали – на обширных пространствах оголившегося шельфа формировались отложения “ледового комплекса”.

Третий этап развития криолитозоны включает главным образом средний голоцен (от 9,5 – 8 до 4,5 – 3 тыс. лет назад), характеризуется потеплением климата (“климатическим оптимумом голоцена”) и деградацией мерзлых толщ. Общее глобальное повышение температуры воздуха составляло 2–2,5°C по сравнению с современностью (Шполянская, 2010), наблюдалось небольшое увеличение количества осадков (Величко, 1989). К концу этого этапа маломощные мерзлые толщи на юге криолитозоны (мощностью менее 200 – 250 м) протаяли полностью, а севернее мерзлота оттаяла лишь с поверхности (от первых десятков метров до 100

– 150 м). В результате образовался слой “реликтовой мерзлоты”, который в настоящее время сохранился на севере Восточно-Европейской платформы и Западно-Сибирской плиты. Оттаивание высокольдистых плейстоценовых синкриогенных отложений и массивов подземных льдов в эпикриогенных дисперсных толщах привело на севере криолитозоны к активному развитию озерного термокарста (Романовский, 1993). Именно на этом этапе происходит широкое и более глубокое развитие термокарста во всех районах криолитозоны, реликтовые формы которого сохранились до настоящего времени (Качурин, 1961).

Четвертый этап развития криолитозоны охватывает поздний голоцен (от 4,5 – 3 тыс. лет назад до настоящего времени) и характеризуется более суровыми климатическими и геокриологическими условиями, чем в климатический оптимум. В начале этого периода происходят аградация мерзлых толщ и продвижение к югу границы их распространения. Над реликтивными мерзлыми толщами аккумулятивных равнин промерзание происходило быстрее и на большую глубину в силу их экранирующего влияния на внутриземной тепловой поток. Активизировался процесс криогенного растрескивания и роста повторно-жильных льдов. Началось дренирование термокарстовых озер, образование аласов и хасыреев, сопровождавшееся промерзанием подозерных таликов. На протяжении этого этапа происходили периодические изменения природных условий, которые приводили к затуханию процесса термокарста в криохроны и интенсификации его в термохроны (Романовский, 1993).

1.3. Состояние исследований динамики термокарстовых озер

При изучении реакции криолитозоны на современное изменение климата достаточно большое внимание уделяется исследованию термокарстовых озер как возможных индикаторов состояния криолитозоны. Особый интерес к динамике термокарстовых озер отмечается с начала 2000-х годов, когда зарубежными и отечественными учеными были выполнены многочисленные исследования в этом направлении. Выполненные исследования охватывают области как сплошного, так и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород в пределах полуострова Аляска и криолитозоны Евразии, включая Европейскую ее часть, Западную Сибирь и Восточную Сибирь (рисунок 1.3, таблица 1.2).

На территории Канады подобные исследования по изучению динамики термокарстовых озер не проводились. Имеются лишь исследования, посвященные изучению отдельных криогенных процессов, в которых упоминается о возможном развитии или затухании термокарста. Одни из таких исследований посвящены изучению склоновых процессов – криогенных оползней (Kokelj, 2005; Lantz, Kokelj, 2008), а другие – изучению термоэрозионных процессов (Fortier et al, 2007). Аналогично на территории Скандинавии отмечается ряд

исследований, посвященных изучению бугров пучения и связанных с их развитием термокарстовых озер (Zuidhoff, Kolstrup, 2000; Luoto, Seppala, 2003).



Рисунок 1.3. Исследования динамики термокарстовых озер на территории России

Таблица 1.2

Исследования динамики термокарстовых озер

Название работы	Район	Период наблюдения, гг.	Материалы	Результаты	Дополнительные сведения
Полуостров Аляска					
Fitzgerald D., Riordan B.A. Permafrost and ponds. Remote sensing and GIS used to monitor Alaska wetlands at the landscape level // <i>Agroborealis</i> , 2003, 35, №1, p.30-35	10 участков на территории Аляски (сплошная и прерывистая мерзлота)	1950 – 2001	Аэрофотоснимки 1950 и 1980 гг. (3м), Космические снимки со спутника Landsat 1990 и 2000 гг. (30м)	Значительное сокращение площади озер в зоне прерывистой мерзлоты (до 50%), Незначительное сокращение в зоне сплошной мерзлоты (менее 6%)	Рассмотрены бессточные озера
Riordan B., Verbyla D., David McGuire A. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950-2002 remotely sensed images // <i>Journal of geophysical research</i> , 2006, vol. 111, G04002, doi:10.1029/2005JG000150	9 участков на территории Аляски (сплошная и прерывистая мерзлота)	1950 – 2002	Аэрофотоснимки 1950 и 1980 гг. (3м), Космические снимки со спутника Landsat 1990 и 2000 гг. (30м)	Сокращение площади в зоне прерывистой мерзлоты (от 4 до 31%), Незначительные изменения в зоне сплошной мерзлоты (+1%)	Рассмотрены бессточные озера площадью более 0,2 га
Yoshikawa K., Hinzman L. Shrinking thermokarst pond and groundwater dynamics in discontinuous permafrost near council, Alaska // <i>Permafrost and periglacial processes</i> , 2003, 14, p. 151-160	Отдельный район на полуострове Сьюард (прерывистая мерзлота)	1950 – 2000	Аэрофотоснимки 1950 и 1981 гг., Космические снимки со спутника Ikonos 2000 г.	Сокращение площади у 22 озер и увеличение площади у 2 озер; Отмечается появление новых озер	Изучено 24 озера
Grosse G., Walter K., Romanovsky V. Monitoring thaw lake dynamics using high-resolution remote sensing, 2008 (http://instaar.colorado.edu/QGISL/ARCN/high_res_workshop/presentations/Grosse_High_Res_2008.pdf)	В районе мыса Эспенберг на полуострове Сьюард (прерывистая мерзлота)	1949 - 2009	Аэрофотоснимки 1949, 1970, 1980 (1м) и 2000 гг. (0,6м), Corona KH-4 1960 г. (8м), Ikonos 2000 г. (1м), TerraSAR-X 2000 г. (1м)	Разнонаправленные изменения: расширение озер со скоростью наступления береговой линии до 1м/год, исчезновение и уменьшение площади крупных озер, незначительное появление новых озер	–
Klein E., Berg E., Dial R. Wetland drying and succession across the Kenai Peninsula Lowland, south-central Alaska // <i>Canadian journal of forest research</i> , 2005, 35, p. 1931-1941	Полуостров Кенай в южной части Аляски (вне мерзлоты)	1950 – 1996	Аэрофотоснимки 1950 (3м) и 1996 (1м) гг., полевые обследования	Уменьшение площади озер на 14% и заболоченных мест на 80%	–

Hinkel K., Eisner W., Bockheim J., Nelson F., Peterson K., Dai X. Spatial extent, age, and carbon stocks in drained thaw lake basins on the Barrow Peninsula, Alaska // Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2003, vol. 35, № 3, p. 291-300	Полуостров Барроу в пределах Северной Аляски (сплошная мерзлота)	1948 – 2000	Аэрофотоснимок 1948 г., космический снимок со спутника Landsat 2000 г. (15м), полевые обследования 2001 – 2002 гг.	Отмечается спуск озер	Рассмотрены озера площадью более 1 га
Hinkel K., Jones B., Eisner W., Cuomo C., Beck R., Frohn R. Methods to natural and anthropogenic thaw lake drainage on the western Arctic coastal plain of northern Alaska // Journal of geophysical research, 2007, vol.112, F02S16, doi:10.1029/2006JF000584	Арктическая Прибрежная Равнина в пределах Северной Аляски (сплошная мерзлота)	1949 – 2002	Аэрофотоснимки 1949 и 1950 гг. (5м), Космические снимки со спутника Landsat 1974 и 2000 гг. (80м и 30м), Опросы коренного населения	Частичное или полное сокращение площади у 50 озер из 7400 проанализированных озер	Рассмотрены озера площадью более 10 га
Eisner W., Cuomo C., Hinkel K., Jones B., Brower R. Advancing landscape change research through the incorporation of Inupiaq knowledge // Arctic, 2009, vol. 62, № 4, p. 429-442	Полуостров Барроу в пределах Северной Аляски (сплошная мерзлота)	1985 – 1992	Космические снимки со спутника Landsat TM 1985 и 1992 гг. (30м), Опросы коренного населения	Частичное или полное сокращение площади у 50 озер из 7400 проанализированных озер, отмечаются случаи развития термокарста в результате хозяйственной деятельности	–
Eisner W., Hinkel K., Jones B., Cuomo C. Using indigenous knowledge to assess environmental impact of overland travel routes, Arctic Coastal Plain of Alaska / In: Ninth International Conference on Permafrost, Kane DL & Hinkel KM (eds), Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008, vol. 1, p. 415-420	Полуостров Барроу в пределах Северной Аляски (сплошная мерзлота)	1955 – 2002	Карта Спенсера 1959 г., Аэрофотоснимки 1979 и 2005 гг., Космические снимки со спутника Landsat 2002 г., Опросы коренного населения	Отмечается спуск озер, отмечаются случаи развития термокарста	–
Криолитозона Евразии					
Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изучение изменений распространения термокарстовых озер России по разновременным космическим снимкам // Криосфера Земли, 2009, т. 15, №2, с. 16 – 26	19 участков на территории России (сплошная и прерывистая мерзлота)	1970 – 2000	Космические снимки со спутника Landsat 1970 – 2000 гг. (80м и 30м); космические снимки, полученные камерой МКФ-6 (Союз - 22) (20м)	В пределах 11 участков изменений не обнаружено, в пределах 3 участков (в сплошной мерзлоте) – сокращение площади озер, в пределах Центральной Якутии и Дальнего Востока – увеличение площади озер, в пределах Яно-Индибирской низменности и котловин Забайкалья – разнонаправленные изменения площади озер	Рассмотрены все озера в пределах участков
Север Европейской России					
Елсаков В.В., Марущак И.О. Межгодовые изменения термокарстовых озер северо-востока Европейской России // Исследование земли из космоса, 2011, №4, с. 1 – 13	5 участков на Северо-Востоке Европейской России (сплошная и островная мерзлота)	1973 – 1988 1988 – 2002 2002 – 2007	Космические снимки со спутника Landsat 1973, 1988, 1999 и 2007 гг. (80м и 30м); Для оценки надежности дешифрирования озер: QuickBird (2,4м, 03.07.2007) и Landsat TM (30м, 07.07.2007)	Сокращение площади озер в сплошной и островной мерзлоте. Максимальные изменения в сплошной мерзлоте – с 1988 по 2002 гг., в островной мерзлоте – с 1973 по 1988 гг. Отмечается снижение интенсивности изменений после 2002 г.	Рассмотрены озера площадью более 5 га
Смирнова И.О., Сухачева Л.Л., Русанова А.А. Изучение динамики термокарстовых озер и береговой линии моря на Северо-Востоке Европейской части России по материалам разновременных космических съемок // Тезисы конференции “Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы”, Москва 5 – 6 июня 2013 г., с. 128 – 132	Участок на Северо-Востоке Европейской России (сплошная мерзлота)	1988 – 2007	Космические снимки со спутника Landsat 1988 и 2000 гг. (30м), ALOS AVNIR-2 2007 г.	Интенсивное сокращение площади озер в сплошной мерзлоте – с 1988 по 2000 гг. Замедление процессов сокращения площади озер с 2000 по 2007 гг. Отмечается увеличение площади отдельных озер в результате хозяйственной деятельности	–
Западная Сибирь					
Smith L.C., Sheng Y., Macdonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes // Science, 2005, v. 308, №5727, p. 1429	Обширная территория Западной Сибири в целом (сплошная и прерывистая мерзлота)	1973 – 1998	Космические снимки со спутника Landsat MSS 1973 г. и снимки, полученные системой МСУ-СК (Ресурс-01) 1998 г. (150 м); Космические снимки MODIS 2004 г. (250 м) для проверки	Увеличение площади озер в сплошной мерзлоте на 12%, сокращение площади озер в прерывистой мерзлоте на 9%; В обеих зонах отмечается исчезновение 125 озер	Рассмотрены озера площадью более 40 га
Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вест. Томск. Госуд. Ун-та, 2008, № 311, с. 185 – 189	11 участков на территории Западной Сибири (сплошная и прерывистая мерзлота)	1973 – 2006	Космические снимки со спутника Landsat 1973 – 2001 гг., снимки, полученные Метеор-3М 2005 – 2006 гг., полевые обследования	Увеличение площади озер в сплошной мерзлоте от 7 до 12%, уменьшение площади озер в прерывистой мерзлоте от 1 до 29%	Рассмотрены озера площадью более 20 га

Брыксина Н.А., Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Изучение взаимосвязи изменений климатических и термокарстовых процессов в зонах сплошной и прерывистой мерзлоты Западной Сибири // Вестник Югорского государственного университета, 2009, №3, с. 3-12	24 участка на территории Западной Сибири (сплошная и прерывистая мерзлота)	1973 – 2006	Космические снимки со спутника Landsat 1973 – 2006 гг.	Увеличение площади озер севернее 70° с.ш., уменьшение площади озер южнее 70° с.ш.	–
Днепровская В.П., Полищук Ю.М. Геоинформационный анализ геокриологических изменений в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири с использованием космических снимков // Геоинформатика, 2008, №2, с. 9 – 14	Участок на территории Западной Сибири (прерывистая мерзлота)	1984 – 2001	Космические снимки со спутника Landsat 1984, 1988, 1989, 1999 и 2001 гг.	Уменьшение площади озер на 9%, отмечаются озера, площадь которых увеличилась	Изучено 91 озеро
Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М., Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исследование земли из космоса, 2009, №4, с. 1-9	2 участка на территории Западной Сибири (прерывистая мерзлота)	1973 – 2005	Космические снимки со спутника Landsat 1984, 1988, 1989, 1999, 2001 и 2002 гг., снимки полученные системой МК-4 (Ресурс-Ф) 1993 г. и SPOT-5 2005 г.	Уменьшение площади озер в пределах одного участка на 20%, в пределах второго – на 19%; на обоих участках встречаются озера, площадь которых увеличилась	В пределах одного участка проанализировано 40 озер, в пределах второго – 91 озеро
Kirpotin S., Polishchuk Yu., Zakharova E., Shirokova L., Pokrovsky O., Kolmakova M., Dupre B. One of possible mechanisms of thermokarst lakes drainage in West-Siberian North // International Journal of Environmental Studies, 2008, vol. 65, № 56, p. 631-635	Участок на территории Западной Сибири – в междуречье Надьма и Пура (прерывистая мерзлота)	–	Полевые обследования 2008 г.; фотографии, полученные с воздуха	Отмечается спуск маленьких озер, расположенных на более высоком гипсометрическом уровне, в крупные озера	–
Кравцова В.И., Тарасенко Т.В. Изучение и картографирование динамики термокарстовых озер на территории Западной Сибири по разновременным космическим снимкам // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата, 2010, №1, с. 82-87	3 участка на территории Западной Сибири (сплошная и прерывистая мерзлота)	1973 – 2001 1988 – 2001 1985 – 2001	Космические снимки со спутника Landsat 1973, 1988, 1985 и 2001 гг.	Уменьшение площади озер в сплошной мерзлоте на 3% (для отдельных фрагментов – от 2 до 30%), увеличение площади озер в прерывистой мерзлоте на 4% при наблюдаемом спуске единичных озер;	Рассмотрены все озера в пределах участков
Север Восточной Сибири					
Hese S., Grosse G., Pocking S. Object based thermokarst lake change mapping as part of the ESA "Data User Element permafrost" // Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-4/C7 2010	Дельта р. Лена (сплошная мерзлота)	1975 – 2009	Космические снимки со спутника Landsat 1975 г., Hexagon 1975 г., Rapid Eye 2009 г. (15 м)	Отмечаются незначительные изменения без конкретизации	–
Гюнтер Ф., Моргенстерн А., Ульрих М., Ширрмейстер Л. Анализ развития термокарстового рельефа в южной части дельты Лены с помощью повторных спутниковых снимков и топографических съемок. В кн. Геоморфологические процессы и их прикладные аспекты (труды VI Шукинских чтений). М., 2010, с. 524	Южная часть дельты р. Лены, остров Курунгнах (сплошная мерзлота)	1968 – 2006	Космические снимки Corona 1968 г. (2,5м), ALOS PRISM 2006 г. (2,5 м), полевые обследования	45 озер исчезло, отмечается увеличение площади отдельных озер площадью более 10 га на 2,1%	–
Grosse G, Romanovsky V, Walter K, Morgenstern A, Lantuit H, Zimov S. Distribution of Thermokarst Lakes and Ponds at Three Yedoma Sites in Siberia / In: Ninth International Conference on Permafrost, Kane DL & Hinkel KM (eds), Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008, vol. 1, p. 551-556	3 участка на Севере Восточной Сибири (Быковский полуостров, дельта р. Лены, в районе поселка Черский)	–	Космические снимки Spot-5 (2,5м), Ikonos (0,8м); GLWD (Lehner, Doll, 2004)	Отмечается появление маленьких озер в районе поселка Черский и исчезновение некоторых озер на Быковском полуострове в результате хозяйственной деятельности	–
Grosse G., Walter K., Romanovsky V. Monitoring thaw lake dynamics using high-resolution remote sensing, 2008 (http://instaar.colorado.edu/QGISL/ARCN/high_res_workshop/presentations/Grosse_High_Res_2008.pdf)	Участок в долине р. Колыма (сплошная мерзлота)	1960 – 2010	Космические снимки Corona KH-4A (2,5м), Gambit KH-7 (1м), Ikonos (1м), ALOS PRISM (2,5м), TerraSAR-X (1м), QuickBird (0,8м), SPOT-5 (2,5м)	Разнонаправленные изменения площади озер: расширение одних и исчезновение других	–
Веремева А.А. Закономерности организации современного рельефа приморских низменностей севера Якутии на основе использования ГИС-технологий. Материалы четвертой конференции геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 7-9 июня 2011 г. Т. 2. Часть 5. Региональная и историческая геокриология. Часть 6. Динамическая геокриология. М: Университетская книга, 2011, с. 29 – 35	2 участка в пределах Колымской низменности – среднее течение р. Бол. Чукочь и нижнее течение р. Бол. Чукочь (сплошная мерзлота)	1969 – 2001	Космические снимки со спутника Landsat 1973 и 2001 гг., Corona 1969 г. (5м)	Разнонаправленные изменения: наблюдается, как уменьшение, так и увеличение площади озер	Рассмотрены озера площадью более 1 га

Тюкавина А. Изучение динамики термокарстовых озер правобережья нижней Яны по разновременным дистанционным данным. В кн. Исследования молодых географов. М: Географический факультет МГУ, 2009, с. 109 - 112	Участок на территории Яно-Индигирской низменности (сплошная мерзлота)	1951 – 2001	Аэрофотоснимок 1951 г. (1м), космические снимки со спутника Landsat 1972 и 2001 гг. (80 и 30 м)	Разнонаправленные изменения площади озер с общим уменьшением в 10%	–
---	---	-------------	---	--	---

Помимо исследований динамики термокарстовых озер также имеется ряд работ, посвященных математическому моделированию пространственно-временных изменений термокарстовых озер (Полищук, Полищук, 2013) и применению методов математической морфологии ландшафта, в частности, для оценки риска поражения линейных инженерных сооружений термокарстовыми процессами (Капралова, Викторов, 2012; Викторов с соавт., 2012).

Все исследования, посвященные непосредственно изучению изменений площади термокарстовых озер, основаны на анализе разновременных космических снимков (пары снимков или более): географической привязке снимков, их дешифрировании – выделении водных объектов, сравнении полученных результатов и подсчете количественных характеристик – площади озер за разные даты. В некоторых работах, помимо этого, приводятся результаты полевых обследований (Klein et al, 2005; Hinkel et al, 2003; Кирпотин с соавт., 2008; Kirpotin et al, 2008; Гюнтер с соавт., 2010).

В качестве основных материалов практически во всех исследованиях используются космические снимки со спутника Landsat, имеющие пространственное разрешение 80 и 30 м. Снимки сверхвысокого разрешения, включая аэрофотоснимки и космические снимки с разведывательных спутников Corona (камера KeyHole), широко используются в исследованиях Аляски. На территории Евразии материалы сверхвысокого разрешения используют лишь ученые, изучающие отдельные районы на Севере Восточной Сибири.

В зависимости от методических особенностей и используемых материалов в большинстве исследований вводится ограничение на площади анализируемых озер, т.е. учитываются озера площадью более 0,2 га (Riordan et al, 2006), более 10 га (Hinkel et al, 2007), более 5 га (Елсаков, Марущак, 2010), более 40 га (Smith et al, 2005), более 20 га (Кирпотин с соавт., 2008), более 1 га (Веремеева, 2011). Самое большое ограничение (40 га) было использовано при изучении изменений площади озер на территории Западной Сибири L.C. Smith, Y. Sheng, G.M. Macdonald и L.D. Hinzman в 2005 году. В этом исследовании была проанализирована обширная территория Западной Сибири в целом (рисунок 1.3) и использованы снимки с пространственным разрешением 150 м (самым низким среди материалов других исследователей). В ряде работ такие ограничения не вводятся, а рассматриваются все озера (Кравцова, Быстрова, 2009; Кравцова, Тарасенко, 2010; Тюкавина, 2009). Особенностью последних работ является составление схем динамики озер на фрагменты эталонных участков, которые позволяют визуально зафиксировать изменения отобразившихся на схеме озер. Большинство же остальных

работ ограничиваются статистическим анализом и представлением количественных данных о суммарном изменении площади озер без конкретного картографического отображения динамики озер.

Как правило, исследования ориентированы на анализ изменений в пределах небольших эталонных участков либо же охватывают отдельные районы. К обзорным исследованиям следует отнести работы, выполненных в пределах обширной территории, в том числе при анализе большого количества эталонных участков (Fitzgerald, Riordan, 2003; Riordan et al, 2006; Кравцова, Быстрова, 2009; Елсаков, Марущак, 2010; Smith et al, 2005; Кирпотин с соавт., 2008; Брыксина с соавт., 2009). Большинство же работ, выполненные в пределах отдельных эталонных участков, следует считать локальными исследованиями (Yoshikawa, Hinzman, 2003; Grosse et al., 2008б; Klein et al, 2005; Hinkel et al, 2007; Смирнова с соав., 2013; Днепровская с соавт., 2009; Кравцова, Тарасенко, 2010; Гюнтер с соавт., 2010; Grosse et al, 2008а; Веремеева, 2011; Тюкавина, 2009).

Разные регионы обследованы неравномерно, исследования различаются по детальности и результатам. Рассмотрим основные особенности и результаты выполненных работ.

На территории Аляски обзорное исследование было выполнено Fitzgerald D., Riordan B.A. (2003) и Riordan B., Verbyla D., David McGuire A. (2006) (таблица 1.2). Их целью было определение влияния потепления климата на изменение площади термокарстовых озер Аляски в зоне как сплошного, так и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород, в связи с чем был выполнен анализ изменений площади бессточных озер в пределах 10 эталонных участков (рисунок 1.4).

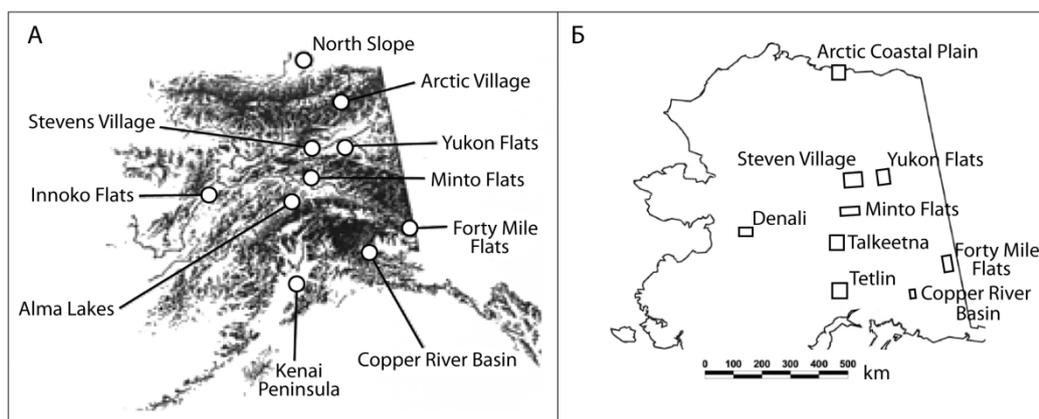


Рисунок 1.4. Расположение эталонных участков на территории Аляски, исследованных в работах Fitzgerald D., Riordan B.A., 2003 (А) и Riordan B., Verbyla D., David McGuire A., 2006 (Б)

В результате этих исследований в зоне сплошного распространения ММП была установлена относительная стабильность (сокращение площади озер на 6% и увеличение на 1% на территории отдельных эталонных участков), обусловленная низкими температурами и большой мощностью многолетнемерзлых пород. В зоне прерывистого распространения ММП

выявлено значительное уменьшение площади озер (до 50% на территории отдельных участков), обусловленное таянием меньших по мощности многолетнемерзлых пород под влиянием потепления климата, приводящим к просачиванию воды в грунт и уменьшению площади озера (рисунок 1.5).

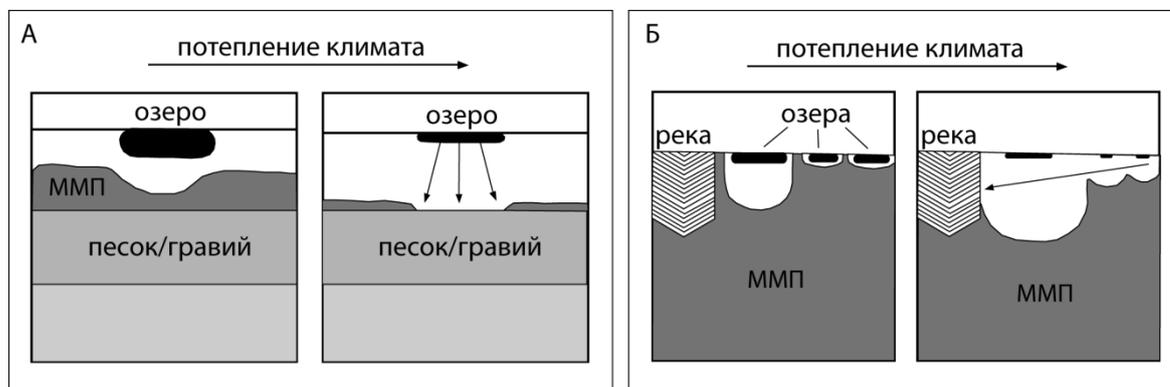


Рисунок 1.5. Возможные механизмы исчезновения термокарстовых озер при потеплении климата

Помимо обзорного исследования на территории Аляски выполнен ряд работ локального уровня. В пределах прерывистого распространения мерзлоты такие исследования были проведены на полуострове Сьюард (Yoshikawa, Hinzman, 2003; Grosse et al., 2008б); вне области распространения мерзлоты – на полуострове Кенай (Klein et al, 2005). Во всех этих исследованиях установлено преобладающее уменьшение площади озер, хотя отмечается также расширение отдельных озер и появление новых (таблица 1.2). В качестве основных причин сокращения площади озер, аналогично Fitzgerald D., Riordan B.A. (2003), называется таяние многолетнемерзлых пород под влиянием потепления климата и просачивание воды в протаявший грунт. Также указывается на сокращение суммы годовых осадков, т.е. на уменьшение водного баланса (Klein et al, 2005). В качестве причины появления новых малых озер называется антропогенная деятельность (Grosse et al., 2008б).

В области сплошного распространения мерзлоты на севере Аляски серия локальных исследований была проведена К. Hinkel с соавторами в пределах Арктической Прибрежной Равнины (рисунок 1.6, слева). Первые их работы были посвящены определению возраста котловин, ранее занятых термокарстовыми озерами (Frohn et al, 2001; Hinkel et al, 2003) и анализу морфометрических показателей имеющихся озер и котловин (Frohn et al, 2005; Hinkel et al, 2005). Динамика площади этих озер была оценена в более поздних работах (Hinkel et al, 2007; Eisner et al, 2008; Eisner et al, 2009), в результате которых было установлено частичное сокращение площади или полное исчезновение 50 термокарстовых озер (рисунок 1.6, справа) из 7400 озер, выделенных в районе. В связи с небольшим числом изменившихся озер относительно общего их количества авторы указывают на относительную стабильность

изучаемой территории, расположенной в области сплошного распространения ММП, аналогично Fitzgerald D., Riordan B.A. (2003) и Riordan B., Verbyla D., David McGuire A. (2006).



Рисунок 1.6. Район исследования К. Hinkel с соавторами (слева); озера, площадь которых сократилась с 1970-х по 2000 г. с выявленными причинами изменений (справа)

В исследованиях К. Hinkel с соавторами отмечается сложность выявления причин наблюдаемых изменений площади озер. В результате опроса коренного населения (Hinkel et al, 2007; Eisner et al, 2009) в качестве причин изменений были названы – береговая эрозия, эрозионная деятельность водотоков и их меандрирование, а также влияние деятельности человека, в частности использование гусеничного транспорта и вездеходов (Eisner et al, 2008). Именно вдоль трасс отмечаются спущенные озера. Выводов о влиянии потепления климата на изменения площади термокарстовых озер не делается, в отдельных случаях лишь упоминается о возможности влияния.

Все представленные работы на территории Аляски объединяют близкие результаты исследования. В области сплошного распространения многолетнемерзлых пород отмечается относительная стабильность площади озер. А в области прерывистого распространения ММП – значительное сокращение площади озер, которое большинство исследователей связывают с наблюдаемым потеплением климата, в частности с таянием многолетнемерзлых пород и просачиванием воды в протаявший грунт (Fitzgerald, Riordan, 2003; Riordan et al, 2006; Yoshikawa, Hinzman, 2003).

На территории Евразии обзорные исследования по изучению изменений площади озер были проведены рядом ученых. Такие исследования были выполнены на территории всей России (Кравцова, Быстрова, 2009), в пределах Европейской ее части (Елсаков, Марущак, 2010) и в Западной Сибири (Smith et al, 2005; Кирпотин с соавт., 2008; Брыксина с соавт., 2009).

На территории всей России было проанализировано 19 эталонных участков (рисунок 1.7), выбранных в различных ландшафтных условиях с охватом зон сплошного, прерывистого и островного распространения ММП (Кравцова, Быстрова, 2009).

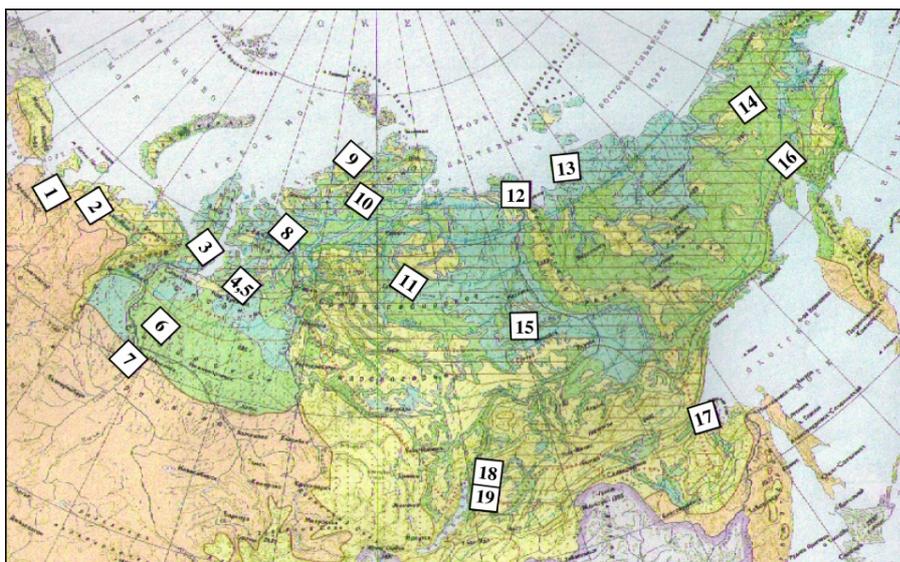


Рисунок 1.7. Размещение эталонных участков (Кравцова, Быстрова, 2009)

В результате исследования на территории проанализированных участков были зафиксированы различные тенденции изменения площади озер. В пределах 11 участков площади озер не изменились, на 3-х участках (на южном Ямале, левобережье р. Пур, правобережье р. Енисей) отмечено сокращение площади озер, на 2-х (в Центральной Якутии и в районе Удской губы на Дальнем Востоке) – значительное увеличение площади и появление новых озер и на 3-х (на Яно-Индигорской низменности, в Верхнеангарской и Баргузинской котловинах Забайкалья) – разнонаправленные изменения площади озер: сокращение одних и расширение других.

Однако взаимосвязь изменения площади озер с характером распространения многолетнемерзлых пород, подмеченная в исследованиях Аляски, в данной работе не прослеживается. Если на территории Аляски в области сплошного распространения мерзлоты отмечалась относительная стабильность площади озер, то в данной работе помимо стабильности наблюдается и сокращение, и увеличение, и разнонаправленные изменения площади озер. Аналогичная ситуация прослеживается и в области прерывистого распространения мерзлоты: если на территории Аляски в этой зоне наблюдалось значительное сокращение площади озер, то в данном исследовании, напротив, в отдельных районах отмечается увеличение площади озер (в частности, в котловинах Забайкалья и на Дальнем Востоке).

Мы попытались сопоставить полученные в этой работе результаты с изменением температуры воздуха, для чего проанализированные эталонные участки с указанием произошедших изменений нанесены на карту повышения температуры воздуха, вызванного глобальным потеплением климата, составленную А.В. Павловым и Г.В. Ананьевой (рисунок 1.8).

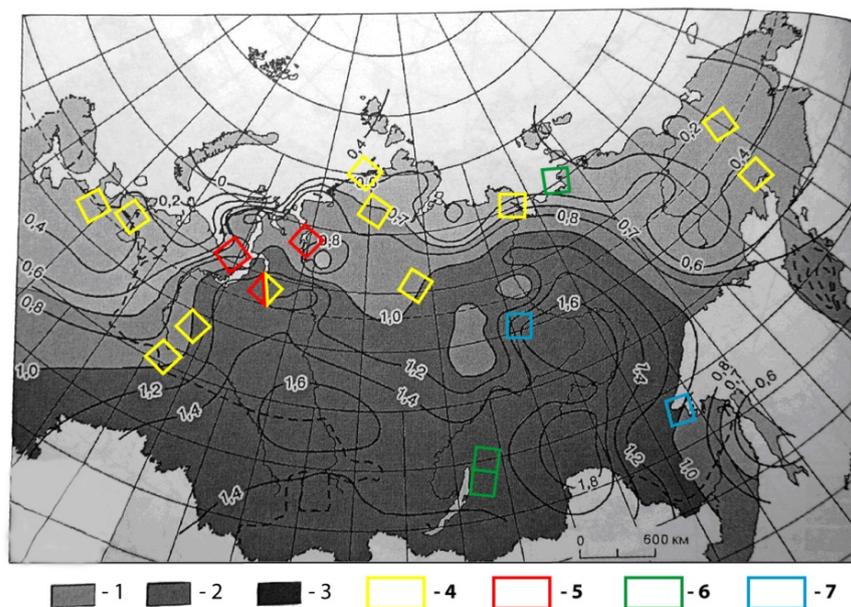


Рисунок 1.8. Карта повышений температуры воздуха в 2000 году (определенных по средним десятилетним скользящим значениям) относительно 1950-х годов с наложенными на нее эталонными участками с различными изменениями термокарстовых озер
Приращение температуры воздуха: 1 – слабые, 2 – умеренные, 3 – сильные.
Эталонные участки: 4 – не обнаружено изменений площади озер, 5 – обнаружено уменьшение площади озер, 6 – обнаружено уменьшение и увеличение площади озер, 7 – обнаружено увеличение площади озер
 (составлена автором по материалам Павлов, Ананьева, 2004; Кравцова, Быстрова, 2009)

Согласно полученной карте практически все эталонные участки, на которых не было обнаружено изменений или обнаружено уменьшение озер (вызванное преимущественно спуском этих озер речками) попадают в зону слабого и умеренного приращения температуры воздуха. Увеличение же площади озер наблюдается лишь в области сильных приращений температур воздуха, в частности, в Центральной Якутии, котловинах Забайкалья и на Дальнем Востоке.

Отличительной особенностью данного исследования является отсутствие каких-либо ограничений на площади анализируемых озер, несмотря на сравнение снимков разного пространственного разрешения: снимков, полученных съемочной системой Landsat MSS с пространственным разрешением 80 м, и снимков, полученных съемочной системой Landsat TM/ETM+ с разрешением 30 м. Для выявления возможного влияния различий в разрешении используемых материалов на результаты исследования необходимы дополнительные методические изыскания.

Помимо исследования В.И. Кравцовой и А.Г. Быстровой (2009), охватившего обширную территорию России, есть ряд обзорных исследований регионального уровня.

На *Европейской территории России* обзорное исследование было выполнено В.В. Елсаковым и И.О. Марущак (2011). Ими было проанализировано 5 эталонных участков (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9. Эталонные участки, проанализированные в пределах Европейской территории России (Елсаков, Марущак, 2011)

В результате исследования было установлено уменьшение площади озер как в прерывистой зоне, так и в сплошной зоне ММП, при этом максимальные изменения в зоне прерывистой и островной мерзлоты наблюдаются в период 1973-1988, а в зоне сплошной мерзлоты – 1988-2002 гг. Авторы ссылаются на климатические причины наблюдаемых изменений, говоря о постепенном продвижении отклика на потепление климата в направлении от прерывистой зоны к сплошной зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Аналогичные результаты были получены И.О. Смирновой, Л.Л. Сухачевой и А.А. Русановой (2013). В пределах проанализированного ими участка также отмечается интенсивное сокращение площади озер. Однако они не ссылаются на климатическую природу изменений, а указывают на сложность процесса и необходимость учета целого ряда факторов (Смирнова с соав., 2013).

На территории Западной Сибири выполнен ряд исследований. Одно из первых было проведено в США L.C. Smith, Y. Sheng, G.M. Macdonald и L.D. Hinzman (2005). Ими была проанализирована обширная территория Западной Сибири (рисунок 1.10) и рассмотрены изменения лишь крупных озер площадью более 40 га.

В результате было установлено увеличение площади озер в зоне сплошного распространения мерзлоты на 12% и уменьшение площади озер в зоне прерывистого распространения ММП на 9%. При этом в обеих зонах было зафиксировано полное исчезновение 125 озер, отмеченных на рисунок 1.10 красными точками. В качестве основной причины сокращения площади озер в зоне прерывистого распространения ММП рассматривается деградация многолетнемерзлых пород под влиянием потепления климата и просачивание воды из озер в оттаявший грунт. Увеличение площади озер в зоне сплошного распространения ММП также связывается с таянием многолетнемерзлых пород, вызывающим на первых этапах увеличение объема воды, что впоследствии может привести к исчезновению

озера. Наличие исчезнувших озер в зоне сплошной мерзлоты в частности объясняется неоднородностью мощности ММП.

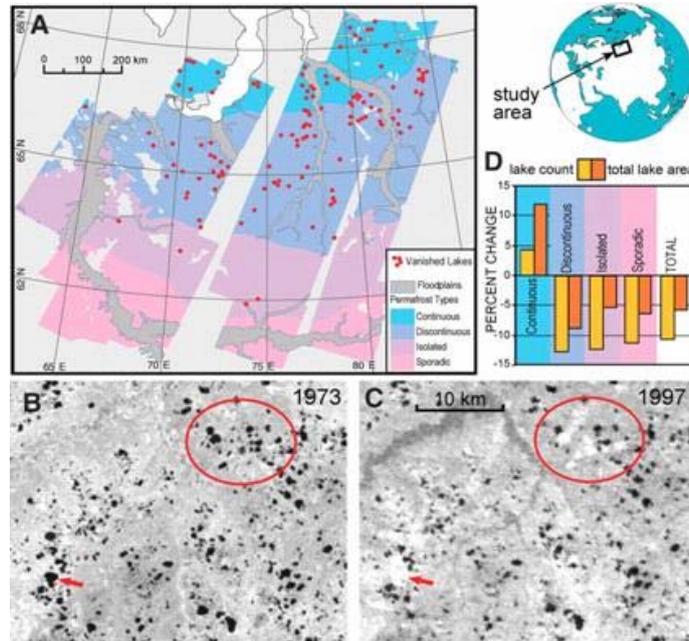


Рисунок 1.10. Результаты исследования L.C. Smith с соавторами, 2005

Помимо исследования L.C. Smith с соавторами (2005) на территории Западной Сибири в пределах эталонных участков, начиная с 2006 года, ряд исследований выполнили Ю.М. Полищук, Н.А. Брыксина, С.Н. Кирпотин и В.П. Днепровская. Ими были проанализированы эталонные участки как в зоне сплошной, так и в зоне прерывистой вечной мерзлоты (рисунок 1.11).

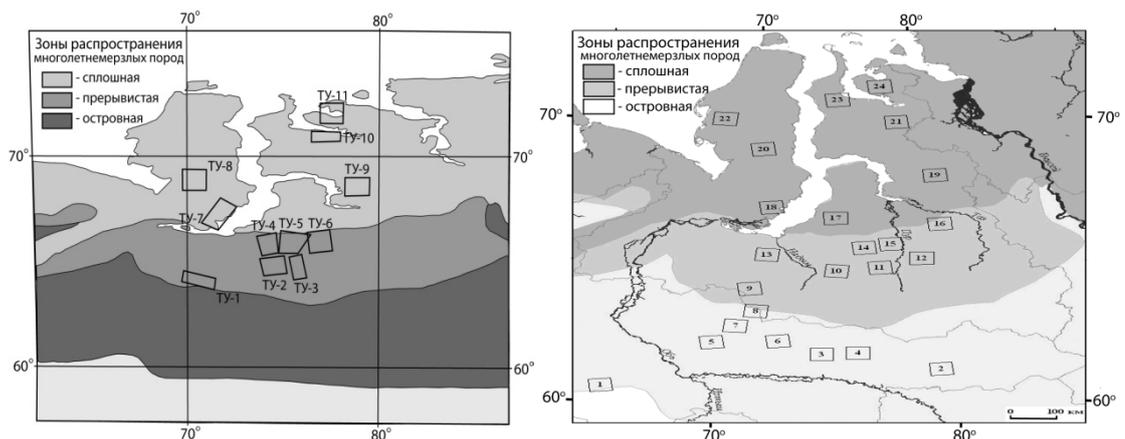


Рисунок 1.11. Расположение тестовых участков на территории Западной Сибири, проанализированных Кирпотиным С.Н., Полищуком Ю.М., Брыксиной Н.А., 2008 (слева) и Брыксиной Н.А., Полищуком В.Ю., Полищуком Ю.М., 2009 (справа)

В результате этих исследований, аналогично L.C. Smith с соавторами (2005) было установлено, что в зоне сплошной вечной мерзлоты наблюдается увеличение площади термокарстовых озер (от 7 до 12%), а в зоне прерывистой вечной мерзлоты площади озер сокращаются (от 1 до 29%) (Кирпотин с соавт., 2008). В более позднем исследовании было

уточнено, что в зоне сплошного распространения ММП лишь на половине участков наблюдалось увеличение площади озер и отмечено, что с увеличением географической широты наблюдается переход от сокращения площади к ее увеличению (в качестве границы указывается 70° с.ш.) (Брыксина с соавт., 2009; Днепровская, Полищук, 2008; Днепровская с соавт., 2009). Авторы также рассматривают глобальное потепление в качестве основного фактора наблюдаемых изменений. Сокращение площади озер в условиях потепления климата объясняется ускорением дренажа озер в результате увеличения глубины протаивания грунта при повышении температуры. В качестве дополнительной причины изменения площади озер также рассматривается спуск озер под влиянием эрозионной деятельности (Kirpotin et al, 2008), когда вода из мелких озер, расположенных на более высоком уровне, стекает в большие озера.

Таким образом, в проведенных на территории Западной Сибири исследованиях, как и в исследованиях на Аляске, прослеживается взаимосвязь изменения площади озер с характером распространения многолетнемерзлых пород: сокращение площади озер в зоне прерывистой мерзлоты и увеличение – в зоне сплошной мерзлоты. В качестве причины также рассматривается деградация мерзлоты под влиянием потепления климата.

Однако в результатах С.Н. Кирпотина с соавторами (2008) наблюдаются расхождения с работой В.И. Кравцовой и А.Г. Быстровой (2009), в которой на территории Западной Сибири в зоне сплошного распространения ММП обнаружено уменьшение площади озер.

Дополнительное исследование, выполненное на территории 3 эталонных участков (рисунок 1.12), частично или полностью перекрывающихся с участками С.Н. Кирпотина, Ю.М. Полищука и Н.А. Брыксиной (2008) также не показало увеличения площади озер в зоне сплошного распространения ММП. На территории всех проанализированных участков отмечается локальное сокращение площади озер в связи с их спуском речками (Кравцова, Тарасенко, 2010).

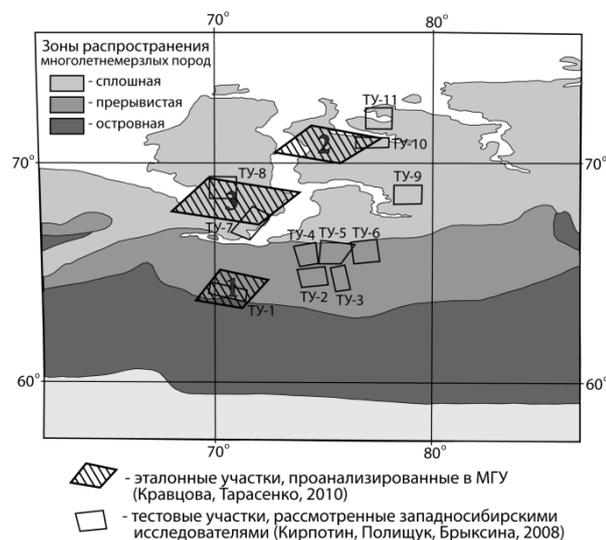


Рисунок 1.12. Расположение эталонных участков (Кравцова, Тарасенко, 2010)

Таким образом, вопрос о причинах выявленных расхождений в результатах исследований (Кирпотин с соавт., 2008; Кравцова, Тарасенко, 2010) остается открытым и требует дополнительных, в том числе, методических исследований.

На *Севере Восточной Сибири* обзорные исследования по изучению изменений площади озер не проводились. Имеется лишь ряд локальных исследований, большая часть которых напрямую не связана с изучением динамики озер. Одни из них посвящены оценке возможностей использования космических снимков для анализа термокарстовых форм рельефа (Grosse et al, 2005; Grosse et al, 2006), другие – анализу морфометрических показателей (Morgenatern et al, 2008; Morgenatern et al, 2011) и распределению озер (Grosse et al, 2008a). Во всех же исследованиях, в какой-то мере связанных с изучением динамики озер (Hese et al, 2010; Гюнтер с соавт., 2010; Grosse et al., 2008б; Веремеева, 2011; Тюкавина, 2009; Кравцова, Тюкавина, 2010), отмечаются незначительные разнонаправленные изменения: сокращение площади одних и увеличение площади других озер. При этом в качестве причин наблюдаемых изменений называют эрозионные процессы и влияние антропогенной деятельности. Влияние потепления климата на активизацию термокарстовых процессов не отмечается. Напротив, отмечается, что благоприятные условия для развития термокарстового процесса, охватывающего большие пространства на отложениях ледового комплекса, существовали в прошлом. В настоящее время близость к начинающим свое развитие озерам термоэрозионных долин способствует их дренированию и затуханию процесса (Morgenatern et al, 2011).

Подытоживая обзор имеющихся работ, следует отметить, что:

В зоне сплошного распространения мерзлоты большинство исследователей отмечает относительную стабильность термокарстовых озер – незначительные *разнонаправленные изменения под влиянием локальных факторов* (эрозионной деятельности и меандрирования рек, антропогенной деятельности, и др.). Однако в отдельных работах отмечается *увеличение площади озер*: на территории Западной Сибири (Smith et al, 2005; Кирпотин с соавт., 2008; Брыксина с соавт., 2009) и Центральной Якутии (Кравцова, Быстрова, 2009), которое авторы связывают с активизацией термокарстового процесса под влиянием потепления климата.

В зоне прерывистого распространения мерзлоты практически все исследователи отмечают *сокращение площади озер под влиянием потепления климата*, которое связывают с просачиванием воды в оттаявший грунт и с испарением воды из озера. Однако в работе В.И. Кравцовой и А.Г. Быстровой (2009) отмечено увеличение площади озер в котловинах Забайкалья и на Дальнем Востоке.

Самые противоречивые результаты наблюдаются на территории Западной Сибири в зоне сплошного распространения ММП, когда одними исследователями отмечается увеличение

площади озер (Smith et al, 2005; Кирпотин с соавт., 2008; Брыксина с соавт., 2009), а другими – уменьшение площади озер (Кравцова, Быстрова, 2009; Кравцова, Тарасенко, 2010).

1.4. Выводы

Обзор криолитологической литературы показал, что:

1. Условиями, необходимыми для развития термокарста, являются: *наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород*, оттаивание которых создает на поверхности понижение и *равнинный характер территории*, затрудняющий поверхностный сток вод, а основной причиной – *увеличение глубин сезонного или многолетнего протаивания* до глубин залегания мерзлых пород.

Массовое образование термокарстовых озер произошло с оттаиванием плейстоценовых отложений в эпоху “*голоценового климатического оптимума*”, продолжавшегося на протяжении 5 тысяч лет, когда температура воздуха повысилась по сравнению с современной на 2 – 2,5°C и наблюдалось увеличение количества осадков.

2. Чем *выше льдистость пород*, тем выше вероятность возникновения термокарста. Льдистость должна превышать полную влагоемкость пород в талом состоянии. Для развития термокарста необходим *равнинный характер территории*, затрудняющий сток поверхностных вод. Возникновение термокарста возможно *при изменении теплового баланса* (при потеплении климата, усилении континентальности; уменьшении термического сопротивления поверхности – изменении растительного, снежного или водного покровов). Для термокарста благоприятно наличие *положительного водного баланса* (увеличения разности осадки – испарение; увеличения осадков, в том числе снежного покрова; уменьшения испарения). Для термокарста *неблагоприятны условия дренажа*. Сток вод способствует развитию процессов термоэрозии, а не термокарста. Опосредованная *роль неотектоники* в развитии термокарста проявляется во влиянии на водный режим территории. Тектонические опускания могут быть причиной обводнения поверхности и зарождения термокарстовых озер. Тектонические поднятия в свою очередь могут быть причиной дренирования территории и уменьшения интенсивности образования термокарстовых озер. *Техногенные процессы* влияют на развитие термокарста практически в пределах всей мерзлой зоны, а образованные ими термокарстовые просадки имеют крайне негативные последствия.

Термокарст возникает и протекает в *сложных природных системах*, поэтому неприемлемы концепции, ориентирующиеся только на ведущий фактор.

3. *Прогрессивное развитие* возможно лишь при высокой льдистости пород и положительном водном балансе. К *затуханию термокарста* приводит осушение или миграция озер.

Обзор исследований динамики термокарстовых озер показал, что:

4. Начиная с 2000-х годов, выполнены *многочисленные исследования динамики термокарстовых озер*, охватывающие области как сплошного, так и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород в пределах полуострова Аляска и криолитозоны Евразии.

Все имеющиеся исследования основаны на *анализе разновременных космических снимков* (пары снимков или более). В качестве основных материалов при этом используют *космические снимки со спутника Landsat*, позволяющие проследить изменения площади озер с 1970-х по 2000-е гг., т.е. за период современного потепления климата.

В большинстве исследований, несмотря на использование снимков разного пространственного разрешения, ограничений по площади анализируемых озер не вводится. В ряде исследований такие ограничения введены, но их выбор количественно не обосновывается. Для выявления возможного влияния пространственного разрешения разновременных снимков на результаты исследования *необходимы дополнительные методические изыскания*.

5. Исследования в разных частях криолитозоны показывают, что в *зоне сплошного распространения мерзлоты* отмечается относительная стабильность термокарстовых озер – *незначительные разнонаправленные изменения под влиянием локальных факторов* (эрозионной деятельности, антропогенной деятельности и др.). Однако в отдельных работах отмечается *увеличение площади озер*: на территории Западной Сибири (Smith et al, 2005; Кирпотин с соавт., 2008; Брыксина с соавт., 2009) и Центральной Якутии (Кравцова, Быстрова, 2009), которое авторы связывают с активизацией термокарстового процесса под влиянием потепления климата. В *зоне прерывистого распространения мерзлоты* отмечаются *сокращение площади озер под влиянием потепления климата*, которое связывают с просачиванием воды в оттаявший грунт и с испарением воды из озер. Однако в работе В.И. Кравцовой и А.Г. Быстровой (2009) отмечено увеличение площади озер в котловинах Забайкалья и на Дальнем Востоке.

Таким образом, в исследованиях по разным регионам выявлен ряд противоречий. *Самые противоречивые результаты* наблюдаются на территории Западной Сибири в зоне сплошного распространения ММП, где одними исследователями отмечается увеличение площади озер (Smith et al, 2005; Кирпотин с соавт., 2008; Брыксина с соавт., 2009), а другими – уменьшение площади озер (Кравцова, Быстрова, 2009; Кравцова, Тарасенко, 2010).

Результаты работ по изучению динамики термокарстовых озер показывают необходимость разработки методики, учитывающей различия в разрешении сравниваемых разновременных снимков и выполнения на основе единой методики исследований по широкому спектру регионов с учетом их географической специфики, различных факторов, влияющих на процессы термокарста и в итоге определения возможности использования динамики термокарстовых озер в качестве индикатора состояния криолитозоны при потеплении климата.

2. Методика исследования динамики термокарстовых озер

2.1. Общая методическая схема исследования динамики термокарстовых озер

В качестве показателя динамики термокарстовых озер в представленном исследовании используется площадь озер, а в качестве метода определения изменений площади озер – анализ разновременных космических снимков, на которых водные объекты выделяются достаточно хорошо, в том числе при их автоматизированном дешифрировании.

Существует два основных подхода к изучению динамики территориальных комплексов и их элементов путем сопоставления разновременных снимков: раздельное (последовательное) и совместное (одновременное) дешифрирование снимков (Книжников, Кравцова, 1991).

Раздельное дешифрирование осуществляется наиболее просто, не требует предварительного геометрического преобразования снимков и реализуется обычно при визуальном дешифрировании для качественной оценки произошедших изменений.

Совместное дешифрирование в отличие от раздельного предполагает совмещение двух или нескольких разновременных снимков и требует предварительных геометрических преобразований сопоставляемых материалов. Результатом совместного дешифрирования также могут быть качественные оценки, но обычно это карты или количественные показатели произошедших изменений.

В нашем исследовании при изучении динамики термокарстовых озер выполняется совместное дешифрирование аэрокосмических материалов. При совместном наблюдении разновременных снимков возможны следующие методические приемы (Лабутина, 2004; Лабутина, Балдина, 2011):

- сложение собственно снимков или изображений, полученных в результате их яркостных преобразований или классификации;
- сложение переходных карт, составленных по разновременным аэрокосмическим данным.

При изучении изменений площади озер возможны оба приема, однако несомненным преимуществом обладают переходные карты, создаваемые специально для обеспечения сопоставимости разновременных материалов (в частности на основе одинаковых цензов отбора) (Лабутина, 2004), поэтому предпочтение в нашем случае отдается второму приему. Дело в том, что при анализе изменений площади термокарстовых озер могут быть использованы различные аэрокосмические снимки, полученные разными съемочными системами и имеющие разные характеристики, в том числе разное пространственное разрешение. Сравниваемые материалы должны быть приведены к одинаковой детальности. Иначе сложение снимков разного пространственного разрешения или результатов

классификации снимков с разным разрешением без дополнительной обработки, в частности, исключения из анализа малых озер, отображаемых на снимке более высокого разрешения и не отображающихся на снимке более низкого разрешения, может привести к ошибочным выводам об изменении площади озер. Помимо этого, прежде чем выполнить сложение собственно снимков, снимки необходимо привести к одинаковым условиям съемки. Даже если снимки получены одной и той же съемочной системой сложение снимков возможно лишь тогда, когда выполнена радиометрическая коррекция и исключено влияние атмосферы, для точного выполнения которых необходимо моделирование прохождения излучения через атмосферу с учетом рассеивания в атмосфере и уровня видимости, что не всегда реализуемо. При сложении же переходных карт, составленных по разновременным аэрокосмическим снимкам, можно обойтись без такой коррекции, достаточно надежно выделить термокарстовые озера по сравниваемым разновременным снимкам.

На рисунке 2.1 представлена методическая схема исследования динамики термокарстовых озер на основе разновременных аэрокосмических снимков.

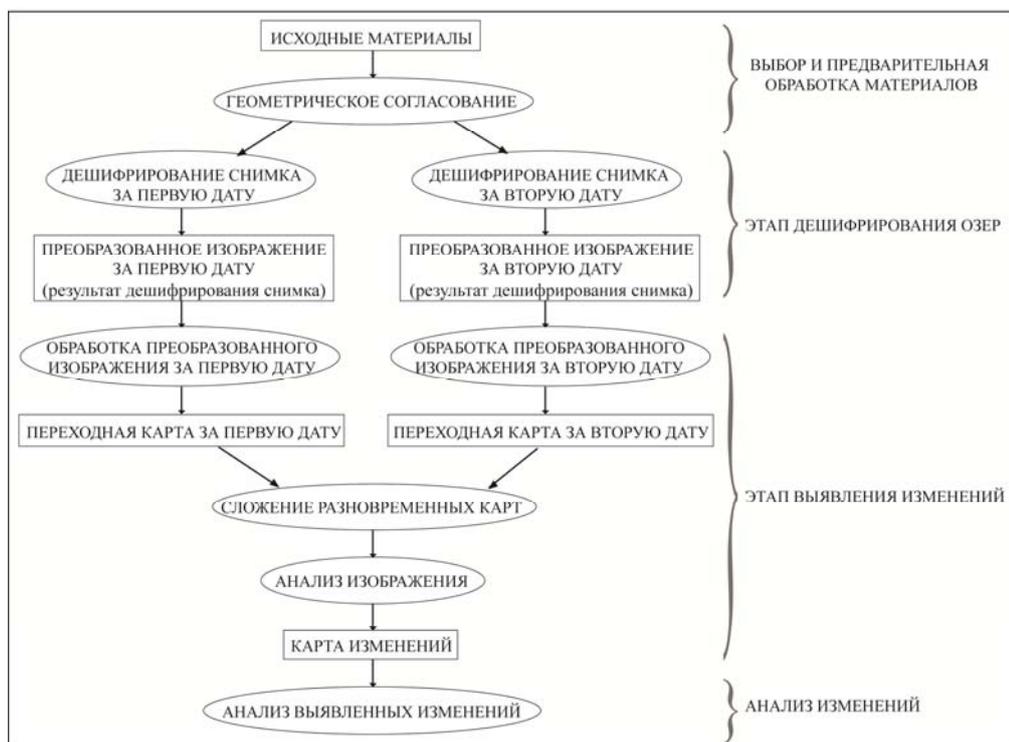


Рисунок 2.1. Методическая схема исследования динамики термокарстовых озер

Согласно представленной схеме методика исследования динамики термокарстовых озер включает в себя несколько этапов:

1. Выбор и предварительная обработка материалов
2. Этап дешифрирования водных объектов
3. Этап выявления изменений площади озер
4. Анализ наблюдаемых изменений

2.2. Характеристика основных материалов исследования

В качестве основных материалов для изучения динамики термокарстовых озер используются космические снимки со спутника Landsat. Практически все современные исследования по изучению изменений площади озер выполняются по этим космическим снимкам (Fitzgerald, Riordan, 2003; Riordan et al, 2006; Брыксина с соавт., с 2006; Кравцова, Быстрова, 2009; Елсаков, Марушак, 2010 и др.).

Космические снимки со спутника Landsat имеют ряд преимуществ по сравнению с другими космическими снимками. К основным преимуществам этих снимков следует отнести:

- Наличие в фондах снимков от начала 1970-х годов до настоящего времени, что позволяет проанализировать многолетние изменения площади термокарстовых озер за период современного потепления климата.
- Высокую регулярность съемки. Снимки на одну и ту же территорию получают с интервалом в 16 дней; даже учитывая неизбежные потери информации из-за облачности, это позволяет проанализировать годовые и сезонные изменения площади озер, не ограничиваясь только многолетними изменениями.
- Наличие снимков в свободном доступе (www.glovis.usgs.gov), что позволяет без особых трудностей и временных затрат получить необходимые материалы.
- Наличие снимков в ближней инфракрасной зоне (а для съемочных систем TM/ETM+ – также в средней инфракрасной зоне), которые обеспечивают надежное выделение водной поверхности озер по яркостным признакам в автоматизированном режиме.
- Большой охват территории одним снимком (185*185 км), который позволяет проанализировать изменения площади большего количества озер, распределенных на большей территории.

Несмотря на явные преимущества использования космических снимков со спутника Landsat существует ряд ограничений, которые необходимо принимать во внимание.

Одно из главных ограничений связано с пространственным разрешением снимков. Разрешение снимков, полученных сканирующими системами TM и ETM+, которые работают с 1982 года, составляет 30 м, а снимков, полученных сканирующей системой MSS, функционировавшей в 1970-е годы – 80 м. Особенно важно учитывать это ограничение при анализе многолетних изменений, когда приходится сравнивать снимки разного пространственного разрешения. Сравнение таких снимков может привести к неправильным выводам об изменении площади, особенно малых озер, из-за неодинаковой полноты дешифрирования озер на сравниваемых снимках.

Другое ограничение возникает при подборе современных космических снимков со спутника Landsat-7, у съемочной системы которого, начиная с 2003 года, произошел сбой

корректора линий сканирования. В результате этого сбоя не регистрируются некоторые участки изображения, а снимки имеют пропуски в виде параллельных тонких полос (рисунок 2.2). Использование таких снимков при изучении изменений площади термокарстовых озер возможно, однако ограничено, особенно при сравнении двух снимков, имеющих такие пропуски. По изменениям, наблюдаемым вне этих пропусков, невозможно точно охарактеризовать динамику озер всего региона. Поэтому лучше подбирать снимки без пропусков, а снимки с пропусками – использовать для проверки и уточнения выявленных изменений с помощью визуального просмотра.

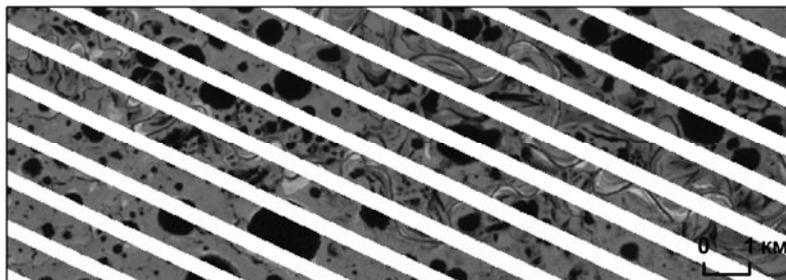


Рисунок 2.2. Наличие пропусков в регистрации изображения ЕТМ+

Помимо космических снимков со спутника Landsat в исследованиях по изучению динамики термокарстовых озер используются аэрофотоснимки (Yoshikawa, Hinzman, 2003; Riordan et al, 2006; Hinkel et al, 2007; Тюкавина, 2010) и космические снимки с разведывательных спутников Corona (камера KeyHole) (Grosse et al., 2008б; Гюнтер с соавт., 2010; Веремеева, 2011). Особенно важно использование таких материалов при отсутствии снимков со спутника Landsat 1970-х годов, а также при проверке наблюдаемых изменений. Помимо этого аэрофотоснимки 1950-х годов позволяют проанализировать многолетние изменения за более длительный временной интервал. К достоинствам аэрофотоснимков и космических снимков KeyHole также следует отнести более высокое пространственное разрешение, а к неудобствам – необходимость географической привязки и трансформирования множества снимков в проекцию и систему координат снимка Landsat. В частности для того чтобы покрыть аэрофотоснимками один кадр Landsat необходимо около 230 аэрофотоснимков масштаба 1:60 000. Отсутствие ближнего инфракрасного канала при черно-белой фотосъемке и наличие бликов на водной поверхности затрудняют автоматизированное дешифрирование аэрофотоснимков и космических снимков KeyHole. Несмотря на все перечисленные неудобства, эти снимки являются ценным материалом при изучении динамики термокарстовых озер. И одно из главных ограничений для их применения – отсутствие таких материалов на район исследования, а для аэрофотоснимков – еще и трудность поиска и доступа к ним. В нашей работе такие материалы использовались ограниченно для ряда участков, в частности на территории Яно-Индигорской низменности и в пределах Центральной Якутии.

При изучении изменений площади озер возможно также использование современных космических снимков сверхвысокого и очень высокого разрешения. Рядом исследователей, в частности, использовались космические снимки со спутников Ikonos, QuickBird, SPOT-5, ALOS (Yoshikawa, Hinzman, 2003; Grosse et al., 2008a; Grosse et al., 2008b; Елсаков, Марущак, 2010). Как правило, такие снимки используют для оценки надежности дешифрирования озер на космических снимках со спутника Landsat (Елсаков, Марущак, 2010) или для детального изучения форм рельефа и наблюдаемых изменений в пределах небольшой ограниченной территории. Ввиду высокого пространственного разрешения, аналогично аэрофотоснимкам, такие снимки имеют небольшой охват территории одним снимком и требуют больших временных затрат при изучении изменений площади озер в пределах большой территории. А одно из главных ограничений использования таких материалов – отсутствие их в свободном доступе.

В качестве дополнительных материалов для анализа изменений площади термокарстовых озер можно использовать топографические карты. В отдельных случаях топографические карты могут помочь при выявлении характера изменений. На рисунке 2.3 дан пример космического снимка Landsat MSS 1973 г. (с пространственным разрешением 80 м) и топографической карты масштаба 1:200 000, составленной по материалам аэрофотосъемки 1973-1974 гг.

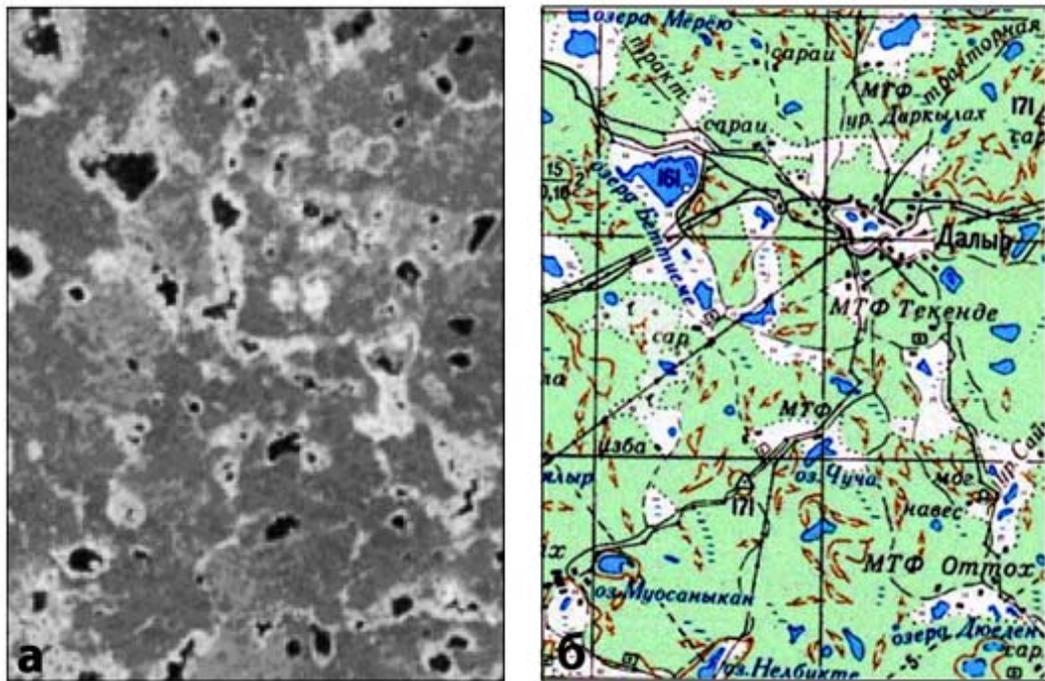


Рисунок 2.3. Соответствие изображения термокарстовых озер на космическом снимке со спутника Landsat 1973 г. (а) и топографической карте масштаба 1:200 000 1973-1974 гг. (б)

Все озера, изобразившиеся на космическом снимке, показаны на топографической карте, контуры их практически совпадают, что свидетельствует о возможности использования топографических карт для контроля выявляемых изменений площади озер. Однако не

рекомендуется использовать топографические карты в качестве основного материала исследования, так как они отражают ситуацию не на год издания, а на время выполнения аэрофотосъемки, которое может быть неизвестно; изображение береговых линий на картах генерализуется, а на листах карт разного масштаба используется разный уровень генерализации. Поэтому при использовании топографических карт необходимы дополнительные проверки. Помимо этого могут возникнуть трудности с подбором топографических карт нужного масштаба (желательно крупнее 1:100 000). В связи с особыми условиями их использования это не всегда удается.

2.3. Выбор и предварительная обработка материалов

Данный этап включает в себя *выбор эталонных участков, подбор космических снимков и их предварительную обработку (радиометрическую и геометрическую коррекцию)*, а также *выделение подходящего для сравнения перекрываемого разновременными снимками участка – области исследования.*

Изучение изменений площади термокарстовых озер требует работы в достаточно крупных масштабах, поэтому проводится на эталонных (ключевых) участках. Выявление изменений для всей территории распространения термокарстовых озер – слишком трудоемкая работа. *Выбор эталонных участков*, как правило, обусловлен целью исследования динамики термокарстовых озер. В нашем исследовании важно рассмотреть изменения площади озер в различных геокриологических условиях, поэтому эталонные участки были выбраны на территории всей криолитозоны России в различных регионах (рисунок 2.4) с охватом разных условий распространения и льдистости ММП, с учетом распространения термокарстовых озер, региональных различий потепления.

Анализ значительного количества эталонных участков поможет выявить региональные особенности и причины изменения озер. Особенно большое количество эталонных участков на территории Западной Сибири обусловлено также необходимостью выявления причин расхождений в результатах проведенных ранее исследований (Брыксина с соавт., с 2006; Кравцова, Быстрова, 2009).

На выбор участков влияет также наличие подходящих для исследования разновременных пар аэрокосмических снимков, поскольку снимки на интересующие районы могут отсутствовать, либо быть непригодными для выполнения исследования. Важной частью первого этапа является *подбор материалов*. Существует ряд ограничений, которые необходимо учитывать при поиске разновременных аэрокосмических снимков.



Рисунок 2.4. Эталонные участки, проанализированные в диссертационном исследовании (в качестве основы использована карта “Подземные льды” из Атласа снежно-ледовых ресурсов Мира, 1997)

При подборе аэрокосмических снимков необходимо учитывать наличие облачности и теней от облаков (рисунок 2.5). Снимки с облачностью не подходят для изучения динамики площади озер, особенно если облачность занимает больше половины изучаемой территории. Если облака встречаются единично, использование снимка возможно, однако требует исключения из анализа района, занятого облаками. При этом необходимо исключать из анализа как сами облака, так и тени от них. Тени от облаков на снимках инфракрасного диапазона имеют практически такие же значения спектральной яркости, что и водные объекты, поэтому при автоматизированном дешифрировании тени от облаков и озера попадают в один класс объектов.

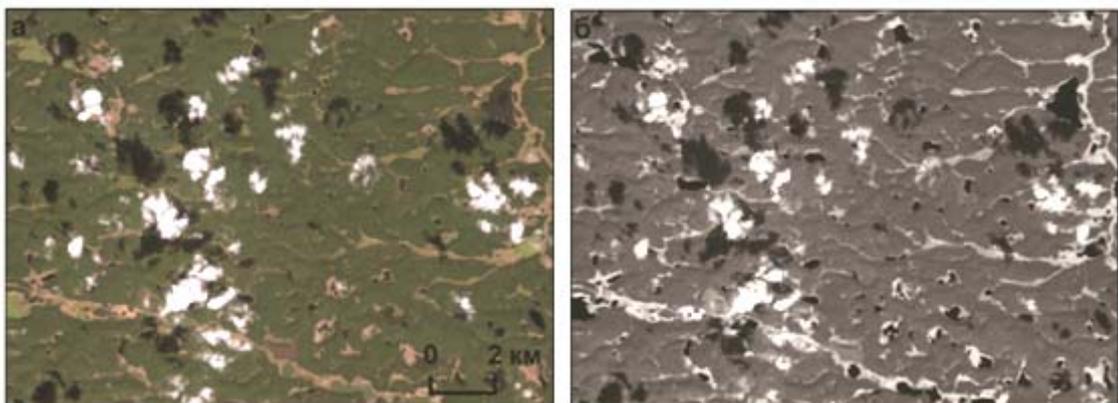


Рисунок 2.5. Изображение теней от облаков на снимках:
а – в комбинации каналов RGB 321, б – в ближней инфракрасной зоне

При подборе снимков для изучения годовой и многолетней динамики озер большое значение имеет сезон съемки. Важно использовать снимки за один сезон, желательно за близкие даты, иначе возникает опасность принять сезонные изменения за многолетние. Сезонные

изменения могут проявляться по-разному. В северных регионах при сходе снежного покрова лед на озерах в начале летнего сезона еще долго сохраняется (рисунок 2.6).

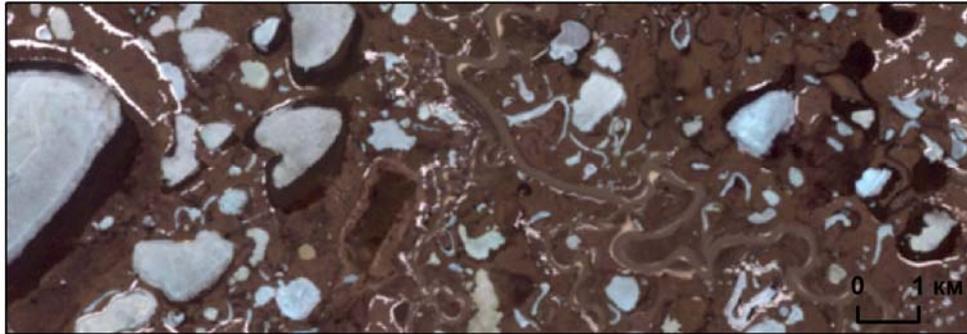


Рисунок 2.6. Лед на озерах в начале летнего сезона

В начале лета после таяния снега уровень воды в озерах обычно выше, нежели в конце, что особенно четко проявляется в речных долинах и неглубоких термокарстовых котловинах, где повышение уровня воды приводит к сильному увеличению площади озер (рисунок 2.7).

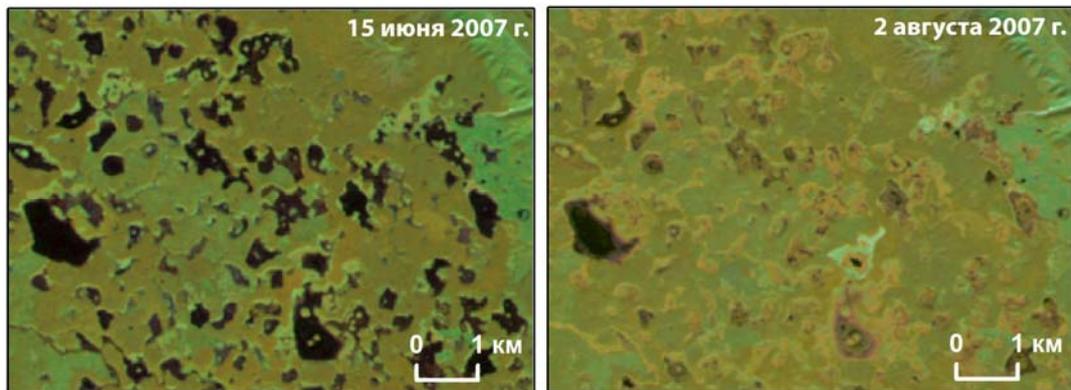


Рисунок 2.7. Изменение площади озер от начала к концу лета

В течение вегетационного периода развивается водная растительность на мелких озерах: в начале лета, в июне, озера свободны от растительности, а в августе частично зарастают осокой, которая осенью отмирает и в начале следующего года вновь не видна (рисунок 2.8).

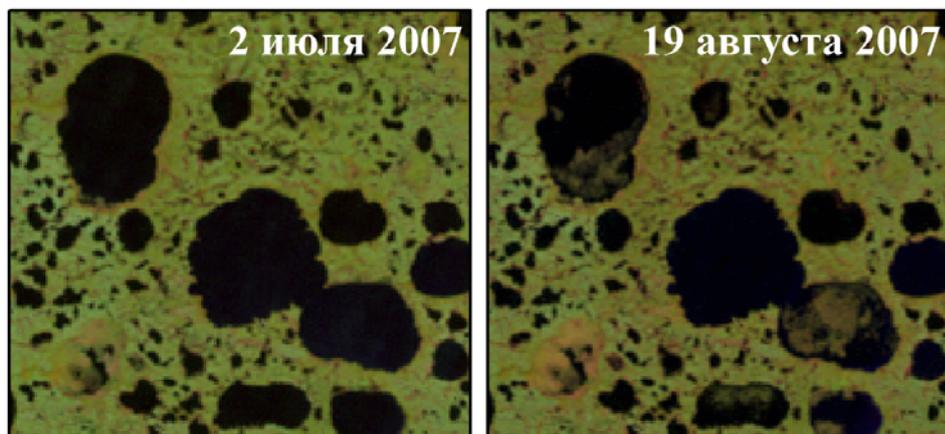


Рисунок 2.8. Изменение водной растительности в течение сезона вегетации в разные годы

Сравнение пары снимков за разные годы, полученных в разные месяцы летнего сезона, может привести к неправильным выводам о многолетнем и годовом изменении площади озер. Во избежание принятия сезонных изменений за многолетние необходимо использовать в исследовании снимки за близкие даты, полученные в конце летнего – начале осеннего периода, в августе – сентябре. Рекомендуется также проводить анализ сезонных изменений на территории исследуемого участка.

После того, как космические снимки подобраны, в дистанционных исследованиях динамики обычно рекомендуется провести *радиометрическую коррекцию* и привести “сырые значения” яркости (DN, Digital Number) из условных единиц в энергетические единицы, а также учесть различную освещенность в разное время и пересчитать их в коэффициенты яркости. Немаловажен и учет влияния атмосферы, которая поглощает и рассеивает излучение, регистрируемое съемочной системой. Эти виды предварительной обработки, важные при исследовании, например, растительных объектов, дифференцируемым по яркостным признакам, при изучении динамики термокарстовых озер могут быть опущены. Мы обходились без вышеуказанной радиометрической и атмосферной коррекции, поскольку водные объекты достаточно достоверно дешифрируются по значениям яркости в условных единицах на снимках в средней и ближней инфракрасных зонах.

По необходимости следует провести *геометрическую коррекцию снимков* (трансформирование и географическую привязку). Взаимное геометрическое согласование снимков при изучении динамики объектов имеет первостепенное значение. Как правило, космические снимки Landsat уже имеют привязку по орбитальным данным, поэтому при сравнении пары снимков со спутника Landsat может потребоваться лишь уточняющая коррекция и следует выполнить привязку одного снимка к другому по опорным точкам. Сложнее обстоит дело при работе с отсканированными аэрофотоснимками или космическими снимками с разведывательных спутников, геометрическая коррекция которых не проводилась. Для обеспечения возможности работы с этими изображениями необходимо провести их трансформирование и географическую привязку в проекцию и систему координат опорного снимка, например космического снимка со спутника Landsat, прошедшего геометрическую коррекцию, в частности по орбитальным данным. Как правило, трансформирование аэрофотоснимков требует набора большого количества опорных точек и использования полиномиальных уравнений.

Трансформирование и уточнение географической привязки может быть проведено в любом программном пакете, поддерживающем такую функцию, например, в ScanEx IMAGE Processor, и состоит из нескольких этапов: 1. Набора опорных точек; 2. Выбора способа

трансформирования; 3. Расчета ошибок и оценки результатов трансформирования; 4. Создания выходного файла изображения (Лурье, 2008).

В качестве опорных точек необходимо использовать характерные изгибы контуров термокарстовых озер, а также малые озера. Американские исследователи в частности предлагают проводить уточнение географической привязки двух разновременных снимков с термокарстовыми озерами по опорным точкам, расположенным в центроидах озер (Sheng et al, 2008; Shah et al, 2008).

После набора опорных точек необходимо выполнить трансформирование и провести проверку результата трансформирования. Проверка должна быть основана на оценке общего значения среднеквадратической ошибки и на визуальном просмотре наблюдаемых расхождений, так как даже небольшой сдвиг бывает виден на совмещенном изображении двух разновременных снимков и может восприниматься визуально как изменения при их отсутствии. Важно добиться отсутствия таких сдвигов и каких-либо смещений.

Когда геометрическая коррекция сравниваемых аэрокосмических снимков выполнена, необходимо *выделить область исследования* на участках перекрытия разновременных снимков и вне изображения облаков и теней от них. При выделении области исследования рекомендуется использовать цветные синтезированные изображения. Синтез каналов необходим для улучшения различимости и дешифрирования разного рода объектов на снимке. Так для снимков ETM+(TM)/Landsat комбинация ближнего инфракрасного (4), красного (3) и зеленого (2) каналов – RGB 432 (“искусственные цвета”), как и комбинация красного (3), зеленого (2) и голубого (1) каналов – RGB 321 (“естественные цвета”) позволяет выделить на снимке области, покрытые облаками или снегом. Выделение области исследования можно выполнить в любом программном пакете, поддерживающем эту функцию. Сделать это можно, например, в программном пакете ArcGIS путем создания shp-файла, содержащего контур интересующей области.

2.4. Этап дешифрирования водных объектов

Этап дешифрирования водных объектов относится к одному из главных этапов выявления изменений площади термокарстовых озер. Он основан на выделении озер на паре разновременных аэрокосмических снимков в пределах определенной ранее области исследования.

Существует два основных метода камерального дешифрирования, которые могут быть применены при дешифрировании любых географических объектов, в том числе озер. Это визуальное и автоматизированное дешифрирование, каждое из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Несомненны преимущества использования *автоматизированного дешифрирования* при работе с многозональными снимками, в частности с космическими снимками со спутника Landsat. Особенно актуально такое дешифрирование при выделении многочисленного количества термокарстовых озер в пределах большого района исследования по снимкам, полученным в инфракрасной зоне, где эти объекты надежно выделяются.

Снимки, полученные в ближней инфракрасной (0,76–0,90 мкм) и средней инфракрасной (1,55–1,75 мкм) зонах позволяют четко различить границу между водой и сушей. Лучи этой части спектра практически полностью поглощаются тонкой пленкой воды, поэтому границы и поверхность водных объектов хорошо различимы на этих снимках, где они имеют наименьшую спектральную яркость и изображаются очень темным тоном (рисунок 2.9).

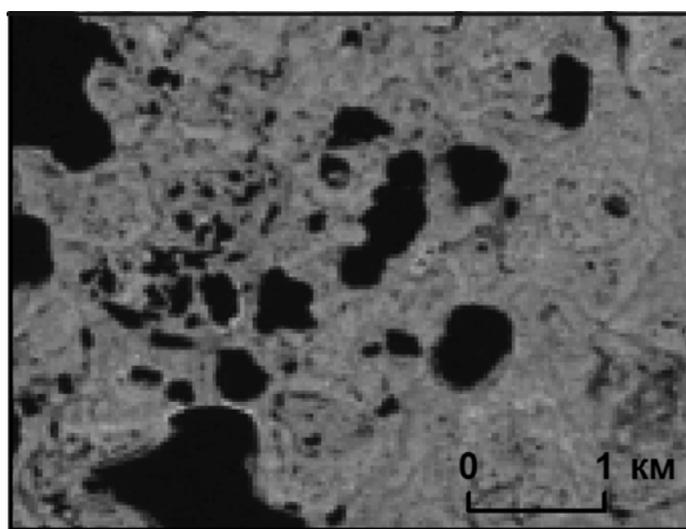


Рисунок 2.9. Изображение водных объектов на снимках в ближней инфракрасной зоне со спутников Landsat

Однако, практически такие же значения спектральной яркости, что и водные объекты на снимках в ближней инфракрасной зоне имеют тени от облаков и гари (рисунок 2.10, 2.11), поэтому при выделении озер по снимкам в этой зоне в класс водных объектов могут попасть и гари и тени. В средней и дальней инфракрасной зоне у гарей наблюдается максимум спектральной яркости (рисунок 2.10), яркость гарей превышает яркости водных объектов и объекты становятся различимы. Лишь незначительная часть пикселей, относящихся к гарям, попадает в диапазон распределения яркости водных объектов (рисунок 2.11), поэтому при наличии гарей для выделения водных объектов желательно использовать снимки в средней инфракрасной зоне.

Помимо снимков в средней инфракрасной зоне гари надежно дешифрируются при использовании комбинации каналов – RGB 742 (рисунок 2.12), где они изображаются ярко розовым или красным цветом, что позволяет дополнительно отдешифрировать гари и на основе

полученных изображений в дальнейшем исключить их из класса водных объектов путем маскирования.

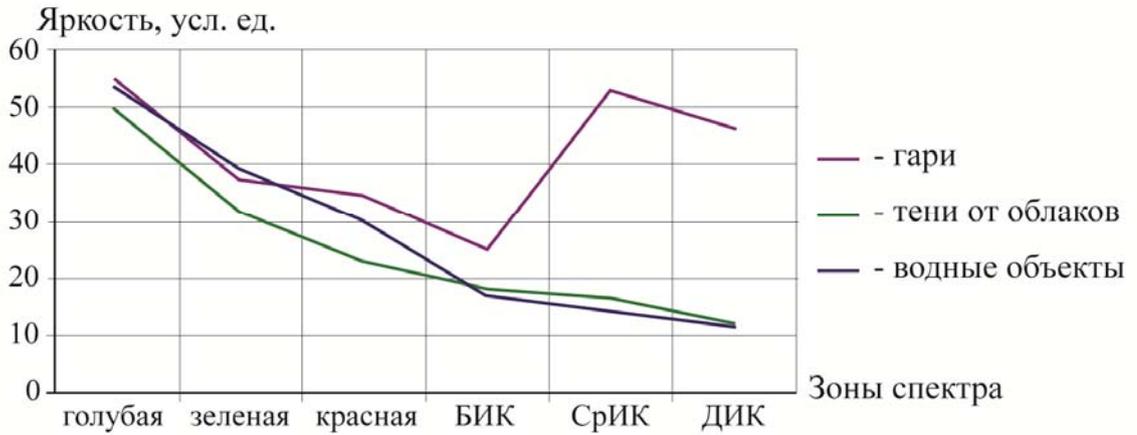


Рисунок 2.10. Кривые спектральных образов различных объектов

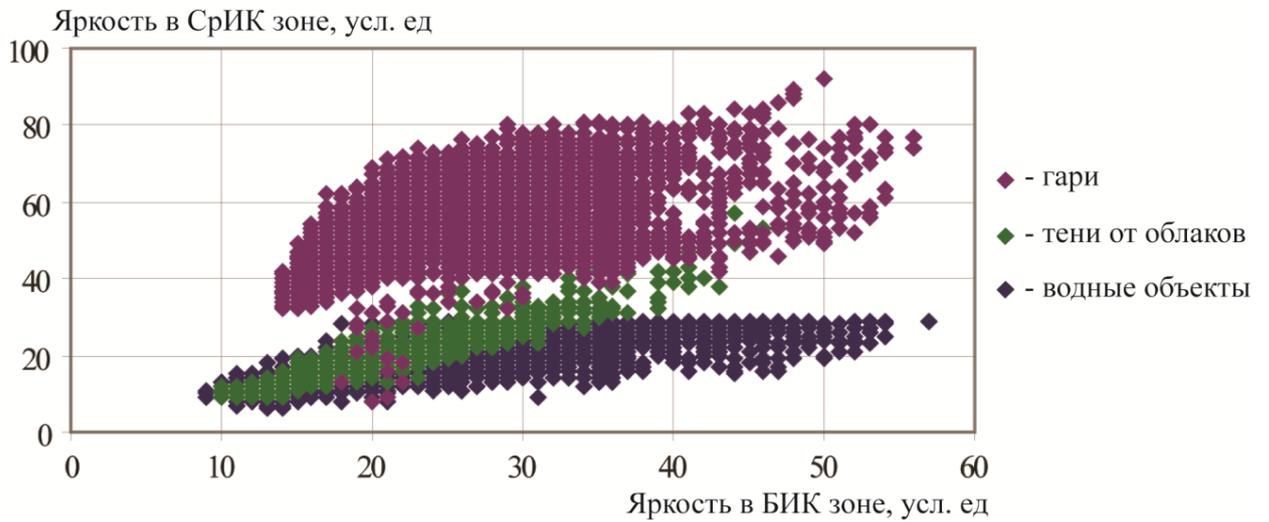


Рисунок 2.11. Двумерный график пространства спектральных признаков

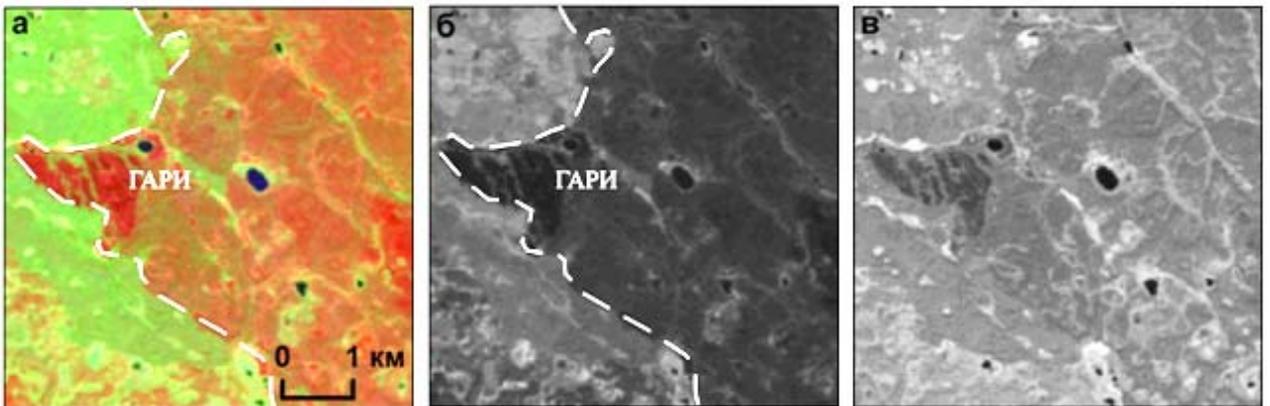


Рисунок 2.12. Изображение гарей на снимках в разных зонах и вариантах синтеза:
а – комбинация каналов RGB 742, б – снимок в ближней инфракрасной зоне, в – снимок в средней инфракрасной зоне

В отличие от гарей тени от облаков имеют практически такие же значения спектральной яркости, что и водные объекты на снимках всей инфракрасной зоны, поэтому желательно использовать в исследовании снимки без облаков и теней от них.

Суть автоматизированного дешифрирования заключается в отнесении пикселей к определенным классам объектов, в зависимости от принятого правила классификации. Существует два основных подхода: контролируемая классификация (классификация с обучением) и неконтролируемая классификация (кластеризация). Первая из них требует больше временных затрат, связанных с подготовкой обучающей выборки.

В нашем же случае, когда водные объекты имеют наименьшую спектральную яркость и изображаются очень темным тоном на снимках инфракрасного диапазона (рисунок 2.9), нет необходимости подготавливать обучающую выборку и выполнять контролируемую классификацию. Достаточно провести кластеризацию и из полученных кластеров выбрать класс водных объектов.

В качестве способа кластеризации в нашем исследовании выбран самоорганизующийся способ кластеризации ISODATA (от Iterative Self-Organising Data Analysis Technique – итеративный самоорганизующийся способ анализа данных), который производит многошаговую (итерационную) обработку снимка. В отличие от более простых алгоритмов быстрого выделения кластеров (алгоритмов одного прохода) итерационная обработка снимка позволяет добиться наилучшего результата. Дело в том, что спектральные яркости разных озер могут несколько отличаться даже на снимках ближнего инфракрасного диапазона из-за присутствия разного рода взвесей в воде, особенно при большом количестве озер в пределах одного снимка. Если таких взвесей в водном объекте немного, то при итерационной обработке снимков, как правило, такие пиксели и пиксели относящиеся к воде, включаются в один кластер, в отличие от обработки с помощью алгоритмов быстрого выделения кластеров. По этой же причине не рекомендуется использовать квантование в качестве способа выделения водных объектов.

Для более надежного выделения водных объектов в процессе дешифрирования результат кластеризации необходимо проверять и если кластер водных объектов не дает желаемого результата, пробовать выполнить кластеризацию с другими параметрами (например, уменьшить или увеличить число выделяемых кластеров).

Когда будет получен удовлетворительный результат, из выделенных кластеров необходимо выбрать класс водных объектов, а все остальные удалить. В результате по каждому снимку, участвующему в анализе изменений площади озер, должна быть получена растровая модель представления данных, содержащая изображение водных объектов (рисунок 2.13) – озер, рек и морей.

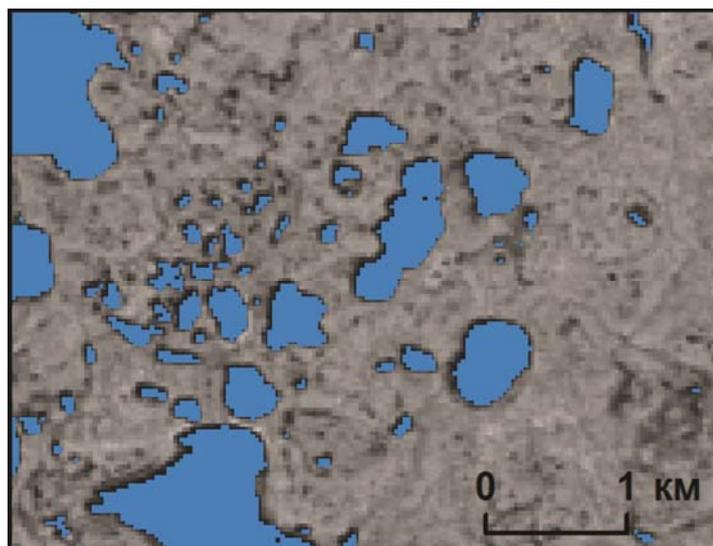


Рисунок 2.13. Результат автоматизированного дешифрирования водных объектов по снимкам со спутника Landsat на основе кластеризации ISODATA

Помимо непосредственного выделения водных объектов на космических снимках в результате кластеризации ISODATA можно также выполнить автоматизированное дешифрирование озер на основе разностного индекса водности NDWI (Normalized Difference Water Index):

$$NDWI = \frac{NIR - BLUE}{NIR + BLUE}, \text{ где}$$

NIR – значение яркости в ближней инфракрасной зоне

BLUE – значение яркости в голубой зоне

Расчет индексов относится к одному из методов преобразования исходных спектральных признаков. На преобразованном таким образом изображении по численному значению индекса впоследствии выделяются водные объекты. Однако на значение индекса может влиять качество воды в озере, в частности содержание взвешенных частиц, мутность, и кроме того малая площадь водной поверхности, что приводит к нечеткому отображению озера.

Однако исследований по определению достоверности дешифрирования термокарстовых озер на индексных изображениях в нашей работе не проводилось ввиду хорошего отображения их в ближней инфракрасной зоне.

При отсутствии многозональной съемки, а именно снимков в ближней инфракрасной зоне в частности при выделении водных объектов по аэрофотоснимкам и снимкам с разведывательных спутников, полученным в панхроматическом диапазоне, автоматизированное дешифрирование невозможно, потому что на таких снимках водные объекты могут отображаться разными оттенками серого цвета. Помимо этого на аэрофотоснимках часто изображаются блики на водной поверхности озер. Все это затрудняет автоматизированное дешифрирование водных объектов, поэтому проводится их *визуальное*

дешифрирование на экране монитора с цифрованием мышью береговых линий (так называемый способ цифрования по подложке). В результате такого цифрования получают векторный файл, например, shp-файл с водными объектами.

Многозональная съемка не выполняется также с некоторых спутников сверхвысокого разрешения (например, снимки со спутника WorldView-1) или очень высокого разрешения (например, снимки со спутника IRS-P5 (Cartosat)). Съёмочные системы этих спутников ведут съемку лишь в панхроматическом диапазоне. Для дешифрирования термокарстовых озер по таким снимкам возможно использование автоматизированного дешифрирования (в нашем случае оно выполнялось на основе кластеризации ISODATA), однако его результаты требуют дополнительного контроля со стороны исследователя из-за близости яркости некоторых озер и окружающих объектов.

Другая трудность дешифрирования водных объектов по снимкам сверхвысокого разрешения (в том числе, при многозональной съемке) связана с наличием теней от деревьев, которые, как правило, объединяются в один класс вместе с водными объектами. По этой причине результаты автоматизированного дешифрирования также рекомендуется дополнительно просматривать и дорабатывать вручную при визуальном дешифрировании, удаляя тени от деревьев.

2.5. Оценка надежности дешифрирования термокарстовых озер

Любая отрасль знания заинтересована в изучении качества и надежности своих методов познания. Наше исследование не является исключением, поэтому большое внимание в нем было уделено оценке надежности результатов дешифрирования термокарстовых озер и определения их площади по космическим снимкам со спутника Landsat. Оценка надежности была проведена именно по этим космическим снимкам, так как они являются основным материалом исследования динамики термокарстовых озер во многих работах, однако внимание оценке надежности в этих работах практически не уделяется.

Как правило, при анализе сезонных и годовых изменений площади озер используются космические снимки со спутника Landsat, полученные многозональными сканирующими системами TM и ETM+ с пространственным разрешением 30 м. При анализе же многолетних изменений приходится использовать снимки, полученные в 1970-х годах сканирующей системой MSS с пространственным разрешением около 80 м (59*79 м) и современные снимки с пространственным разрешением 30 м. Таким образом, при анализе многолетних изменений приходится сравнивать снимки разного пространственного разрешения, т.е. снимки разной детальности. Но использование снимков более низкого пространственного разрешения позволяет проследить изменения лишь крупных озер, так как малые озера на них не

дешифрируются. С целью выявления значений площади озер, надежно выделяемых на снимках с пространственным разрешением в 30 и 80 м, и определения доли правильно дешифрируемых объектов была проведена оценка надежности дешифрирования термокарстовых озер по космическим снимкам со спутника Landsat.

Выделяют разные виды надежности – организационную, информационную, коммуникационную и технологическую (Серапинас, 2005). Наибольший интерес с точки зрения дешифрирования космических снимков представляет информационная надежность, которая определяется соответствием качества, состава и количества получаемой по снимкам информации решаемым задачам. Информационную надежность предложено характеризовать тремя показателями – полнотой, достоверностью и точностью содержания (Смирнов, 1985). Полнота определяется достаточностью данных для целостного и детального представления географических объектов и характеризуется отсутствием пропусков. Полнота оценивается как отношение извлеченной информации к содержащейся на снимке. Достоверность – характеристика соответствия отдешифрированного объекта действительности. Достоверность определяется долей правильно отдешифрированных объектов. Точность – характеристика близости результатов наблюдений, измерений к истинным их значениям. Точность характеризуется погрешностями – величиной отклонения определенных значений количественных величин от их истинных, средних или номинальных значений (Серапинас, 2004; Лабутина, 2004).

Из трех показателей информационной надежности в работе были оценены полнота и достоверность дешифрирования озер, точность положения озер по отношению к пунктам геодезической основы не рассматривалась. Вместо этого большое внимание было уделено погрешности определения площади озер.

Районы исследования и использованные материалы. Оценка надежности результатов дешифрирования термокарстовых озер была проведена на примере трех эталонных участков, расположенных на территории Западной Сибири и Центральной Якутии (рисунок 2.14). Выбор этих участков был обусловлен в первую очередь наличием необходимых материалов: снимков со спутника Landsat и снимков сверхвысокого или очень высокого разрешения (со спутников WorldView-1, IRS-P5 (Cartosat) и SPOT-5), полученных за одну или близкие даты (таблица 2.1). Оценка надежности была основана на сопоставлении космических снимков со спутника Landsat с космическими снимками сверхвысокого или очень высокого разрешения. Снимки со сверхвысоким пространственным разрешением использовались в качестве эталонных изображений как наиболее точно отражающие ситуацию в действительности.

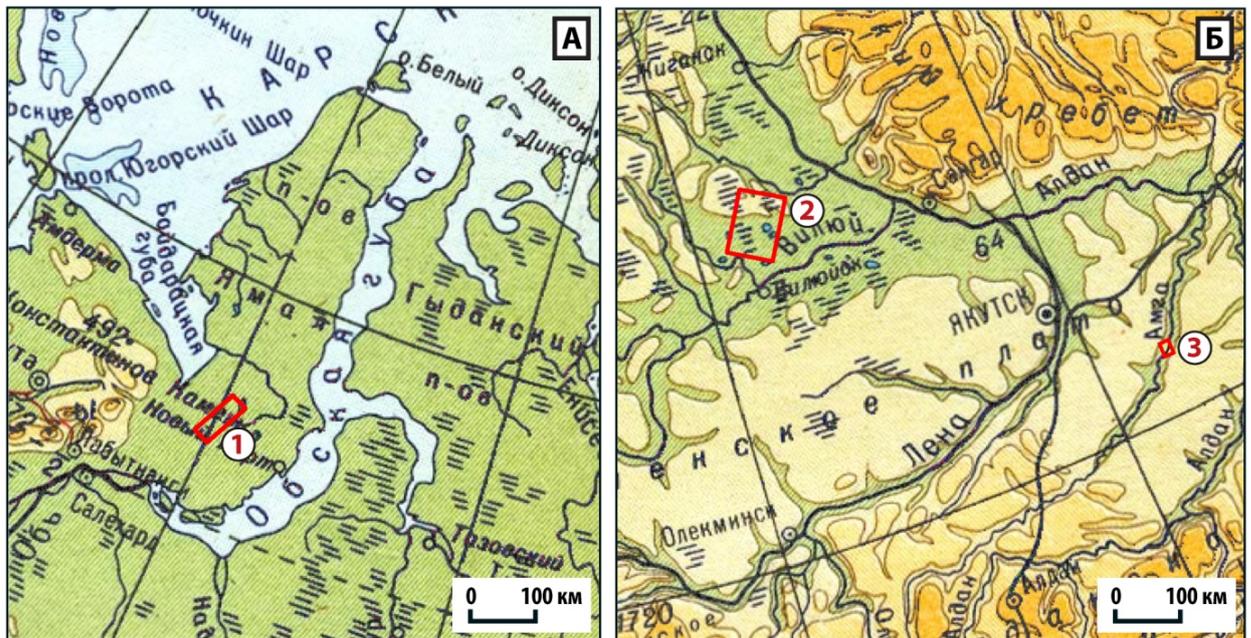


Рисунок 2.14. Расположение эталонных участков: А – на территории Западной Сибири, Б – на территории Центральной Якутии

Таблица 2.1

Космические снимки, использованные для оценки надежности дешифрирования термокарстовых озер

№ эталонного участка	Дата съемки	Съемочная система	Пространственное разрешение, м
1 (Ямал)	14 июля 2009	IRS-P5 (Cartosat)	2,5
	28 июля 2009	Landsat-5 TM	30
2 (Виллюй)	23 августа 2011	SPOT-5	2,5
	23 августа 2011	Landsat-5 TM	30
3 (Амга)	3 июля 2010	WorldView-1	0,5
	3 июля 2010	Landsat-7 ETM+	30

Эталонные участки отличаются друг от друга по площади (таблица 2.2). Эталонный участок №2 (Виллюй) самый большой по площади, однако плотность озер (количество озер на единицу площади) на нем самая низкая – 1 озеро на км². Тем не менее, на территории этого участка расположено больше всего крупных озер. Эталонному участку №1 (Ямал) свойственны наибольшее количество озер, приходящееся на единицу площади (49,2 озер на км²) и наибольшая озерность, определяемая долей площади, занятой озерами (17%). На эталонном участке №3 (Амга) общая плотность озер и озерность небольшие – 5,4 озер на км² и 7%, распространены малые и средние озера, нет озер площадью более 10 га. У всех участков наблюдается одна общая черта – преобладают малые озера площадью менее 0,5 га.

Таблица 2.2

Характеристика сети озер эталонных участков
по снимкам сверхвысокого разрешения

		Эталонный участок		
		№1	№2	№3
Расположение района		Южная часть полуострова Ямал	Долина реки Вилюя в ее нижнем течении	Среднее течение реки Амги
Площадь района, км ²		2000	7000	100
Общее количество озер		98317	7432	538
Общая площадь озер, км ²		348	594	7
Озерность района (доля площади, занятая озерами), %		17%	8%	7%
Количество озер разной площади				
малые озера	менее 0,1 га	81773 (83%)	4234 (57%)	134 (25%)
	0,1 – 0,5 га	10012 (10%)	1264 (17%)	197 (37%)
средние озера	0,5 – 1 га	1952 (2%)	364 (5%)	90 (17%)
	1 – 10 га	3859 (4%)	805 (11%)	116 (21%)
крупные озера	10 – 100 га	697 (1%)	608 (8%)	-
	более 100 га	24 (0%)	157 (2%)	-
Соотношение площадей озер разного размера		<p>средние крупные малые</p>	<p>крупные средние малые</p>	<p>средние малые</p>

Для оценки надежности результатов дешифрирования озер на снимке MSS с пространственным разрешением 80 м, ввиду отсутствия пар снимков с разрешением 80 м и сверхвысокого разрешения на одну и ту же дату, пришлось смоделировать снимок MSS. Снимок со спутника Landsat с разрешением 30 м в ближней инфракрасной зоне был приведен к разрешению 80 м. Помимо этого было учтено радиометрическое разрешение снимков MSS со спутника Landsat (7 бит), которое отличается от радиометрического разрешения снимков ETM+(TM) со спутника Landsat (8 бит). Количество уровней яркости было уменьшено с 256 (8 бит) до 128 (7 бит). Все операции были выполнены в программном пакете Scanex IMAGE Processor. Это позволило с определенной долей условности рассмотреть надежность выделения озер на снимках, полученных системой MSS, которые приходится использовать при анализе многолетних изменений площади термокарстовых озер. Фрагменты использованных снимков, в том числе смоделированных снимков MSS, на территорию каждого эталонного участка представлены на рисунке 2.15, 2.16 и 2.17.

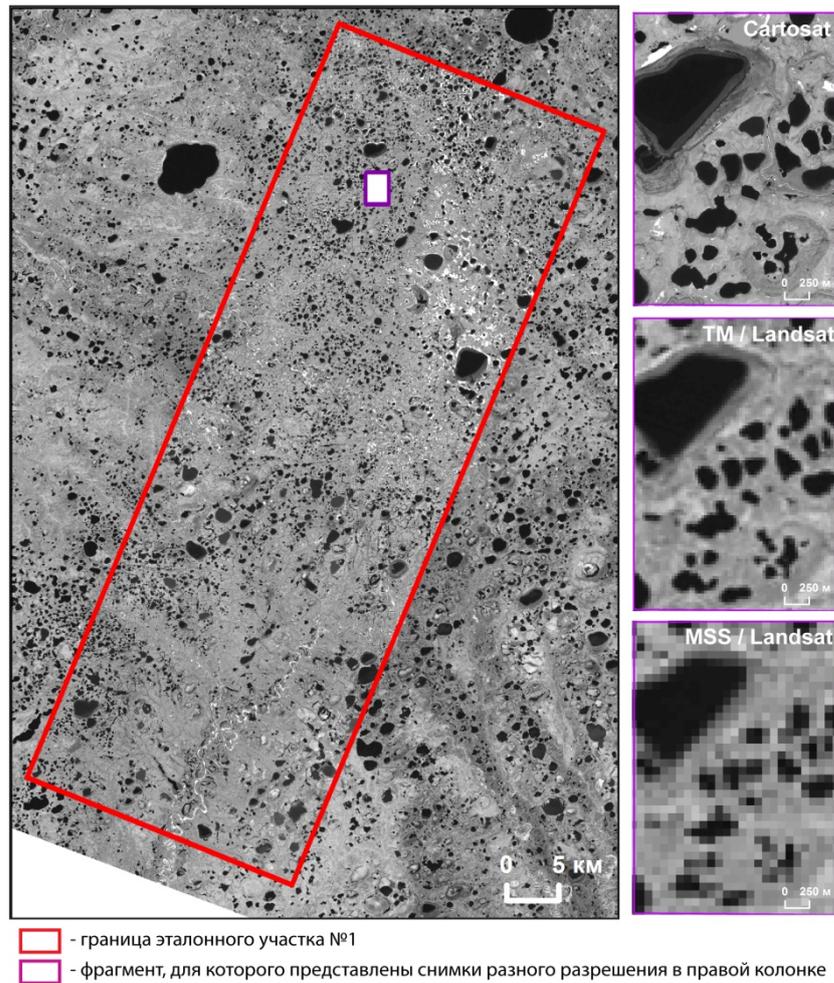


Рисунок 2.15. Фрагменты космических снимков на территорию эталонного участка №1, Ямал

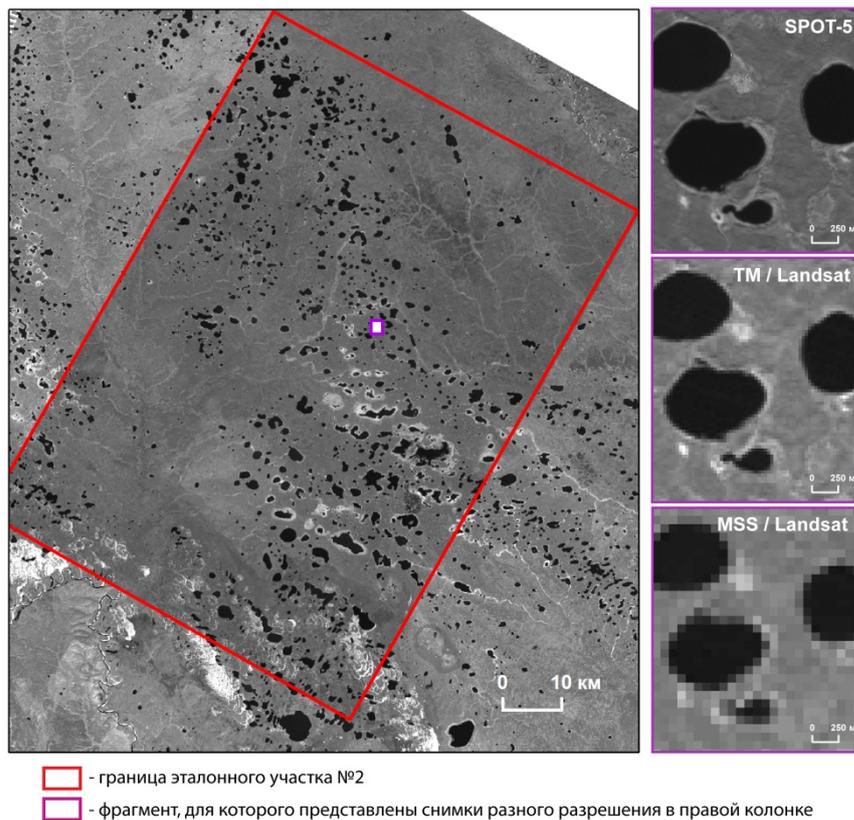


Рисунок 2.16. Фрагменты космических снимков на территорию эталонного участка №2, Виллюй

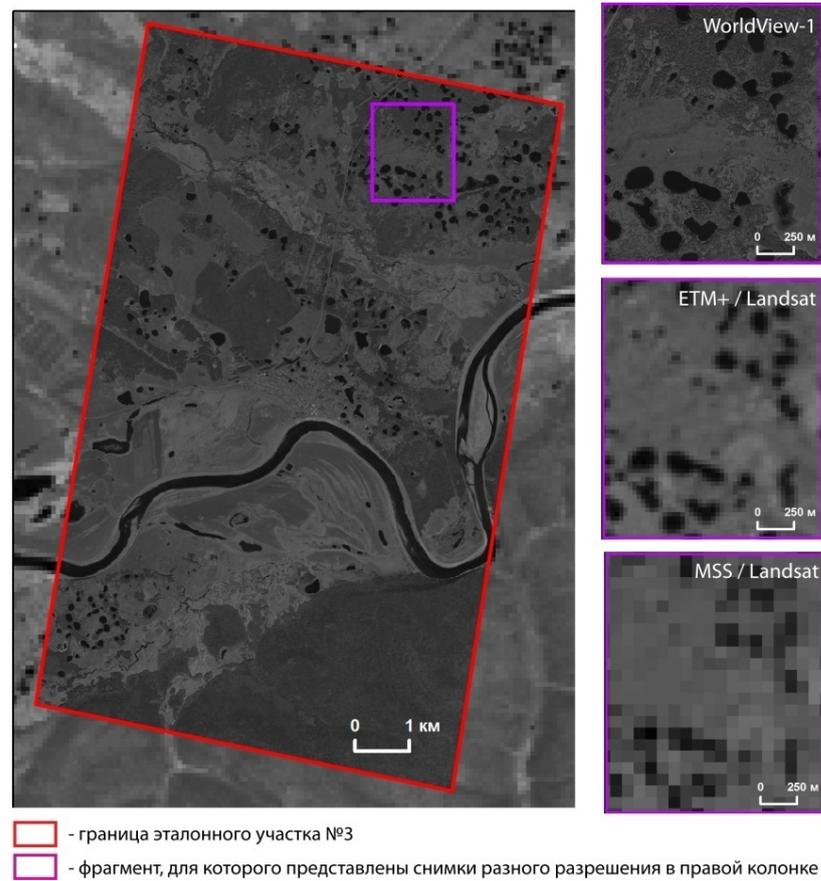


Рисунок 2.17. Фрагменты космических снимков на территорию эталонного участка №3, Амга

Определение надежности дешифрирования термокарстовых озер было выполнено по результатам автоматизированного дешифрирования без обучения (на основе кластеризации ISODATA), выбранного в качестве способа дешифрирования озер для изучения динамики термокарстовых озер (см. раздел 2.3). После того, как водные объекты были выделены в отдельный класс, они из растрового формата в автоматическом режиме были переведены в векторный формат с выделением контуров озер, по которым определялась площадь каждого озера. Перевод в векторный формат был необходим для того, чтобы определить показатели надежности для каждого конкретного озера отдельно и для групп озер разной площади.

Существуют разные методы векторизации, то есть разные способы перевода изображения объектов (в нашем случае термокарстовых озер) из растрового формата в векторный. В частности можно выделить методы со сглаживанием очертаний получаемых полигонов (контуров озер) и без сглаживания очертаний.

Для сравнения этих двух методов и выбора одного из них, погрешности определения площади озер по космическим снимкам со спутника Landsat с пространственным разрешением 30 м относительно снимков сверхвысокого разрешения в программном пакете ArcGIS были вычислены с использованием обоих методов и представлены в виде графика (рисунок 2.18).

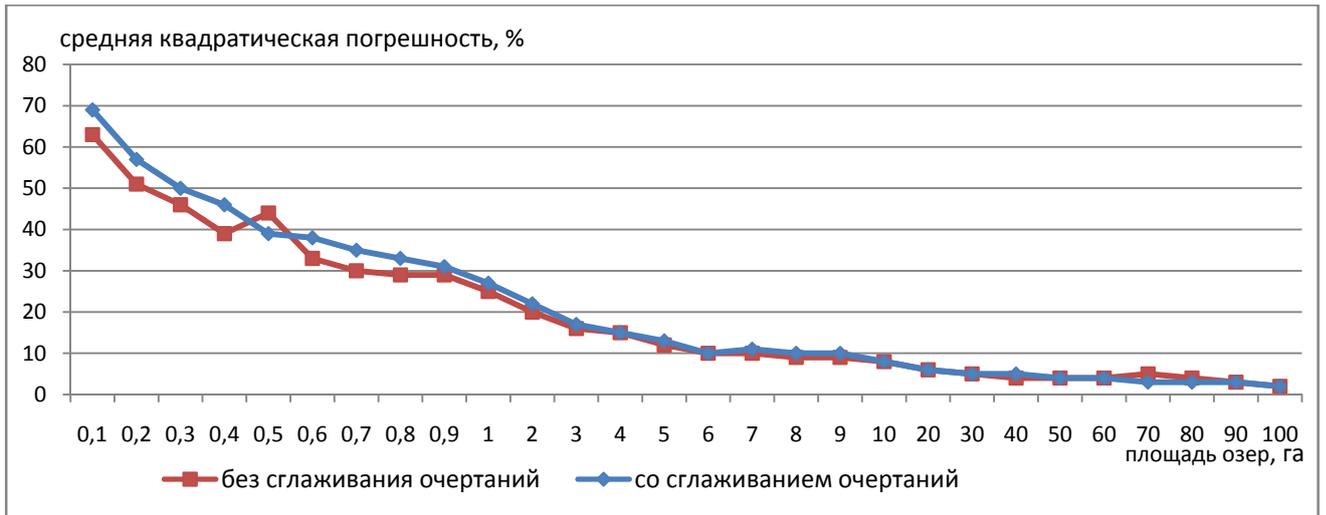


Рисунок 2.18. Средняя квадратическая погрешность определения площади озера по снимку ETM+(TM)/Landsat, вычисленная с использованием разных методов векторизации: со сглаживанием очертаний полигонов и без сглаживания очертаний полигонов

График указывает на некоторые различия величины средней квадратической погрешности определения площади озера в зависимости от метода векторизации, заметно сказывающейся для небольших озера площадью менее 3 га. Для метода без сглаживания очертаний контуров озера величина погрешности в этом диапазоне оказалась меньше, нежели для метода со сглаживанием очертаний. Для озера площадью более 3 га погрешности оказались одинаковыми для обоих методов.

Несмотря на наблюдаемые небольшие различия в площади озера, определяемых с использованием разных методов векторизации, при изучении изменений площади озера возможно использование любого из методов. Главное в процессе изучения использовать один выбранный метод.

В нашем исследовании в качестве способа векторизации был выбран метод со сглаживанием очертаний полигонов, реализованный в программном пакете ArcGIS. Несмотря на некоторое увеличение погрешности определения площади малых озера этот метод позволяет представить озера в более привычной – округлой форме.

Оценка надежности выполнялась по каждому эталонному участку отдельно и по всем эталонным участкам вместе. Сравнивались результаты дешифрирования космического снимка со спутника Landsat с пространственным разрешением 30 м и смоделированного космического снимка со спутника Landsat с пространственным разрешением 80 м с результатами дешифрирования снимка сверхвысокого разрешения. Были определены полнота дешифрирования озера, достоверность дешифрирования озера и погрешность определения площади озера по космическим снимкам со спутника Landsat.

Полнота дешифрирования озера характеризует отсутствие пропусков, она была определена как отношение количества озера, дешифрируемых на снимках Landsat к количеству озера,

дешифрируемых на снимке сверхвысокого разрешения. Такая величина была получена для отдельных групп озер разной площади, что позволило определить размер озер, наиболее полно отображаемых на снимках Landsat.

Достоверность дешифрирования озер характеризует долю правильно дешифрируемых объектов. В ходе дешифрирования возникают случаи, когда к озерам могут быть отнесены не водные объекты и наоборот. Достоверность дешифрирования была определена как отношение общего количества правильно отдешифрированных по снимку Landsat озер к общему количеству озер, выделенных по снимку сверхвысокого разрешения за вычетом малых озер, не отображаемых на снимке Landsat из-за его более низкого пространственного разрешения.

При изучении динамики термокарстовых озер очень важно знать точность определения площади, поэтому в исследовании была вычислена *погрешность определения площади озер* по космическим снимкам со спутника Landsat относительно снимков сверхвысокого разрешения. Для каждой пары изображений озер была определена относительная погрешность, выраженная в процентах:

$$\Delta = 100\% \left(\frac{a_i - A_{ист}}{A_{ист}} \right), \text{ где}$$

Δ – относительная погрешность определения площади озер,

a_i – площадь озера, вычисленная по снимку Landsat

$A_{ист}$ – истинное значение площади озера, вычисленное по снимку сверхвысокого разрешения.

Дополнительно была определена средняя квадратическая погрешность σ для отдельных групп озер разной площади по формуле Гаусса, рекомендуемой в учебном пособии “Картографический метод исследования” (Берлянт, 1988):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta^2}{n}}, \text{ где}$$

Δ – относительная погрешность определения площади каждого озера,

n – общее количество озер.

Результаты определения надежности дешифрирования термокарстовых озер. Один пиксел на снимке ETM+(TM)/Landsat составляет 900 м² (30м * 30м), т.е. примерно 1000 м², а на снимке MSS/Landsat – 4800 м² (80м * 60м), т.е. примерно 5000 м². Однако не все озера площадью более 1000 м² (*более 0,1 га*) выделяются на снимке ETM+(TM)/Landsat и более 5000 м² (*более 0,5 га*) – на снимке MSS/Landsat. Об этом свидетельствуют графики полноты дешифрирования термокарстовых озер (рисунок 2.19, 2.20), которая была определена для озер разной площади, как отношение количества озер, дешифрируемых на снимках Landsat к

количеству озер, дешифрируемых на снимке сверхвысокого разрешения. Согласно этим графикам *полнота дешифрирования озер* разных эталонных участков закономерно увеличивается по мере увеличения площади озер.

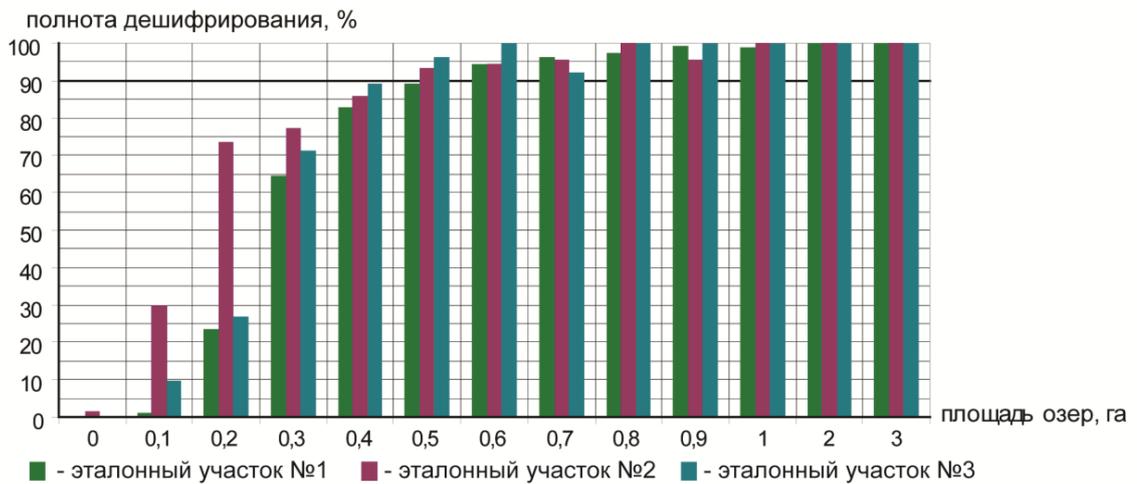


Рисунок 2.19. Полнота дешифрирования термокарстовых озер разной площади по снимку ETM+(TM)/Landsat относительно снимков сверхвысокого разрешения

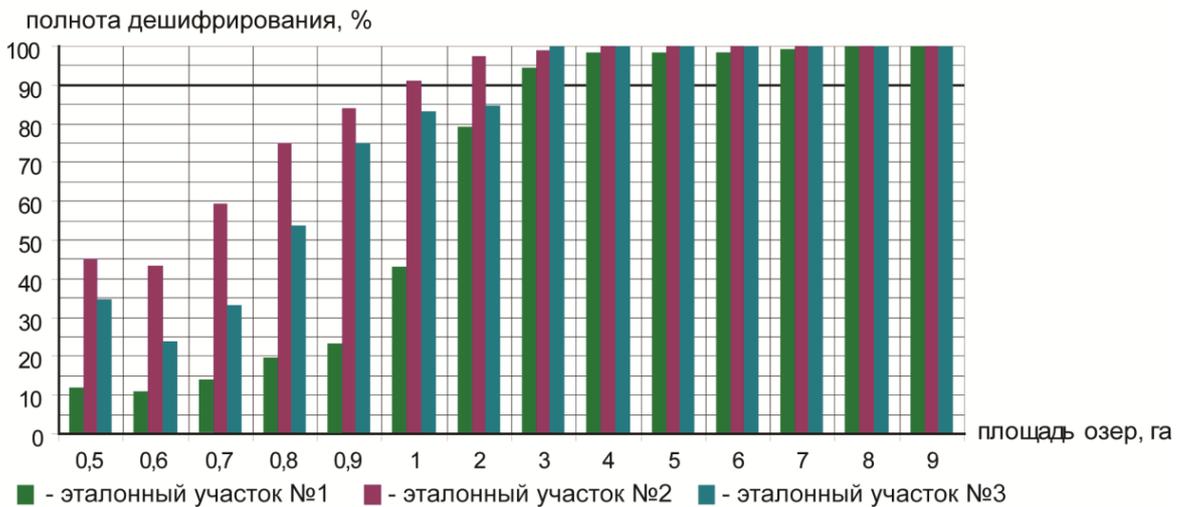


Рисунок 2.20. Полнота дешифрирования термокарстовых озер разной площади по снимку MSS/Landsat относительно снимков сверхвысокого разрешения

В нашем исследовании в качестве надежно определяемых рассматриваются озера с полнотой дешифрирования более 90% (как это принято в картографо-географических работах (Серапинас, 2004). Площади озер с полнотой дешифрирования более 90% были определены как для каждого эталонного участка отдельно, так и обобщенные для всех эталонных участков (таблица 2.3, таблица 2.4). При определении обобщенного значения была использована общая (суммарная) выборка озер всех эталонных участков. В качестве рекомендуемого значения следует использовать именно обобщенное значение, обеспеченное наибольшей выборкой озер. На снимке ETM+(TM)/Landsat надежно выделяются лишь озера площадью **более 0,5 га**, а на снимке MSS/Landsat – озера площадью **более 3 га**.

Таблица 2.3

Показатели надежности дешифрирования термокарстовых озер
по космическим снимкам ETM+(TM)/Landsat

Показатели надежности	эталонный участок			
	№1, Ямал	№2, Вилюй	№3, Амга	ОБЩЕЕ
Площади озер, обеспечивающие полноту дешифрирования более 90%	более 0,5 га	более 0,5 га	более 0,4 га	более 0,5 га
Полнота дешифрирования: <ul style="list-style-type: none"> • для озер, обеспечивающих полноту дешифрирования более 90% • для всех озер 	99% 12%	99% 44%	99% 53%	99% 16%
Достоверность дешифрирования	98,2%	95,7%	98,4%	97,6%
Площадь озер, обеспечивающая среднюю квадратическую погрешность определения площади озер менее 10%	более 8 га	более 5 га	более 5 га	более 10 га
Погрешность измерения площади озер: <ul style="list-style-type: none"> • для всех озер • для озер, обеспечивающих полноту дешифрирования более 90% • для озер площадью более 10 га 	-17% -11% -6%	-1% -1% -1%	-24% -26% -15%	-7% -5% -2%

Таблица 2.4

Показатели надежности дешифрирования термокарстовых озер
по космическим снимкам MSS/Landsat

Показатели надежности	эталонный участок			
	№1, Ямал	№2, Вилюй	№3, Амга	ОБЩЕЕ
Площади озер, обеспечивающие полноту дешифрирования более 90%	более 3 га	более 1 га	более 3 га	более 3 га
Полнота дешифрирования: <ul style="list-style-type: none"> • для озер, обеспечивающих полноту дешифрирования более 90% • для всех озер 	98% 6%	100% 36%	100% 27%	99% 9%
Площадь озер, обеспечивающая среднюю квадратическую погрешность определения площади озер менее 10%	40 га	40 га	–	40 га
Погрешность измерения площади озер: <ul style="list-style-type: none"> • для всех озер • для озер, обеспечивающих полноту дешифрирования более 90% • для озер площадью более 40 га 	-21% -18% -12%	-1% -1% -1%	-35% -19% –	-7% -6% -4%

Из изложенного следует, что для корректного сравнения снимков разного пространственного разрешения необходимо исключать из рассмотрения озера, отобразившиеся на снимке более высокого разрешения, но не отобразившиеся на снимке более низкого разрешения.

Целесообразно исключать из анализа озера с полнотой дешифрирования менее 90% и при анализе снимков одинакового разрешения, потому что на разных снимках из-за разных условий дискретизации сеткой пикселей озер разной формы может отобразиться разное количество озер и их совместное сравнение может привести к ошибочным выводам.

Полнота дешифрирования озер всех размеров в целом оказалась низкая и варьирует для разных участков от 12 до 53% для снимков ETM+(TM) и от 6 до 36% для снимков MSS (таблица 2.3, таблица 2.4), что обусловлено в первую очередь наличием в пределах районов криолитозоны огромного количества малых озер (таблица 2.2), которые ввиду пространственного разрешения не отображаются на снимках со спутника Landsat. Однако если исключить из анализа малые озера с полнотой дешифрирования менее 90% (для ETM+(TM)/Landsat озера площадью менее 0,5 га, для MSS/Landsat – менее 3 га), полнота дешифрирования всех оставшихся озер в целом возрастет до 99% (таблица 2.3, таблица 2.4).

Для всех эталонных участков была определена **достоверность дешифрирования озер**. Достоверность дешифрирования характеризует долю правильно отдешифрированных озер как водных объектов и, как правило, зависит от географических особенностей территории, спектральных характеристик используемого снимка и способа дешифрирования снимка. В нашем исследовании достоверность дешифрирования озер была определена по снимку со спутника Landsat в ближней инфракрасной зоне, в качестве способа дешифрирования которого была использована кластеризация ISODATA, реализованная в программном пакете Scanex IMAGE Processor. В результате для всех эталонных участков были получены высокие значения достоверности – в 98% (таблица 2.3). Таким образом, использование снимков в ближней инфракрасной зоне, а в качестве способа дешифрирования – кластеризации ISODATA для выделения озер вполне оправдано. При этом следует отметить, что в пределах проанализированных эталонных участков не наблюдались тени от облаков и не было гарей, которые на снимках в ближней инфракрасной зоне имеют такое же значение спектральной яркости, что и водные объекты.

По всем эталонным участкам была вычислена также относительная **погрешность определения площади озер** (уменьшения или увеличения площади) по снимкам Landsat относительно эталонных изображений сверхвысокого разрешения в процентах. По значениям этой погрешности для каждого отдельного озера составлены графики зависимости ее от площади озер (рисунок 2.21, 2.22). Графики указывают на постепенное уменьшение погрешности с увеличением площади озер и показывают, что при измерении площади озер по снимкам Landsat мы, главным образом, преуменьшаем площади озер относительно их действительного размера. Следовательно, относительная погрешность определения площади озер включает в себя относительную случайную составляющую ε с нулевым математическим ожиданием и постоянную систематическую составляющую δ : $\Delta = \varepsilon + \delta$

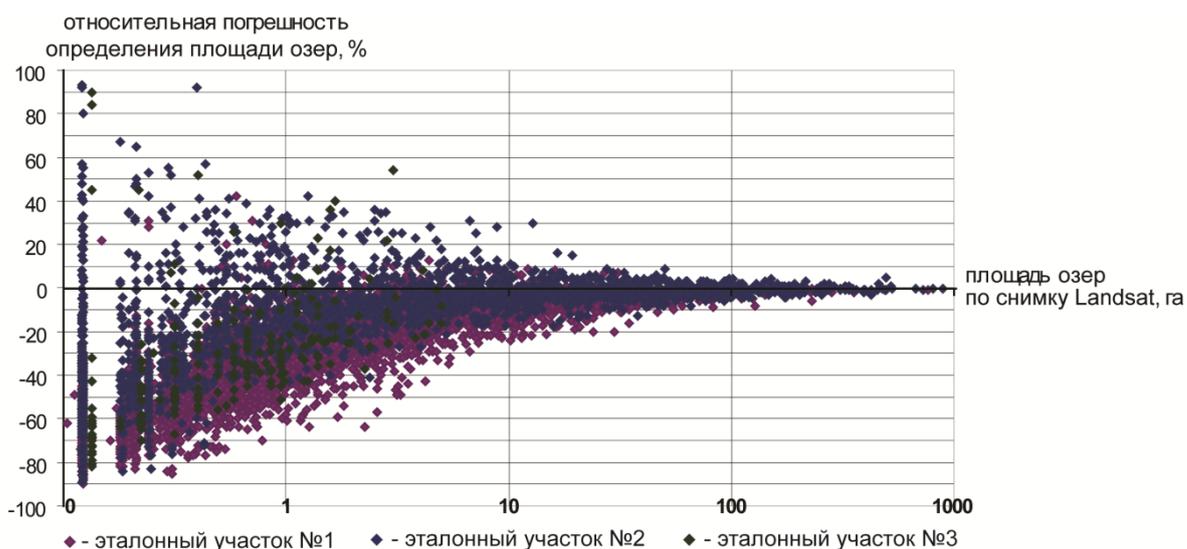


Рисунок 2.21. Изменение относительной погрешности определения площадей озера по снимку ETM+(TM)/Landsat в зависимости от площади озера

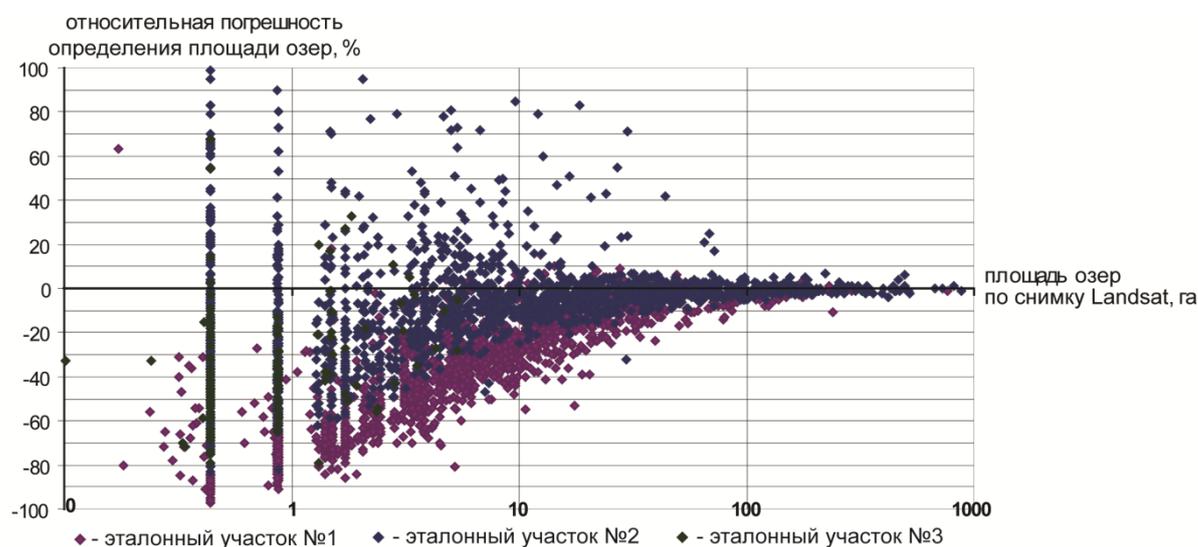


Рисунок 2.22. Изменение относительной погрешности определения площадей озера по снимку MSS/Landsat в зависимости от площади озера

С целью определения значений погрешности для озера разной площади по формуле Гаусса была вычислена средняя квадратическая погрешность σ для отдельных групп озера разной

площади: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta^2}{n}}$, где Δ – относительная погрешность определения площади каждого озера,

n – общее количество озера. Вычисленные значения σ характеризуют как случайную ϵ , так и

систематическую δ составляющие погрешности определения площади озера: $\sigma = \sigma_{\Delta} = \sqrt{\sigma_{\epsilon}^2 + \delta^2}$,

где σ_{ϵ}^2 – дисперсия случайных ошибок. В результате были составлены графики изменения средней квадратической погрешности определения площади озера σ в зависимости от величины площади озера (рисунок 2.23, 2.24). Линиями на графиках показано изменение средней

квадратической погрешности определения площади озер для каждого эталонного участка и для всех озер вместе, а столбцами – количество озер, по которому была определена погрешность. Серым фоном выделена часть графика, относящаяся к озерам с полнотой дешифрирования менее 90%.

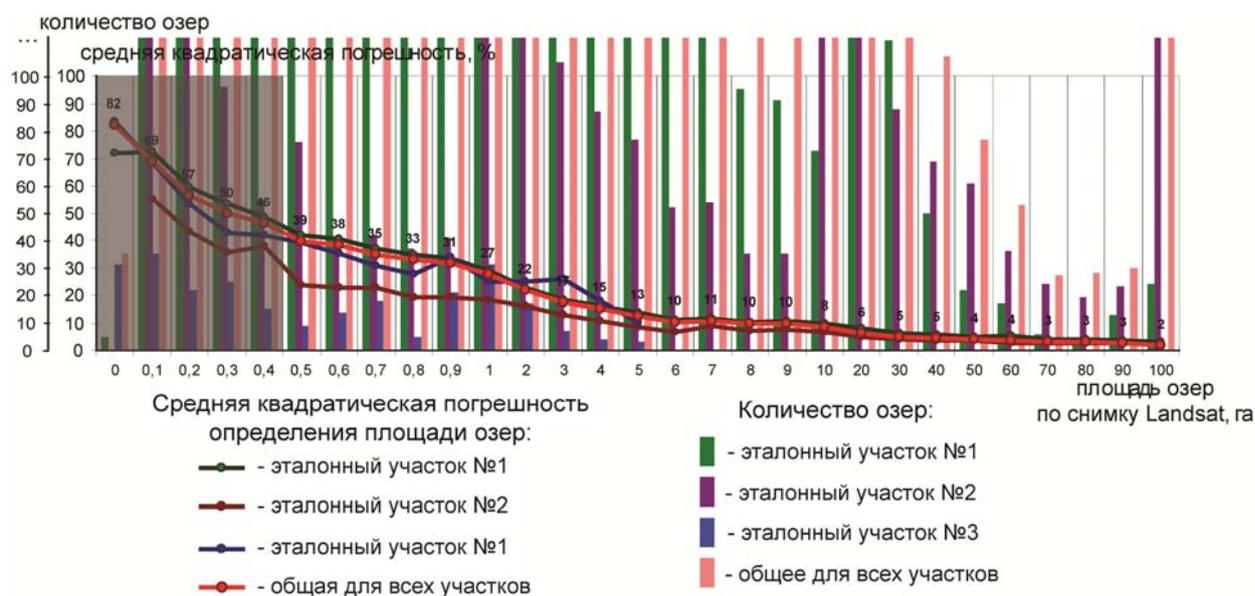


Рисунок 2.23. Средняя квадратическая погрешность определения площади озер по снимку ETM+(TM)/Landsat

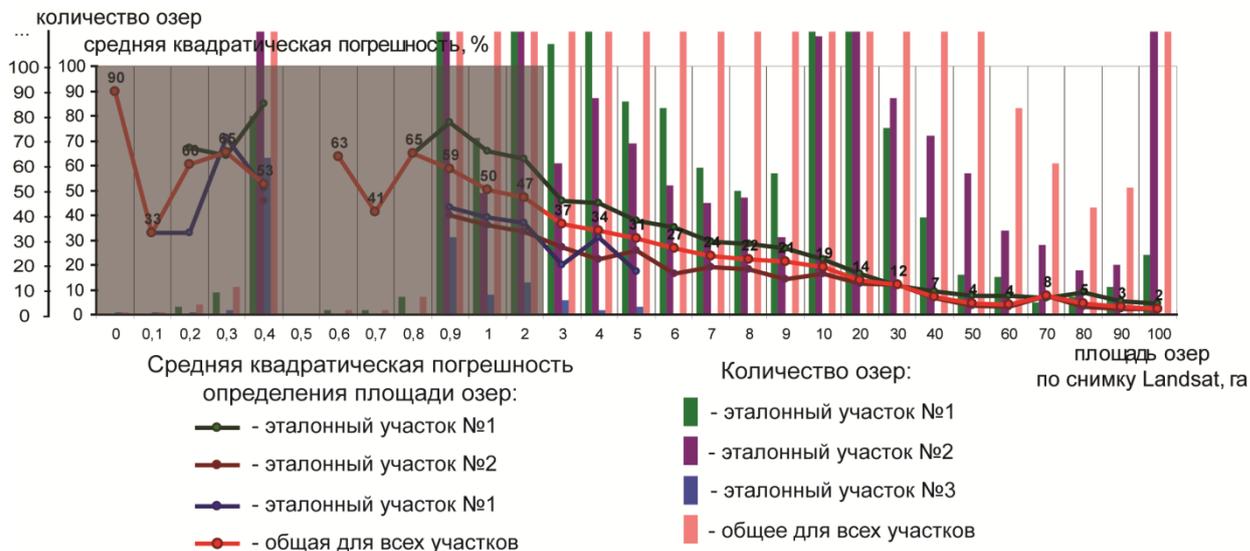


Рисунок 2.24. Средняя квадратическая погрешность определения площади озер по снимку MSS/Landsat

Согласно представленным графикам погрешности менее 10% характерны лишь для озер площадью более 10 га на снимке ETM+(TM)/Landsat и для озер площадью более 40 га на снимке MSS/Landsat, а менее 5% – для озер площадью более 30 га и 50 га соответственно. Примеры термокарстовых озер с разными величинами относительной погрешности определения площади озер по космическим снимкам Landsat приведены на рисунках 2.25 и

2.26. Видно, что с высокой долей точности по снимкам со спутника Landsat можно определить площади лишь крупных озер, контуры малых озер сильно искажены.

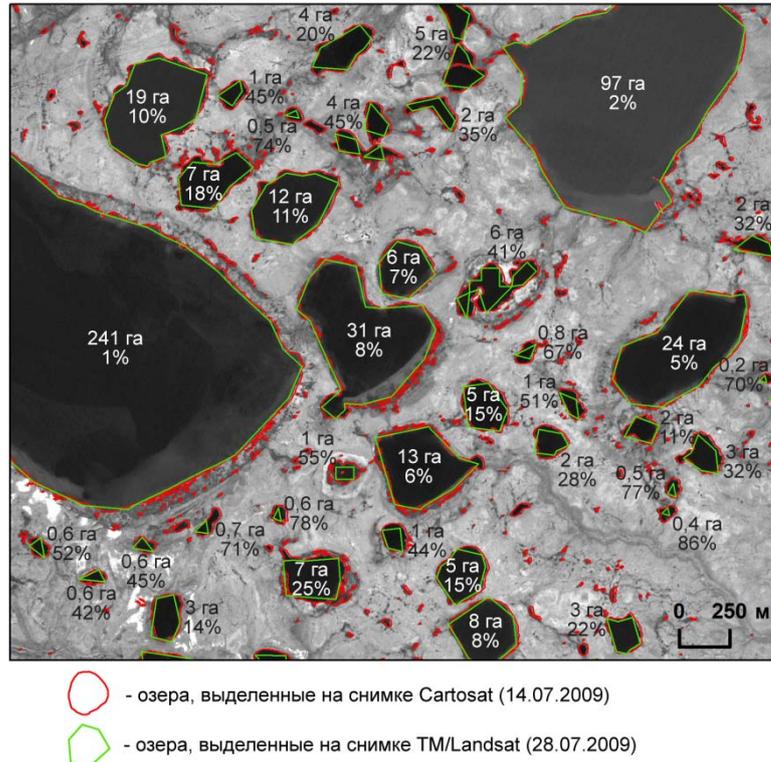


Рисунок 2.25. Примеры термокарстовых озер с разными значениями относительной погрешности определения площади озер по снимку TM/Landsat (подписана площадь озер и относительная погрешность ее определения)

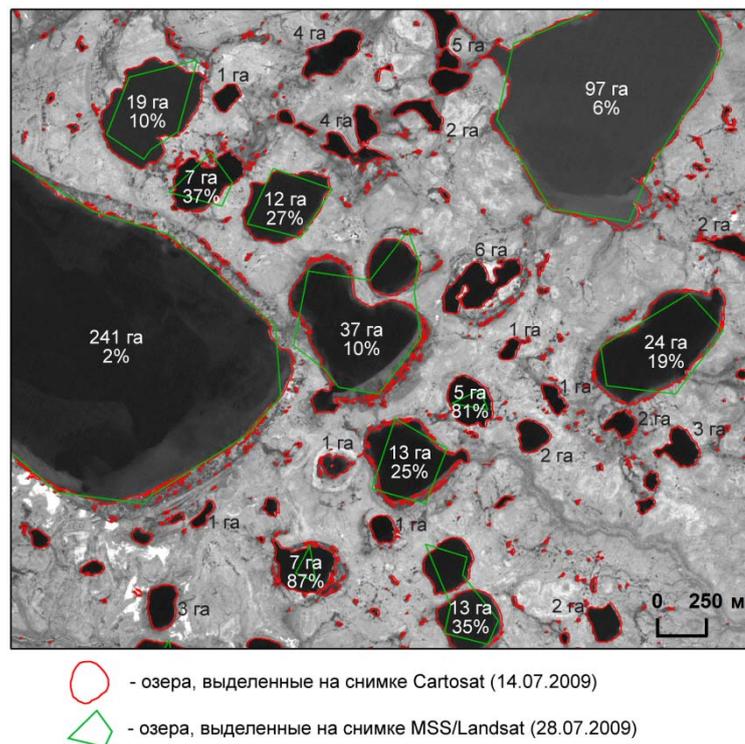


Рисунок 2.26. Примеры термокарстовых озер с разными значениями относительной погрешности определения площади озер по смоделированному снимку MSS/Landsat (подписана площадь озер и относительная погрешность ее определения)

Дополнительно для каждого эталонного участка была рассчитана относительная погрешность определения суммарной площади озер всех размеров в целом, она составила порядка 20 – 25% (таблица 2.3, 2.4). Исключением стал эталонный участок №2, для которого погрешность составила всего 1%, что свидетельствует о случайной компенсации погрешностей за счет их разных знаков, а не об их отсутствии. После исключения из рассмотрения озер с полнотой дешифрирования менее 90% (0,5 га для снимков ETM+(TM)/Landsat и 3 га для снимка MSS/Landsat) погрешность уменьшилась, однако лишь на немного. Исключение из анализа озер с полнотой дешифрирования менее 90% позволяет избавиться лишь от малых озер, не отобразившихся на снимке более низкого пространственного разрешения или отобразившихся в неполном объеме, и сделать сопоставимым количество озер на обоих снимках, на величину погрешности оно практически не влияет. Только при рассмотрении крупных озер погрешность оказывается менее 5%.

Таким образом, в результате сравнения основных материалов для изучения динамики термокарстовых озер – снимков со спутника Landsat – со снимками сверхвысокого разрешения было установлено, что:

- космические снимки со спутника Landsat недостаточно полно и точно отображают термокарстовые озера;
- использование космических снимков со спутника Landsat для количественных оценок требует ряда ограничений: исключения из рассмотрения малых озер с полнотой дешифрирования менее 90% и учета погрешности определения площади озер.

Для того чтобы наглядно показать результаты введения этих ограничений составлены схемы сопоставления пар снимков разного разрешения. Такие схемы были составлены на фрагмент эталонного участка №1 (Ямал) по двум космическим снимкам разного пространственного разрешения (снимку со спутника IRS-P5 (Cartosat) с разрешением 2,5 м и снимку TM/Landsat с разрешением 30 м), использованным при анализе надежности дешифрирования термокарстовых озер по снимку TM/Landsat. Сопоставление выполнялось для всех выделенных озер (рисунок 2.27-А), для озер с полнотой дешифрирования более 90% – для озер площадью более 0,5 га (рисунок 2.27-Б) и для озер, погрешность определения площади которых составляет менее 10% – для озер площадью более 10 га (рисунок 2.27-В). Красным цветом на схемах отображены озера и их части, которые были выделены лишь на снимке очень высокого разрешения и не отобразились на снимке TM/Landsat, ввиду его более низкого пространственного разрешения. Дополнительно кружками отмечены малые озера, отображаемые только на снимке со спутника IRS-P5 (Cartosat) (рисунок 2.27-А). Голубым

цветом показана водная поверхность озер, отдешифрированных на обоих космических снимках. В качестве серой подложки использован снимок со спутника IRS-P5 (Cartosat).

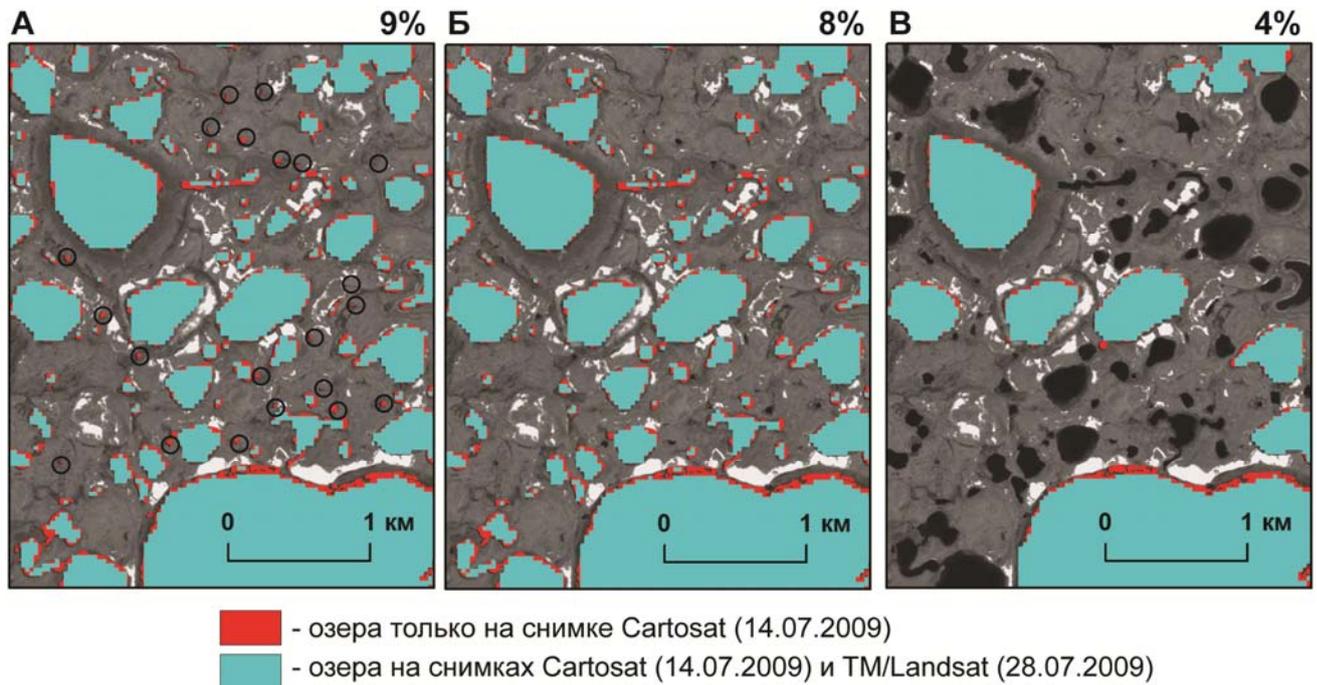


Рисунок 2.27. Схемы сопоставления снимков разного разрешения: **А** – для всех выделенных озер, **Б** – для озер с полнотой дешифрирования более 90% (для озер площадью более 0,5 га), **В** – для озер, погрешность определения площади которых составляет менее 10% (для озер площадью более 10 га)

Для каждого из рассмотренных случаев была рассчитана погрешность определения суммарной площади всех изображенных озер. При сопоставлении всех выделенных озер погрешность составила 9% (рисунок 2.27-А). После исключения из рассмотрения малых озер с полнотой дешифрирования менее 90% погрешность определения площади озер составила 8%, однако были исключены из рассмотрения малые озера, выделенные лишь на снимке со спутника IRS-P5 (Cartosat) (рисунок 2.27-Б). Лишь при сопоставлении озер площадью более 10 га, погрешность определения площади озер уменьшилась до 4% (рисунок 2.27-В).

Сопоставление снимка TM/Landsat со снимком очень высокого разрешения в разных вариантах показало уменьшение количества озер, изменения которых могут быть проанализированы по снимку TM/Landsat. Однако при изучении динамики термокарстовых озер количество проанализированных озер, особенно небольшого размера, имеет первостепенное значение. Поэтому в исследованиях рекомендуется не выполнять оценку суммарного изменения площади всех озер, а ограничиться количественной оценкой изменений площади отдельных озер с учетом погрешности определения их площади при исключении из анализа малых озер с полнотой дешифрирования менее 90%. Такую количественную оценку рекомендуется сочетать с составлением картографических материалов – схем динамики озер

для каждой пары разновременных снимков в масштабе порядка 1:100 000, которые позволят визуально зафиксировать и проверить изменения озер.

2.6. Оценка возможностей взаимного сопоставления космических снимков со спутника Landsat одинакового и разного разрешения

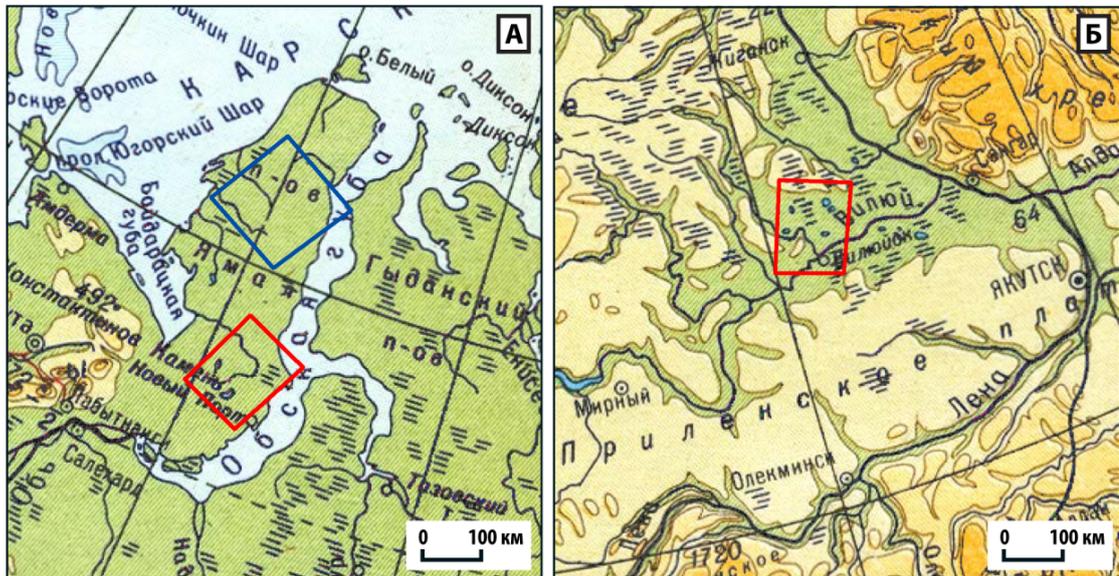
При изучении изменений термокарстовых озер по космическим снимкам со спутника Landsat возможны два варианта используемых материалов, когда сравнивают снимки одинакового разрешения (снимки ETM+(TM)/Landsat со снимками ETM+(TM)/Landsat) и снимки разного разрешения (снимки MSS/Landsat со снимками ETM+(TM)/Landsat). Расхождения в изображении озер на этих снимках могут быть вызваны не только произошедшими изменениями, но и особенностями отображения неизменившихся объектов на разных снимках. Поэтому проведена *оценка возможностей взаимного сопоставления единовременных космических снимков со спутника Landsat одинакового и разного разрешения.*

Необходимость выполнения такого сопоставления для снимков MSS/Landsat относительно снимков ETM+(TM)/Landsat обусловлена в первую очередь различием пространственного разрешения и тем, что именно такие снимки наиболее часто используются при анализе многолетних изменений озер. Сравнение снимков ETM+(TM)/Landsat с такими же снимками ETM+(TM)/Landsat, несмотря на одинаковое разрешение, также необходимо, потому что возможны различия площади озер на них, в частности за счет разного положения озер на сетке пикселей.

Главным условием сопоставления снимков было – отсутствие изменений площади озер на них, то есть единовременность их получения (желательно, чтобы снимки были получены в один день, но разными съемочными системами). Для снимков разного пространственного разрешения (MSS/Landsat и ETM+(TM)/Landsat) это условие выполнимо, в архивах имеются материалы, которые получены в один день. Тяжелее обстоит дело с поиском единовременных снимков одинакового разрешения (ETM+(TM)/Landsat и ETM+(TM)/Landsat). В лучшем случае такие снимки получены с разницей в один или несколько дней.

В результате сопоставления космических снимков со спутника Landsat должны быть получены значения площади озер, обеспечивающие полноту дешифрирования более 90%, и среднеквадратические погрешности определения площади озер по сравниваемым единовременным снимкам, которые необходимо будет учитывать при сравнении разновременных космических снимков со спутника Landsat для надежного выявления изменений площади озер, в том числе для надежного проведения количественных оценок произошедших изменений.

Сравнение снимков одинакового разрешения было проведено на примере двух эталонных участков, расположенных на территории Западной Сибири и Центральной Якутии (рисунок 2.28, таблица 2.5), а сравнение снимков разного пространственного разрешения – на примере одного участка, расположенного в северной части полуострова Ямал (рисунок 2.28, таблица 2.5).



◊ - анализ снимков одинакового разрешения ◊ - анализ снимков разного разрешения

Рисунок 2.28. Расположение участков исследования: А – на территории Западной Сибири, Б – на территории Центральной Якутии

Таблица 2.5

Космические снимки, использованные для оценки среднеквадратических отклонений площадей озёр, определяемых по снимкам Landsat

Сравниваемые снимки	Расположение	Дата съёмки	Съёмочная система	Пространственное разрешение, м
одинакового разрешения	Западная Сибирь	3 июля 1994	Landsat-5 TM	30
		12 июля 1994	Landsat-5 TM	30
	Центральная Якутия	16 июня 2001	Landsat-7 ETM+	30
		23 июня 2001	Landsat-7 ETM+	30
разного разрешения	Западная Сибирь	28 июля 1984	Landsat-5 TM	30
		28 июля 1984	Landsat-5 MSS	80

Методика сопоставления снимков для обоих вариантов (снимков одинакового разрешения и снимков разного разрешения) была аналогична той, что использовалась при оценке надежности дешифрирования озёр, с той лишь разницей, что вместо изменений погрешности определения площади каждого озера Δ учитывались изменения разностей площади озёр d , вычисленные по единовременным снимкам одинакового и разного разрешения.

В результате сопоставления была вычислена и представлена на графиках *полнота дешифрирования озёр* по снимкам ETM+(TM)/Landsat и MSS/Landsat относительно снимков ETM+(TM)/Landsat (рисунок 2.29, 2.30).

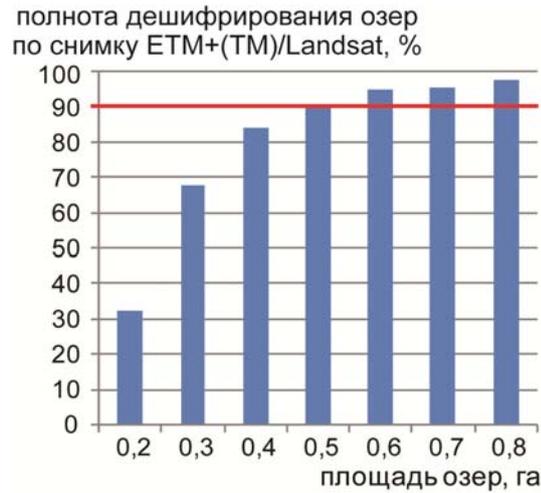


Рисунок 2.29. Полнота дешифрирования термокарстовых озер разной площади по снимкам ETM+(TM)/Landsat относительно снимков ETM+(TM)/Landsat за близкие даты



Рисунок 2.30. Полнота дешифрирования термокарстовых озер разной площади по снимкам MSS/Landsat относительно снимков ETM+(TM)/Landsat

Согласно полученным графикам полнота дешифрирования озер более 90% по снимкам ETM+(TM)/Landsat относительно таких же снимков ETM+(TM)/Landsat обеспечивается для озер площадью **более 0,4 га** (рисунок 2.29), а полнота дешифрирования озер более 90% по снимкам MSS/Landsat относительно снимков ETM+(TM)/Landsat обеспечивается для озер площадью **более 2 га** (рисунок 2.30). В обоих случаях полученные значения площади соответствуют 4 пикселям изображения снимков. Это вполне коррелирует с положением, что для воспроизведения компактного объекта на снимке нужно как минимум 4 пикселя (Кравцова, 2000). Озера меньшей площади (менее 0,4 га для снимков ETM+(TM)/Landsat и менее 2 га для снимков MSS/Landsat) рекомендуется исключать из анализа при изучении динамики термокарстовых озер по разновременным снимкам со спутника Landsat, то есть эти значения площади озер, обеспечивающие полноту дешифрирования более 90%, рекомендуется использовать в качестве пороговых значений.

Важно отметить, что при изучении многолетних изменений площади озер по космическим снимкам MSS/Landsat и ETM+(TM)/Landsat разного пространственного разрешения необходимо сделать снимки сопоставимыми и исключать из анализа озера площадью менее 2 га на обоих изображениях. При изучении изменений площади озер по снимкам ETM+(TM)/Landsat одинакового разрешения необходимо исключать из анализа озера площадью менее 0,4 га также на обоих изображениях.

Помимо полноты дешифрирования озер при сопоставлении космических снимков со спутника Landsat для обоих вариантов (сопоставления снимков одинакового разрешения и сопоставления снимков разного разрешения) были рассчитаны среднеквадратические погрешности определения площади озер разных размеров. Результаты были представлены на графиках изменения среднеквадратической погрешности определения площади озер в зависимости от размеров озер (рисунок 2.31, 2.32).

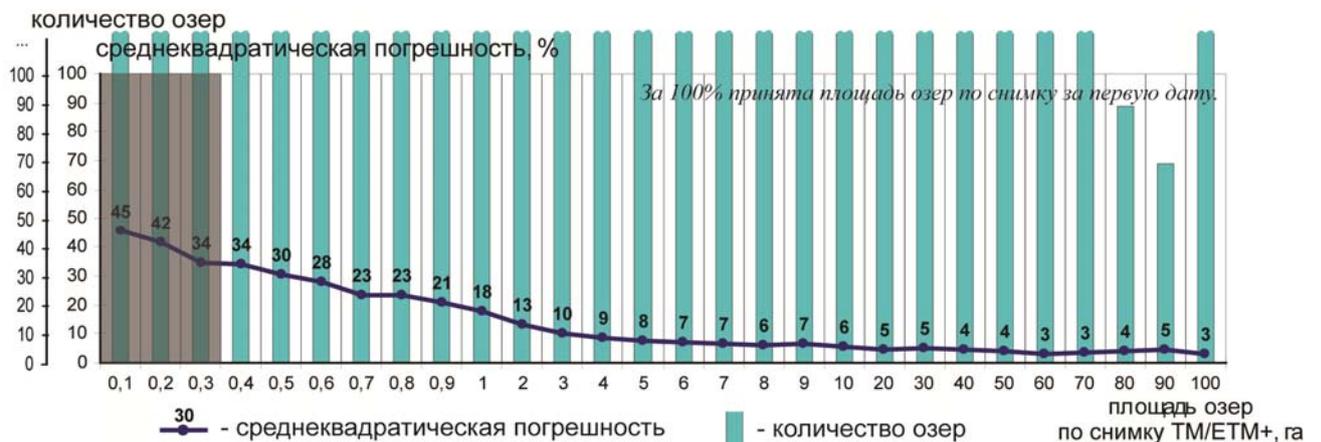


Рисунок 2.31. Среднеквадратические погрешности определения площади озер по снимку ETM+(TM)/Landsat относительно снимка ETM+(TM)/Landsat за близкие даты

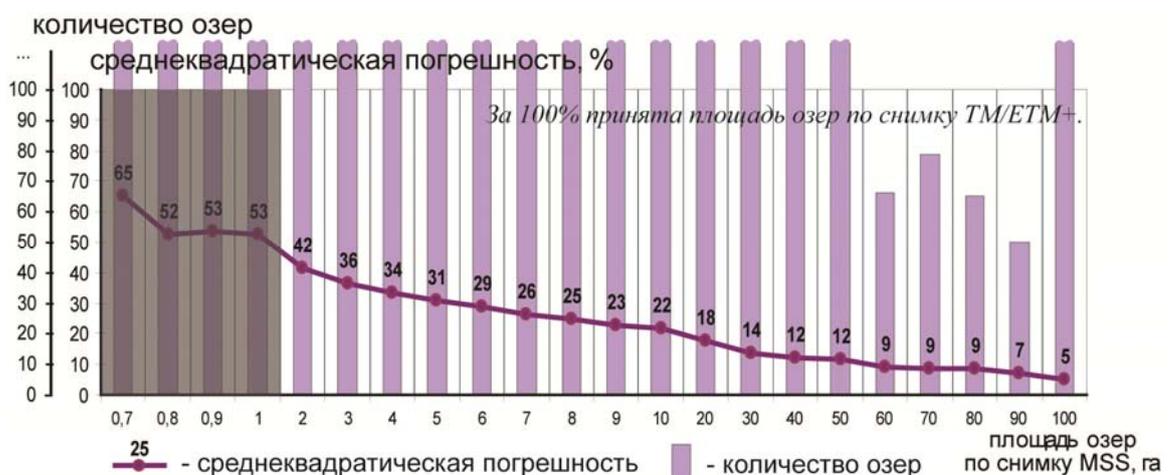


Рисунок 2.32. Среднеквадратические погрешности определения площади озер по снимку MSS/Landsat относительно снимка ETM+(TM)/Landsat

Графики (рисунок 2.31, 2.32) демонстрируют уменьшение среднеквадратической погрешности с увеличением площади озер, поэтому при количественной оценке изменений

площади озер по разновременным снимкам для групп озер разной площади необходимо учитывать разные значения среднеквадратической погрешности. Серым фоном на графиках отмечены площади озер, попадающие в области низкой полноты их дешифрирования, т.е. таких озер, динамику которых по этим снимкам исследовать нельзя.

Из-за выявленных больших значений погрешности определения площади малых озер (рисунок 2.23, 2.24, 2.31, 2.32), по количеству преобладающих в большинстве районов, невозможно точно определить изменение суммарной площади всех озер и к этому показателю не следует обращаться. Рекомендуется оценивать изменения отдельных озер, причем следует учитывать изменения, по величине превышающие погрешность измерений.

С точки зрения теории математической статистики средняя квадратическая погрешность σ это среднеквадратическое отклонение, которое характеризует рассеивание измеренной площади озера a_i , относительно ее “истинного” значения μ : $a_i = \mu \pm \sigma$ (рисунок 2.33). Согласно “правилу трех сигм” при нормальном распределении случайная величина оказывается в пределах $\mu - 3\sigma < a_i < \mu + 3\sigma$ с вероятностью 99,7%. Вероятность того, что случайная величина окажется вне этого предела, составляет 0,3% (Иванова с соавт., 1981). В свою очередь, случайная величина оказывается в пределах $\mu - 1,64\sigma < a_i < \mu + 1,64\sigma$ с вероятностью 90%, поэтому мы рекомендуем учитывать изменения площади озер, превышающие как раз значения $1,64\sigma$, где σ – среднеквадратическая погрешность. При рассмотрении лишь этих изменений случайная величина, в нашем случае погрешность определения площади озер (разность площади озер d , вычисленная по единовременным снимкам одинакового и разного разрешения) будет встречаться в рассматриваемом пределе с вероятностью 10%. Такой подход позволит зафиксировать существенные изменения площади озер в пределах большой территории, однако при этом увеличивается вероятность не учесть небольшие изменения, меньшие чем $1,64\sigma$.

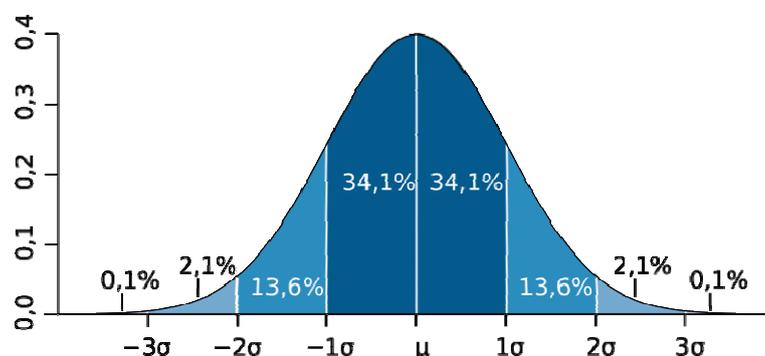


Рисунок 2.33. График плотности вероятности нормального распределения и процент попадания случайной величины на отрезки, равные среднеквадратическому отклонению (<http://ru.wikipedia.org>)

Таким образом, при количественной оценке изменений площади термокарстовых озер по космическим снимкам со спутника Landsat рекомендуется рассматривать изменения площади

отдельных озер, учитывая при этом значения среднеквадратической погрешности определения площади озер по единовременным снимкам со спутника Landsat, приведенные на графиках (рисунок 2.31, 2.32). Поскольку величина среднеквадратической погрешности зависит от площади озер, то для озер каждого размера необходимо учитывать свое значение погрешности: для малых озер это значение будет больше, для крупных озер – меньше. Такой подход позволит зафиксировать существенные изменения площади озер в пределах большой территории (например, в пределах большого эталонного участка), в дополнение к визуальному анализу картографических материалов – схем динамики озер, составляемых, как правило, в крупном масштабе на фрагменты эталонных участков.

2.7. Этап выявления изменений площади термокарстовых озер

Этап выявления изменений площади озер является основным этапом при изучении динамики термокарстовых озер. Он включает в себя:

- обработку результатов дешифрирования озер (векторизацию результатов дешифрирования озер; объединение озер, состоящих из нескольких векторных объектов; исключение из анализа малых озер с полнотой дешифрирования менее 90% путем введения пороговых значений), в результате которой должны быть получены переходные карты за каждую дату;
- сложение переходных карт с локализацией изменившихся озер (выявление изменений площади озер на основе визуальной и количественной оценки).

Обработка результатов дешифрирования термокарстовых озер:

Векторизация результатов дешифрирования озер. На этапе дешифрирования термокарстовых озер по двум разновременным космическим снимкам получено два растровых изображения (см. раздел 2.3, рисунок 2.13). Однако определить площади каждого отдельного озера и проследить их изменения, необходимые для количественной оценки, в растровой модели представления данных невозможно. Необходимо провести растрово-векторное преобразование – векторизацию, чтобы непрерывные группы ячеек раstra объединить и сформировать полигоны. Данная операция может быть выполнена в любом программном пакете, поддерживающем эту функцию, например в программном пакете ArcGIS (ArcToolbox: Conversion Tools → From Raster → Raster to Polygon) (рисунок 2.34).

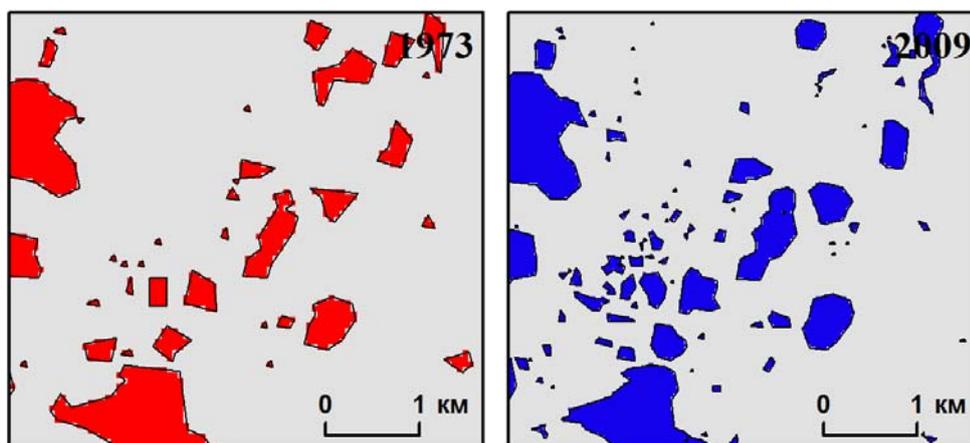


Рисунок 2.34. Результат векторизации растровой модели представления данных

Объединение озер, состоящих из нескольких векторных объектов. В результате векторизации практически каждое озеро стало отдельным объектом за исключением озер, состоящих из нескольких частей, имеющих общие точки. Возможные примеры таких объектов представлены на рисунке 2.35-А, где разным цветом линий обведены водоемы, отнесенные к разным векторным объектам. Группы объектов “а” и “б”; “в” и “г”; “д” и “е”; “ж”, “з” и “и”, имеющие общие точки, являются частями единых водоемов, поэтому каждую из них необходимо объединить в один водоем. Операция объединения таких объектов выполняется для каждого векторного слоя из пары сравниваемых разновременных данных (рисунок 2.35-Б).

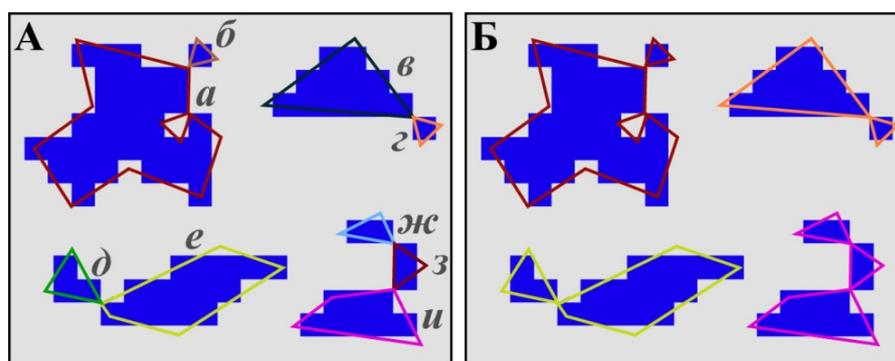


Рисунок 2.35. Озера, состоящие из нескольких частей, имеющих общие точки: А – до операции объединения, Б – после операции объединения

Необходимо учитывать также, что мы имеем дело с разновременными наборами данных, где изменение площади озер может сопровождаться разделением озера на части или слиянием нескольких водоемов в один. Чтобы исключить ошибки в определении изменения площади этих озер, необходимо объединить отдельные части озер, когда-то принадлежавшие одному озеру и образованные в результате уменьшения площади озера, а также отдельные части озер, слившиеся в одно озеро в результате увеличения площади озер.

Исключение из анализа малых озер, обеспечивающих полностью дешифрирования более 90%, путем введения пороговых значений. Важным этапом обработки результатов дешифрирования

озер является исключением из анализа малых озер с полнотой дешифрирования менее 90%, что впоследствии обеспечит сопоставимость полученных материалов, так называемых переходных карт. В результате оценки надежности дешифрирования термокарстовых озер и взаимного сопоставления единовременных космических снимков со спутника Landsat выявлено, что при сравнении снимков со спутника Landsat одинакового разрешения (30 м) – необходимо исключать озера площадью менее 0,4 га, а при сравнении снимков со спутника Landsat разного разрешения (80 м и 30 м) – площадью менее 2 га.

Для того чтобы исключить из анализа малые озера, в первую очередь необходимо подсчитать площади всех озер в пределах векторных слоев за разные даты, а затем провести выборку малых озер по следующему запросу: “площадь озера за первую дату должна быть меньше площади порогового значения и площадь озера за вторую дату должна быть меньше площади порогового значения” и исключить их из анализа. В результате такой выборки будут исключены озера, являющиеся малыми в пределах обоих наборов разновременных данных.

Сложение переходных карт с локализацией изменившихся озер.

Выявление изменений площади озер. После исключения из анализа малых озер с полнотой дешифрирования менее 90% можно приступить к сложению (сопоставлению) переходных карт и выявлению озер, площадь которых изменилась.

Согласно оценке надежности дешифрирования термокарстовых озер по космическим снимкам со спутника Landsat (см. раздел 2.4) определение площади озер с погрешностью менее 10% возможно лишь для крупных озер площадью более 10 га для снимков ETM+(TM)/Landsat и более 40 га для снимков MSS/Landsat. Поэтому, чтобы не исключать из анализа озера с погрешностью определения площади более 10% (для снимков ETM+(TM)/Landsat озера площадью менее 10 га и для снимка MSS/Landsat озера площадью менее 40 га), предложено проводить:

- количественную оценку изменений площади отдельных озер с учетом среднеквадратической погрешности определения площади озер и
- визуальную оценку изменений озер по картографическим материалам – схемам динамики.

При **количественной оценке изменений площади отдельных озер**, в первую очередь, рекомендуется *отделить вновь появившиеся объекты и исчезнувшие объекты* от всех остальных. На основе пространственного запроса по пересечению объектов одного векторного слоя с объектами другого проводится выделение водоемов, присутствующих на обоих векторных слоях. Водоемы, не попавшие в эту выборку из набора данных за первую дату, переносятся в новый слой и представляют собой исчезнувшие озера. Водоемы, не попавшие в

эту выборку из набора данных за вторую дату, также переносятся в другой новый слой, но представляют собой появившиеся озера.

Затем необходимо *вычислить значения изменений площади озера*. Изменения площади озера должны быть вычислены в процентах относительно площади за более раннюю дату. Однако при выборке озера, изменения площади которых превышают значения $1,64\sigma$, где σ – среднеквадратическая погрешность, важно, чтобы величина изменения была определена относительно той же площади, что и погрешность. Особенно это важно при сравнении снимков Landsat разного пространственного разрешения, потому что величина изменения будет меняться в зависимости от того, относительно какой площади она была определена. Дело в том, что на снимках более низкого пространственного разрешения (в частности на снимках MSS/Landsat относительно снимков ETM+(TM)/Landsat) площади озера, как показала оценка надежности дешифрирования озера, преимущественно меньше на величину отклонения, нежели на снимке более высокого разрешения, что объясняется наличием в величине отклонения случайной и постоянной систематической составляющих. Напомним, что среднеквадратические погрешности определения площади озера по космическому снимку MSS/Landsat были определены относительно площади озера ETM+(TM)/Landsat (рисунок 2.32). При сравнении снимков Landsat одинакового разрешения безразлично относительно площади за какую дату будут вычислены изменения: относительно площади за первую дату или относительно площади за вторую дату, так как сравниваются сопоставимые данные, в отклонении которых отсутствует постоянная систематическая составляющая.

После того, как величины изменения подсчитаны, *необходимо выбрать озера, у которых изменения площади превышают значения среднеквадратической погрешности*, умноженные на 1,64. Таким образом, мы получим примерную выборку значимо изменившихся озера в пределах всего исследуемого региона. Эту выборку целесообразно разделить на две части и выделить озера, площадь которых уменьшилась и озера, площадь которых увеличилась.

Несмотря на то, что при выборке озера с величиной изменения, превышающей $1,64\sigma$, где σ – среднеквадратическая погрешность, относительная погрешность определения площади озера как случайная величина при нормальном распределении будет встречаться с вероятностью 10%, вероятность встретить среди выбранных озера неизменившиеся велика, поэтому необходимо проводить *визуальную проверку* на наличие изменений.

Особенно велика вероятность встретить неизменившиеся озера среди водоемов, для которых выявлено увеличение площади при сравнении снимков разного пространственного разрешения. Дело в том, что площади векторизованных озера на снимке MSS/Landsat даже в случае отсутствия изменений, как показало наше исследование, заведомо меньше площади озера на снимке ETM+(TM)/Landsat на величину погрешности. Поэтому при реальном увеличении

площади озер в натуре величина изменения суммируется с величиной погрешности и вычисленный в результате процент оказывается больше на величину погрешности. Обратная ситуация наблюдается при уменьшении площади озер – величина изменения оказывается меньше на величину погрешности. Поэтому при выборке изменившихся озер, величина изменения которых превышает величину среднеквадратической погрешности, в состав изменившихся озер включается большее количество увеличившихся озер, чем уменьшившихся. Вероятно, при выборке увеличившихся озер, целесообразно использовать значения среднеквадратической погрешности, умноженные не на 1,64, а на большую величину.

Предложенная количественная оценка позволяет зафиксировать существенные изменения в пределах большой территории, по величине превышающие погрешность определения площади озер. Помимо этого она позволяет определить количество озер, уменьшивших свою площадь, количество озер, увеличившихся свою площадь и величину изменения с учетом погрешности определения площади озер.

Помимо количественной оценки необходим **визуальный анализ** изменений озер по картографическим материалам – *схемам динамики* озер, составленным на основании сопоставления (“сложения”) двух переходных карт.

Схемы динамики составляются после того, как из анализа были исключены малые озера с полнотой дешифрирования менее 90% и сравниваемые разновременные изображения стали сопоставимыми. Составление схем динамики основано на определении водной поверхности, являющейся “общей” для снимков за разные даты и наблюдаемой лишь за одну дату. Определение “общей” водной поверхности может быть выполнено, например, с помощью “растрового калькулятора” (Raster Calculator), представленного среди опций модуля Spatial Analyst в программном пакете ArcGIS. “Растровый калькулятор” позволяет при наличии двух перекрывающихся изображений получить третье, содержащее лишь те элементы растра, которые присутствуют на обоих исходных изображениях, исключая все остальные. В дальнейшем производится последовательное наложение друг на друга трех растровых изображений: двух изображений с озерами за разные даты и третьего, содержащего растровые элементы “общей” водной поверхности.

В результате получается схема динамики, на которой разным цветом выделена водная поверхность озер, наблюдаемая лишь на снимке за первую дату, то есть сокращение или исчезновение озер; водная поверхность озер, наблюдаемая лишь на снимке за вторую дату, то есть увеличение или появление озер и “общая” водная поверхность озер за обе даты. На основе визуального анализа таких схем выявляется общий характер изменений. Преобладание водной поверхности за первую дату (более раннюю) соответствует уменьшению площади термокарстовых озер, а преобладание водной поверхности за вторую дату (более позднюю) –

увеличению площади термокарстовых озер. При составлении схем динамики необходимо использовать яркие и насыщенные цвета, чтобы без особого труда увидеть изменения при их наличии. Озера, площадь которых меньше выявленных пороговых значений и для которых изменения не анализируются, остаются на схеме отображенными темным тоном. При оформлении схем динамики в качестве подложки целесообразно использовать изображение снимка лучшего качества (обычно за последнюю дату). Отображение ситуации на местности вокруг озер позволяет выполнить географический анализ причин их изменения. “Снимковая” подложка в значительной мере заменяет картографическую основу схем динамики.

Схемы динамики целесообразно составлять в масштабе не мельче 1:200 000 (желательно 1:100 000). Космические снимки со спутника Landsat используют обычно именно в таком масштабе, поскольку он позволяет выполнить наиболее детальный визуальный анализ, когда дискретная пиксельная структура изображения еще не мешает наблюдению. Размер пиксела снимка 30 м и пиксела экрана обычно используемых компьютеров – 0,3 мм соответствует один другому именно в масштабе 1:100 000. Размер пиксела в 30 м, на карте масштаба 1:100 000 равный 0,3 мм, в целом соответствует и графической точности карт 0,1 – 0,2 мм. Из-за необходимости работать в таком крупном масштабе схемы динамики позволяют наглядно зафиксировать изменения на ограниченной территории и составляются, как правило, на отдельные фрагменты эталонных участков. Поэтому при выборе этих фрагментов важно, чтобы они отражали наиболее характерные черты для всего исследуемого района.

Таким образом, при оценке изменений площади озер возможно использовать два метода (количественную оценку и визуальную оценку), каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Рекомендуется совместное использование, сочетание этих методов.

2.8. Анализ выявленных изменений

Анализ выявленных изменений площади озер направлен главным образом на поиск их причин. В основе этого анализа лежит выявление причинно-следственных связей между изменением термокарстовых озер и природными процессами, происходящими в районах их развития. В данном случае термокарстовое озеро рассматривается уже не как фрагмент снимка, не как объект, выраженный в виде растра или вектора, а как географический объект, имеющий тесные связи с другими объектами и факторами окружающей среды. Большое значение здесь имеет природа самого процесса термокарста и комплекс окружающих его явлений. Человеку, как исследователю, на этом этапе отводится основополагающая роль. Именно он находит причинно-следственные связи, занимается анализом проблемы и поиском причин. Именно он отвечает на вопросы: Где производить исследование динамики термокарстовых озер? Исследования каких изменений выполнять: сезонных, годовых или многолетних? Почему

наблюдается разная динамика площади озер? Какова главная причина наблюдаемых изменений?

Согласно обзору криолитологической литературы на развитие термокарста влияет ряд факторов, которые мы и рекомендуем оценивать как возможные причины динамики термокарстовых озер. К этим факторам относятся: наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород, равнинный характер территории, изменение теплового баланса (например, при потеплении климата), изменение водного баланса (например, изменение количества атмосферных осадков), наличие/отсутствие благоприятных условий дренажа (стока вод), влияние техногенных процессов. Следует также уделять внимание тектоническим процессам, которые могут посредством влияния на водный режим территории косвенно влиять на развитие термокарста. Тектонические опускания могут быть причиной обводнения поверхности и зарождения термокарстовых озер. Тектонические поднятия в свою очередь могут быть причиной дренирования территории и уменьшения интенсивности образования термокарстовых озер.

Для учета изменений теплового и водного баланса в анализ должны быть включены данные метеонаблюдений (изменение температуры воздуха, количества атмосферных осадков и др.) по метеостанциям, характеризующим исследуемый район. Необходимо учитывать изменения в течение всего исследуемого периода.

Наличие или отсутствие благоприятных условий дренажа необходимо оценивать по рельефу местности, по наличию водотоков и ложбин стока, по которым вода из озер может быть дренирована. Для такой оценки рекомендуется использовать аэрофотоснимки и космические снимки сверхвысокого разрешения, по которым проводится анализ динамики, а также топографические карты, хорошо отображающие ландшафтную структуру, особенно северных тундровых и лесотундровых территорий (Верещака, 2002).

Помимо многолетних изменений площади озер немаловажным является анализ межгодовых изменений, которые могут быть обусловлены как изменением водного баланса, так и развитием эрозионной деятельности водотоков.

Для выявления влияния техногенных процессов необходимо оценивать наличие объектов антропогенной деятельности, в особенности, связанной с разработкой нефтегазовых месторождений, в непосредственной близости от озер, площадь которых изменилась.

Для учета влияния неотектоники необходимо составление схем расположения морфоструктур, в пределах которых наблюдаются процессы понижения или повышения поверхности и анализ изменений термокарстовых озер в пределах этих морфоструктур.

Анализ возможного влияния перечисленных факторов на динамику термокарстовых озер выполнен нами в различных районах криолитозоны России в главе, посвященной результатам исследования динамики озер.

2.9. Выводы

1. Изучение изменений площади озер требует работы в достаточно крупных масштабах, поэтому проводится на эталонных участках, выбор которых обусловлен целью исследования.

2. В качестве основных материалов для изучения динамики термокарстовых озер целесообразно использовать космические снимки со спутника Landsat, имеющие ряд преимуществ по сравнению с другими космическими снимками: наличие снимков от начала 1970-х годов, что позволяет проанализировать изменения в период современного потепления климата; высокая регулярность съемки; свободный доступ к снимкам; наличие съемки в ближней инфракрасной зоне; большой охват территории одним снимком. Однако недостаточное пространственное разрешение космических снимков со спутника Landsat (у съемочной системы MSS – 80 м, а у съемочных систем TM и ETM+ – 30 м) является одним из главных ограничений, которое необходимо учитывать, особенно при анализе многолетних изменений площади озер, когда приходится сравнивать снимки разного пространственного разрешения. При подборе снимков для изучения динамики озер необходимо обеспечить отсутствие облачности и теней от облаков, а также учитывать сезон съемки. Рекомендуется использовать снимки, полученные в конце летнего – начале осеннего периода (в августе - сентябре).

3. В качестве способа дешифрирования озер предлагается использовать автоматизированное дешифрирование по космическим снимкам со спутника Landsat в ближней инфракрасной зоне на основе кластеризации ISODATA. Оценка результатов дешифрирования водных объектов с ее использованием показала достоверность в 98%. При отсутствии многозональной съемки (при использовании аэрофотоснимков и снимков KeyHole) предлагается использовать визуальное дешифрирование на экране монитора с цифрованием мышью береговых линий.

4. В результате оценки надежности дешифрирования термокарстовых озер по космическим снимкам Landsat, выполненной с использованием снимков сверхвысокого разрешения, установлена зависимость полноты дешифрирования озер и относительной погрешности определения площади озер от их размеров. Чем больше площадь озер, тем выше показатели надежности.

- На снимке ETM+(TM)/Landsat полнота дешифрирования более 90% обеспечивается лишь для озер площадью **более 0,5 га**, а на снимке MSS/Landsat – для озер площадью **более 3 га**.
- На снимке ETM+(TM)/Landsat определение значений площади озер с погрешностью менее 10% возможно лишь для крупных озер площадью **более 10 га**, а на снимке MSS/Landsat – для озер площадью **более 40 га**.

Использование космических снимков со спутника Landsat при изучении изменений площади озер требует ряда ограничений: исключения из рассмотрения малых озер с полнотой дешифрирования менее 90% и учета погрешности определения площади озер.

5. Сравнение разновременных снимков со спутника Landsat разного разрешения (MSS – 80 м и ETM+(TM) – 30 м) требует приведения их к одинаковой детальности путем исключения озер, не отображающихся на менее детальном снимке. Сравнение разновременных снимков одинакового разрешения также требует исключения из анализа малых озер, по-разному изображающихся на этих снимках из-за различий в их положении относительно сетки пикселей. Величины пороговых значений, обеспечивающих правомерность такого сравнения, определенные в результате сопоставления между собой единовременных космических снимков со спутника Landsat, составили: **0,4 га** для снимков ETM+(TM)/Landsat и **2 га** для снимков MSS/Landsat. Исключение из анализа малых озер такой величины обеспечивает сопоставимость количества озер на сравниваемых снимках.

6. При изучении динамики термокарстовых озер по космическим снимкам со спутника Landsat из-за больших значений погрешности определения площади малых озер, по количеству преобладающих в большинстве районов, нецелесообразно определять изменение суммарной площади всех озер. Рекомендуется оценивать изменения площади отдельных озер.

7. Количественная оценка изменений площади отдельных озер должна учитывать значения среднеквадратической погрешности определения площади озер, которые были получены в результате сопоставления между собой единовременных космических снимков со спутника Landsat. Рекомендуется оценивать изменения площади озер, превышающие значения $1,64\sigma$, где σ – среднеквадратическая погрешность определения площади озер. Такой подход позволяет зафиксировать существенные изменения площади озер в пределах большой территории.

8. Количественную оценку изменений площади озер необходимо сочетать с составлением картографических материалов – схем динамики термокарстовых озер, обеспечивающих проверку выявленных изменений и визуальный пространственный анализ изменений. Схемы динамики термокарстовых озер составляются по обработанным преобразованным изображениям, учитывающим разрешение сравниваемых снимков

(переходным картам) в масштабе порядка 1:100 000, на фрагменты эталонных участков, отражающие наиболее характерные черты всего исследуемого района. Схема динамики представляет собой графическое изображение, на котором на фоне изображения снимка за последнюю дату отображены расхождения в контурах и площади озер на разновременных снимках. Такое представление позволяет наглядно зафиксировать изменения озер и выполнить их географический пространственный анализ.

3. Результаты исследования динамики термокарстовых озер в различных районах России

3.1. Выбор районов исследования

Необходимость рассмотреть особенности изменения площади термокарстовых озер в различных геокриологических и ландшафтных условиях обусловила широкий охват районов исследования.

Выбор районов определялся в первую очередь распространением термокарстовых озер на территории России (рисунок 3.1.1). Развитие термокарста предполагает следующие условия: наличие высокольдистых многолетнемерзлых пород и равнинный характер территории. Поэтому ареной наиболее массового развития термокарста являются северные приморские низменности, представляющие собой аккумулятивные поверхности. Наиболее широко термокарстовые озера распространены в пределах *Западно-Сибирской низменности* и на *Севере Восточной Сибири в пределах Яно-Индигирской и Колымской низменностей* (причем в этих двух районах это достаточно крупные озера, образующие очень густую сеть). Термокарстовые озера достаточно широко распространены также на *Севере Европейской части России*, в *Центральной Якутии* и на *Севере Дальнего Востока (в пределах Анадырской низменности)*. Локальный характер распространения имеют термокарстовые озера по *долинам рек в разных районах криолитозоны России*, в том числе в котловинах *Забайкалья*.

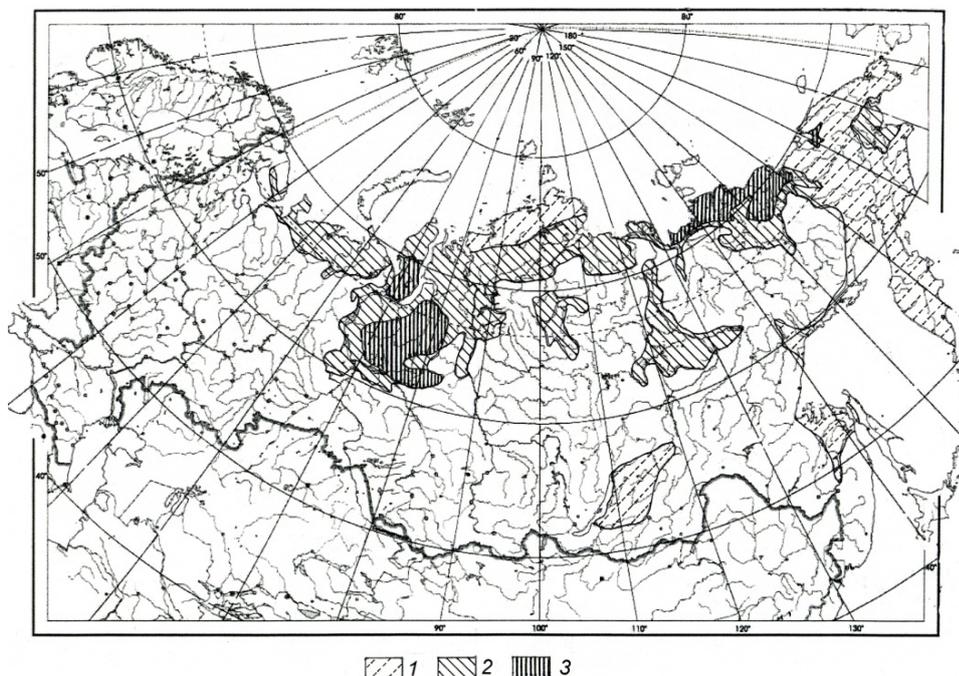


Рисунок 3.1.1. Обобщенная схема распространения термокарстовых озер на территории России (Кравцова, 2009)

1 – районы локального распространения преимущественно малых озер; 2 – районы повсеместного распространения преимущественно малых и средних озер; 3 – районы повсеместного распространения преимущественно средних и крупных озер

В исследовании мы исходили из того, что в криолитозоне, особенно в районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород распространены преимущественно озера термокарстового происхождения или озера, испытывающие или испытывавшие в прошлом воздействие процесса термокарста, поэтому рассматривались все озера, без разделения их по генезису.

Во-вторых, выбор районов исследования зависел от распределения наблюдаемого современного потепления климата. В качестве основной причины активизации термокарста рассматривается увеличение глубин сезонного или многолетнего протаивания до глубин залегания мерзлых пород, а массовое возникновение термокарста связывается с оттаиванием плейстоценовых отложений в эпоху “голоценового климатического оптимума”. Однако вопрос о возможном влиянии современного потепления климата на активизацию термокарста, несмотря на ряд имеющихся исследований, остается достаточно актуальным и открытым.

Согласно исследованию Г.В. Малковой и А.В. Павлова (2012), среднегодовая температура воздуха в последнее десятилетие (2000-2010 гг.) характеризуется аномально высокими значениями для многих регионов России, а сильное потепление климата (повышение температуры воздуха более чем на 1°C) охватывает большую часть территории криолитозоны России. Региональные особенности потепления климата, начиная с 1960-х годов (условного начала современного потепления для большинства северных регионов), отражает карта трендов среднегодовой температуры воздуха (рисунок 3.1.2)

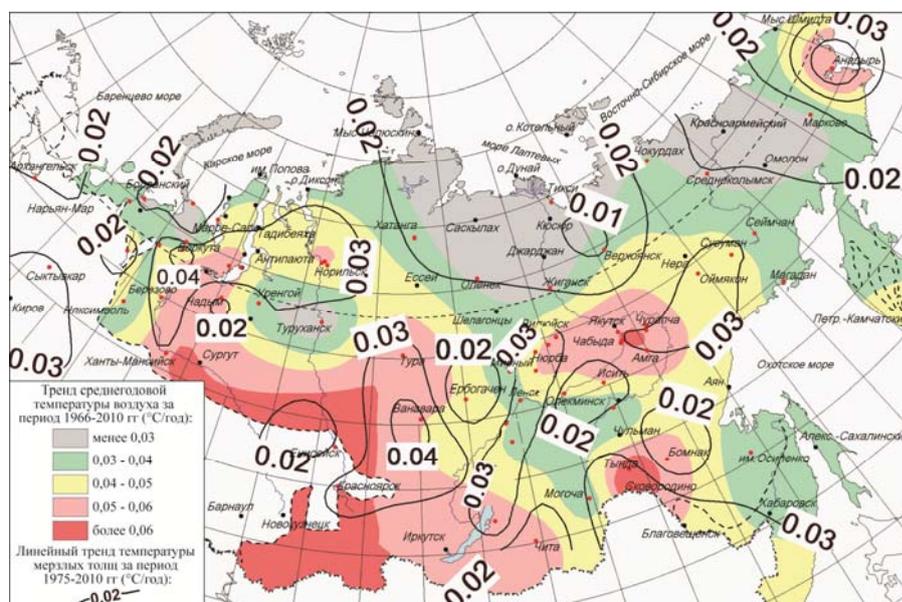


Рисунок 3.1.2. Тренды увеличения среднегодовой температуры воздуха и температуры мерзлых толщ (Малкова, Павлов, 2012)

Наиболее высокие значения трендов температуры воздуха отмечаются на юге Западной Сибири, в Центральной Якутии и на Анадырской низменности, наиболее низкие – на севере Средней и Восточной Сибири, на Югорском полуострове.

Согласно карте тех же авторов, отражающей метеогеокриологический риск под воздействием современных климатических изменений (повышения температуры в летний период, повышения температуры в зимний период, изменения толщины снега) (рисунок 3.1.3) в области высокого метеогеокриологического риска попадают север *Западной Сибири*, север *Европейской части России* и *Чукотка*, а в области слабого метеогеокриологического риска – дельта реки Лены, северная Якутия и частично южная Якутия (Малкова, Павлов, 2012).

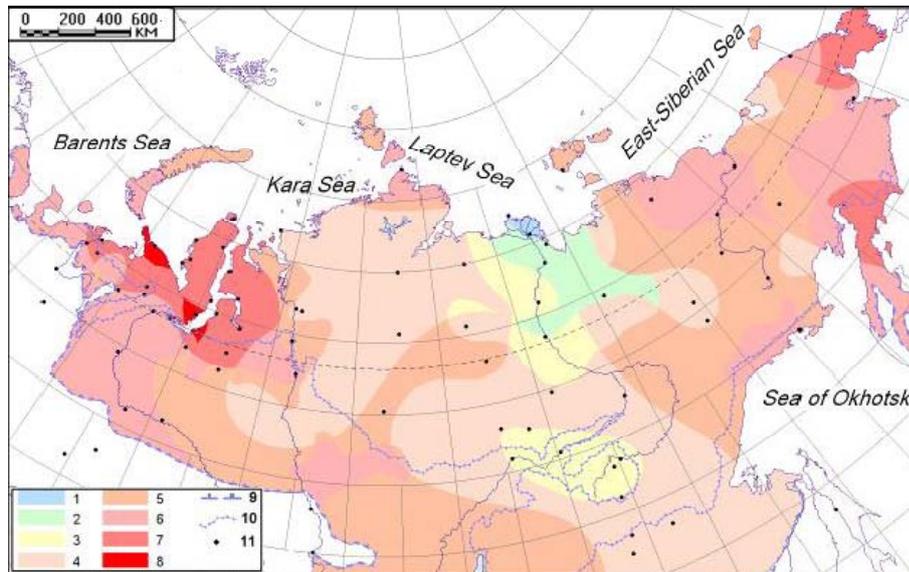


Рисунок 3.1.3. Карта метеогеокриологического риска криолитозоны России: (1-8) – баллы риска; 9- южная граница криолитозоны, 10 – граница сплошного распространения мерзлоты; 11 – метеостанции (Малкова, Павлов, 2012)

Помимо этого при выборе районов исследования были учтены результаты уже имеющихся исследований динамики озер. Большинство имеющихся исследований указывает на неодинаковое протекание процесса в разных регионах, а некоторые исследования показывают разные результаты для одного и того же района. В одних районах, в частности, было выявлено значительное увеличение площади озер (на территории *Центральной Якутии* и в *котловинах Забайкалья* (Кравцова, Быстрова, 2009)), что рассматривалось как результат возможной активизации термокарстового процесса, в связи с чем необходимы дополнительные проверки. В других районах наблюдаются противоречивые результаты (на территории *Западной Сибири*), когда одними исследователями указывается на увеличение площади озер в зоне сплошного распространения мерзлоты (Smith et al, 2005; Кирпотин с соавт., 2008; Брыксина с соавт., 2009), а другими – на уменьшение площади озер (Кравцова, Быстрова, 2009; Кравцова, Тарасенко, 2010).

В результате с учетом указанных критериев, на территории распространения криолитозоны России были выбраны для нашего исследования следующие районы (рисунок 3.1.4):

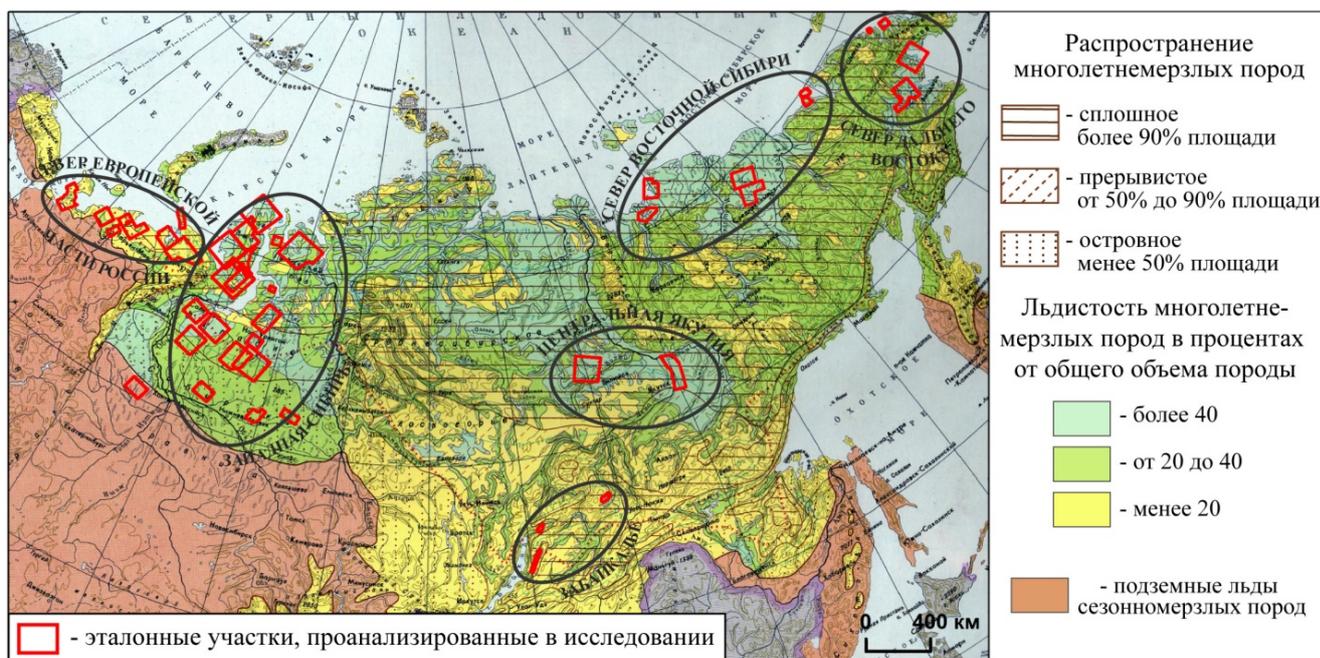


Рисунок 3.1.4. Районы исследования динамики термокарстовых озер

Север Европейской России – регион, в котором достаточно широко распространены малые и средние термокарстовые озера и который попадает в область высокого метеогеокриологического риска.

Западная Сибирь – регион, в котором практически повсеместно распространены средние и крупные термокарстовые озера. На юге Западной Сибири отмечаются наиболее высокие тренды увеличения температуры воздуха, а сам регион попадает в область высокого метеогеокриологического риска. Помимо этого в пределах этого региона отмечаются самые противоречивые результаты имеющихся исследований динамики озер.

Север Восточной Сибири – регион, в котором отмечается наиболее высокая льдистость многолетнемерзлых пород и распространено очень большое количество термокарстовых озер, в том числе крупного размера (особенно в пределах Яно-Индигирской и Колымской низменностей). Несмотря на то, что здесь не наблюдается высоких трендов увеличения температуры воздуха и регион попадает в область умеренного метеогеокриологического риска, исследование динамики озер здесь особенно важно ввиду высокой льдистости многолетнемерзлых пород и большого количества уже существующих озер.

Север Дальнего Востока – регион, в котором термокарстовые озера широко распространены лишь в пределах Анадырской низменности. При этом на этой низменности отмечаются высокие тренды увеличения температуры воздуха, а весь район Чукотки попадает в область высокого метеогеокриологического риска. В других районах Севера Дальнего Востока термокарстовые озера встречаются локально и приурочены главным образом к долинам рек.

Центральная Якутия – регион, в котором достаточно широко распространены малые и средние термокарстовые озера. Для него характерна достаточно высокая льдистость многолетнемерзлых пород, высокие тренды увеличения температуры воздуха и в предшествующем исследовании динамики озер было выявлено значительное увеличение площади озер (Кравцова, Быстрова, 2009). Для уточнения причин изменений требуются дополнительные исследования.

Котловины Забайкалья – регион, в котором термокарстовые озера, преимущественно малые, распространены локально, однако в результате исследования динамики озер здесь было также зафиксировано увеличение площади озер (Кравцова, Быстрова, 2009) и необходимо выявление причин изменений.

3.2. Север Европейской России

Природные особенности района. Север Европейской России представляет собой низменную равнину, протягивающуюся вдоль побережья Северного Ледовитого океана, заканчиваясь на юге у полярного круга. Территория неоднократно покрывалась оледенением и характеризуется хорошо выраженным ледниково-моренным рельефом. Прибрежные районы испытывали влияние морских трансгрессий и представляют собой первичные морские равнины. По всей территории развиты формы рельефа, связанные с многолетней мерзлотой (Гвоздецкий, 1968).

Типичные отметки междуречий равнины составляют от 30–60 до 130–180 м. Полого-холмистый рельеф осложнен структурно-аккумулятивными поднятиями, достигающими 200–250 м и наиболее четко выраженными в предуральской части. Равнина расчленена хорошо развитой гидрографической сетью, принадлежащей бассейну р. Печоры, за исключением рек, непосредственно впадающих в Ледовитый океан (Региональная криолитология, 1989). В палеогене – неогене регион представлял собой сушу, где интенсивно развивались эрозионно-денудационные процессы. Они сформировали расчлененный рельеф коренных осадочных пород.

Основная часть разреза четвертичной толщи сложена гляциально-морскими и морскими отложениями. Континентальный комплекс пород представлен озерно-болотными алевритами с органикой и торфом, песчано-суглинистым аллювием речных террас, склоновыми делювиально-солифлюкционными отложениями и криэлювиальными покровными образованиями. Все эти типы пород формировались на разных уровнях рельефа по мере регрессии полярного бассейна, начиная с конца среднего плейстоцена, в верхнем плейстоцене и голоцене, и испытывали на себе воздействие криогенных факторов.

Климат территории субарктический – холодный, избыточно-влажный. Характерным для климата является превышение осадков над испаряемостью, избыточная влажность воздуха и почвы, большая облачность, сильные ветры зимой, малое количество тепла летом. Лето холодное влажное и короткое, зима умеренно мягкая, снежная, продолжительная. Средняя температура самого теплого месяца не выше 10–12°. Годовое количество осадков 300–400 мм при испаряемости 200–250 мм, показатель увлажнения более 0,60. Примерно 60–65 % составляют зимние осадки, при этом распределение снега чрезвычайно неравномерно из-за метелевого переноса и особенностей рельефа. Снежный покров к концу зимы достигает 60–70 см, продолжительность его залегания около шести месяцев. Континентальность климата возрастает с запада на восток. Средний из абсолютных минимумов температуры воздуха составляет на западе –25°, а на востоке падает до –40° (Гвоздецкий, 1968).

Современные многолетнемерзлые породы распространены примерно до широты Полярного круга, отступая к северу в долине Печоры. Самая общая тенденция изменения мерзлых пород – это увеличение их суровости с юга и юго-запада на север и северо-восток, что в целом соответствует нарастанию жесткости климата в этом направлении (Региональная криолитология, 1989).

В пределах территории преобладают тундровые глеевые и торфяно-болотные почвы верховых болот. Остров Колгуев и прибрежная полоса материка заняты бугристыми болотами и мохово-лишайниковой пятнистой тундрой. Большая часть территории покрыта бугорковыми ерниковыми тундрами, также чередующимися с бугристыми болотами. На юге территории среди тундр появляются древесные породы – береза, лиственница, иногда сосна, ель. Леса из ели и березы в лесотундре занимают около 10% площади. По долинам рек, берегам озер и морскому побережью в лесотундре развиты травянистые луга (Гвоздецкий, 1968).

Сплошные по площади многолетнемерзлые породы развиты в подзоне северной тундры на крайнем северо-востоке. Сквозные талики существуют здесь только под руслами рек и озерами. Мощность мерзлых пород изменяется от 100 до 500 м. Она максимальна на высоких водоразделах и резко сокращается в долинах рек.

В подзоне южной тундры мерзлые породы занимают 60–80 % территории и имеют прерывистое распространение. Наряду со сквозными таликами под крупными реками и озерами широко развиты несквозные талики, в которых кровля многолетнемерзлых пород залегает на глубине 5–20 м. Здесь распространены многолетнемерзлые породы мощностью 50–150 м, которая сокращается до 25 – 30 м в поймах рек, на склонах долин.

В подзоне лесотундры площади, занимаемые многолетнемерзлыми породами, резко сокращаются от 30–40 % на севере подзоны до 25% на юге. Мерзлые породы, залегающие у поверхности, являются современными, поэтому они четко связаны с определенными ландшафтами.

Среди многолетнемерзлых пород наиболее типичны криолититы, представленные гляциально-морскими и морскими отложениями плейстоцена и озерно-болотными отложениями верхнего плейстоцена-голоцена самого разного состава – от торфа, глин, суглинков до песков и галечников. Криолиты представлены полигонально-жильным льдом в озерно-болотных отложениях и пластовыми льдами в верхнеплейстоценовых морских породах (Региональная криолитология, 1989).

До 40–50% поверхности водораздельных депрессий занято озерами. Озерные суглинки и алевриты являются самой льдистой разновидностью минеральных грунтов. Их льдистость равна 40–50%. Текстуры тонкошлировые, частые, слоистые, плетенчатые, сетчатые. С озерно-болотным комплексом также связаны два характерных типа криогенного рельефа: блочно-

полигональный с повторно-жильными льдами (мощность жил изменяется от 1,5 до 2,5 м, ширина – от 0,3 до 1,5 м) и миграционные бугры пучения (выпукло-бугристые торфяники).

Термокарстовые формы рельефа представлены на участках распространения полигональных торфяников, озерно-болотных и в меньшей степени аллювиальных отложений. Наиболее широко термокарст развит в торфяниках. В минеральных грунтах термокарстовых форм меньше (Региональная криолитология, 1989).

Предшествующие исследования. Изучением изменений площади термокарстовых озер на Севере Европейской России занимался ряд исследователей (рисунок 3.1.1). Согласно этим исследованиям в северо-восточной части Европейской России отмечается интенсивное сокращение площади озер (Елсаков, Марущак, 2011; Смирнова с соав., 2013), а в северо-западной – стабильность без заметных изменений (Кравцова, Быстрова, 2009). Увеличения площади озер не отмечается, за исключением единичных случаев в местах техногенного воздействия (Смирнова с соав., 2013). Одни исследователи ссылаются на климатическую природу изменений (Елсаков, Марущак, 2011), отмечая, что ответная реакция криолитозоны на потепление проявляется в интенсивности дренирования термокарстовых озер. Другие указывают на сложность процесса и необходимость учета целого ряда факторов, а также необходимость проведения комплексных исследований на опытных полигонах с привлечением специалистов различного профиля (Смирнова с соав., 2013).

Эталонные участки. С целью детализации результатов уже имеющихся исследований, опробования предложенной методики (см. главу 2) и установления пространственных различий в характере изменения площади озер в районах с разными геокриологическими условиями на территории распространения многолетнемерзлых пород в пределах всей Европейской части России было выбрано 6 эталонных участков (рисунок 3.1.1), в пределах которых были проанализированы многолетние изменения площади озер.

Выбранные эталонные участки (рисунок 3.2.1) расположены в зоне сплошного и островного распространения мерзлоты (рисунок 3.2.2). Они незначительно отличаются друг от друга по характеру распространения озер (таблица 3.2.1).

Практически для всех участков характерна примерно одинаковая плотность озер (1,7 озер на 1 км²). Исключение составили лишь эталонные участки №1 и №5, на которых расположено несколько меньше озер, а плотность распространения озер составляет 0,9 озер на 1 км². Также для всех участков характерна примерно одинаковая озерность около 5%, за исключением эталонного участка №4, охватывающего дельту р. Печоры, с озерностью 9%. В пределах всех эталонных участков преобладают малые и средние озера, крупных озер площадью более 10 га существенно меньше.

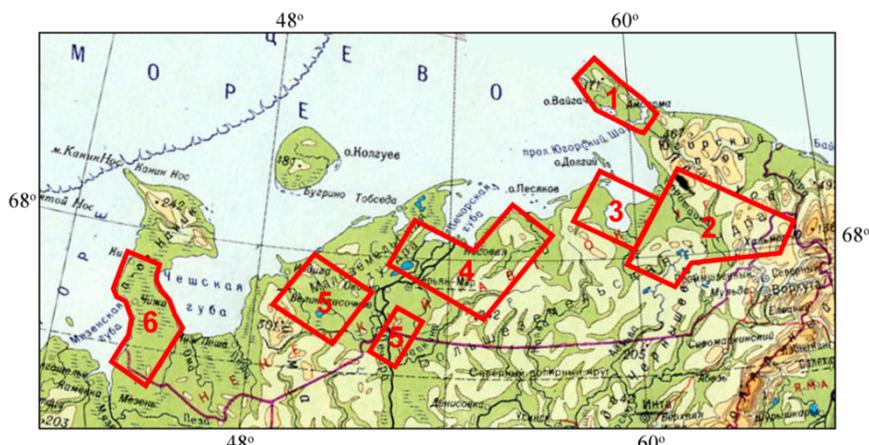


Рисунок 3.2.1. Расположение эталонных участков в Европейской части России: 1 – о. Вайгач; 2 – бассейн р. Кортаиха; 3 – побережье Хайпудырской губы; 4 – низовья р. Печоры; 5 – долина р. Печоры (Малоземельская тундра); 6 – южная часть п-ова Канин

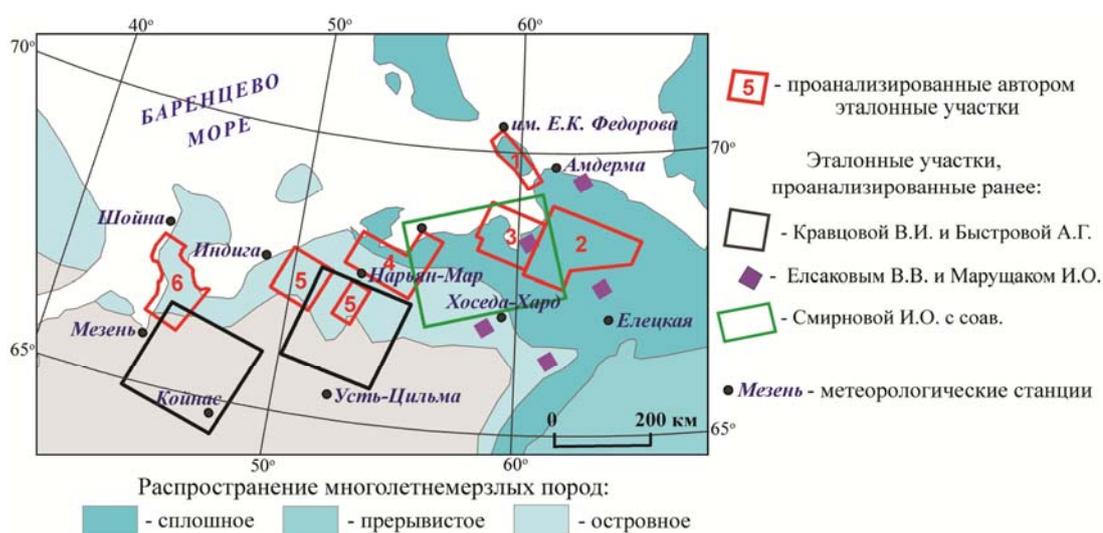


Рисунок 3.2.2. Расположение эталонных участков в Европейской части России

Таблица 3.2.1

Характеристика сети озер эталонных участков
по современным космическим снимкам со спутника Landsat

№ эталонного участка	Площадь участка, км ²	Общее количество озер	Плотность озер*	Общая площадь озер, км ²	Озерность района**, %	Соотношение озер разного размера***
1	3990	3516	0,9	160	4	52% (0,5 га), 42% (10 га), 6% (более 10 га)
2	19291	33436	1,7	751	4	56% (0,5 га), 41% (10 га), 3% (более 10 га)
3	10332	16400	1,6	598	6	55% (0,5 га), 39% (10 га), 6% (более 10 га)
4	12234	19690	1,6	1159	9	58% (0,5 га), 37% (10 га), 5% (более 10 га)
5	10690	9761	0,9	562	5	42% (0,5 га), 49% (10 га), 9% (более 10 га)
6	11230	20960	1,9	609	5	57% (0,5 га), 41% (10 га), 3% (более 10 га)

* - количество озер на 1 км²

** - доля площади водной поверхности озер от общей площади участка

*** - голубой цвет – малые озера (до 0,5 га); синий – средние (от 0,5 га до 10 га); фиолетовый – крупные (более 10 га)

Материалы и методика исследования. В пределах каждого эталонного участка по паре одновременных космических снимков со спутника Landsat (таблица 3.2.2) были проанализированы многолетние изменения площади озер.

Таблица 3.2.2

Космические снимки, использованные для анализа многолетних изменений площади озер

№ эталонного участка	Дата съемки	Съемочная система	Пространственное разрешение, м	Path/Row
1	31 07 1984	Landsat-5 MSS	80	171/011
	20 08 2006	Landsat-5 TM	30	172/011
2	01 08 1986	Landsat-5 TM	30	168/012
	31 07 2009	Landsat-5 TM	30	168/012
3	27 07 1985	Landsat-5 MSS	80	170/012
	07 07 2010	Landsat-5 TM	30	171/012
4	19 07 1973	Landsat-1 MSS	80	188/012
	04 07 2007	Landsat-5 TM	30	174/012
5	02 08 1986	Landsat-5 TM	30	175/013
	25 08 2006	Landsat-5 TM	30	175/013
6	24 07 1975	Landsat-2 MSS	80	194/013
	28 07 2009	Landsat-5 TM	30	179/013

В качестве снимков за первую дату в зависимости от наличия материалов были использованы космические снимки, полученные съемочной системой MSS с пространственным разрешением 80 м и космические снимки, полученные съемочной системой TM с пространственным разрешением 30 м, за вторую дату – снимки, полученные съемочной системой TM с пространственным разрешением 30 м.

Использование космических снимков, полученных съемочной системой MSS, позволяет, как правило, проанализировать изменения площади озер с 1973 года, поэтому этим снимкам при анализе многолетних изменений отдается предпочтение по сравнению с космическими снимками, полученными съемочной системой TM, начавшей свою работу с 1982 года. Лишь при отсутствии требуемых материалов может возникнуть необходимость использовать космические снимки MSS, полученные в 1980-х годах. Такая ситуация в частности возникла при анализе изменений площади озер в пределах эталонных участков №1 и №3 (таблица 3.2.2).

Использование космических снимков со спутника Landsat при изучении динамики термокарстовых озер имеет свои ограничения, накладываемые их пространственным разрешением, особенно при сравнении снимков разного пространственного разрешения (снимков MSS с разрешением 80 м и снимков TM с разрешением 30 м). Использование таких снимков влечет за собой исключение из анализа большого количества малых озер, не отобразившихся на снимках MSS, путем введения пороговых значений (см. разделы 2.5, 2.6). Пороговое значение при сравнении снимков разного пространственного разрешения (снимков

MSS и снимков TM) составляет 2 га, при сравнении снимков одинакового разрешения (снимков TM) – 0,4 га.

Количество и общая площадь проанализированных озер в пределах каждого эталонного участка приводятся в таблице 3.2.3.

Таблица 3.2.3

Характеристика сети озер, проанализированных по современным космическим снимкам со спутника Landsat на эталонных участках

№ эталонного участка	Количество проанализированных озер	% проанализированных озер от их общего количества	Общая площадь проанализированных озер	% общей площади проанализированных озер от общей площади всех озер
1	1581	45	155	97
2	21729	65	740	99
3	2262	14	501	84
4	3236	16	1067	92
5	9761	100	562	100
6	3283	16	511	84

Согласно представленным данным после введения порогового значения из исследования исключается большое количество озер, преимущественно малого и среднего размера. Однако, несмотря на это, общая площадь проанализированных озер изменяется незначительно, потому что в исследовании рассматриваются преимущественно крупные озера, суммарная площадь которых составляет основу общей площади озер.

Анализ многолетних изменений по совмещенным разновременным изображениям, полученным после выполнения дешифрирования озер и введения пороговых значений, был основан на определении изменений (приращения или сокращения) площади каждого конкретного озера, отборе озер с величиной изменения, превышающей величину среднеквадратической погрешности определения площади озер (см. разделы 2.6), визуальном контроле и анализе наблюдаемых изменений. При визуальном контроле из числа изменившихся озер исключались те, чьи изменения визуально не фиксировались на сравниваемых космических снимках, а были, скорее всего, обусловлены погрешностью определения площади озер. Дополнительно на характерные фрагменты эталонных участков были составлены схемы динамики озер, представленные в приложении, позволяющие визуально зафиксировать наблюдаемые изменения. Детально все перечисленные этапы анализа изменений площади озер изложены в разделе 2.7.

Результаты исследования. В результате было определено количество озер, площадь которых уменьшилась, количество озер, площадь которых увеличилась и изменение площади озер в км² (таблица 3.2.4, рисунок 3.2.3). Для удобства сравнения результатов, полученных по эталонным участкам, все показатели были подсчитаны относительно площади эталонных участков и приведены в виде графиков (рисунок 3.2.4, 3.2.5).

Таблица 3.2.4

Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков

№ эталонного участка	Площадь участка, км ²	Количество уменьшившихся озер	Изменение площади уменьшившихся озер, км ²	Количество увеличившихся озер	Изменение площади увеличившихся озер, км ²
1	3990	11	-2,4	0	+0
2	19291	918	-26	12	+0,2
3	10332	103	-16	4	+0,4
4	12234	114	-11	105	+28
5	10690	96	-3,9	23	+0,5
6	11230	35	-10	0	+0



Рисунок 3.2.3. Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков

Изменение площади озер относительно площади эталонного участка, %

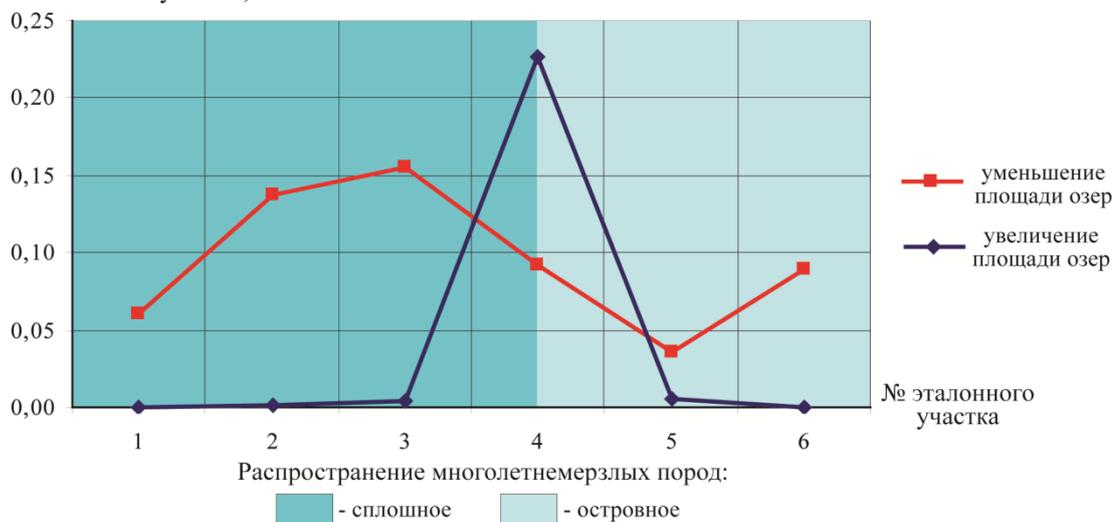


Рисунок 3.2.4. Изменение площади озер относительно площади эталонных участков

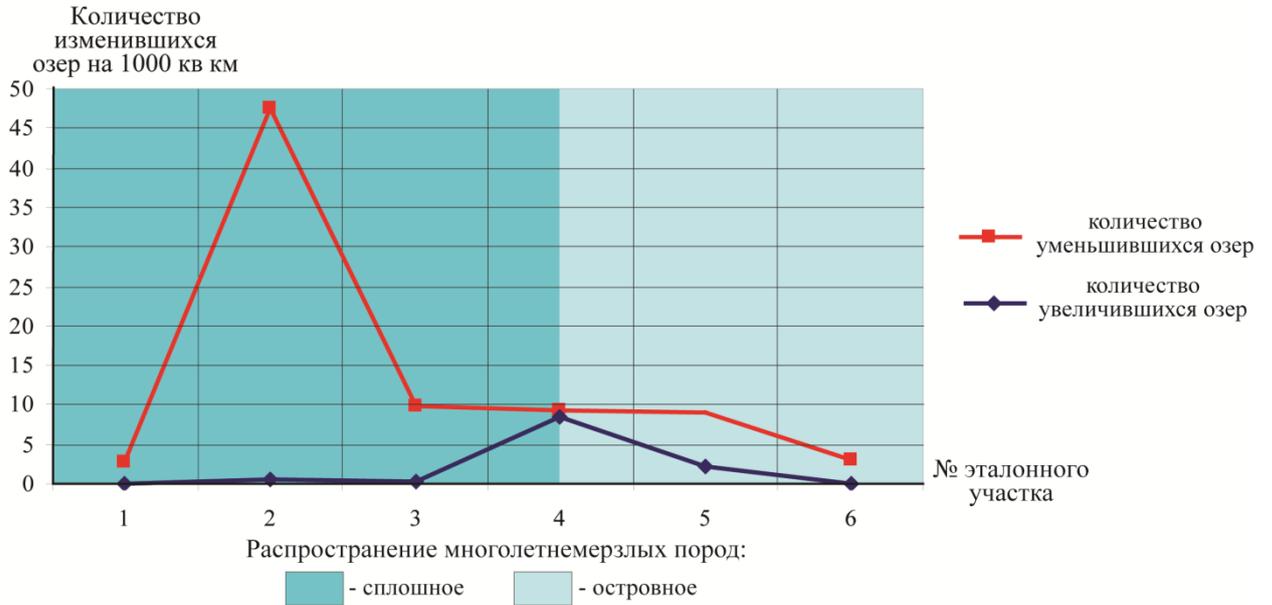


Рисунок 3.2.5. Количество изменившихся озер в пределах эталонных участков

Согласно полученным результатам на севере Европейской части России отмечается преимущественное сокращение площади озер. Наиболее сильное сокращение, как по количеству уменьшившихся озер (до 50 озер на 1000 км²), так и по величине изменения (до 0,15% площади эталонного участка) выявлено в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород в северо-восточной части рассматриваемого региона – в пределах эталонных участков №2 (в долине р. Коротаиха) и №3 (на побережье Хайпудырской губы) (рисунок 3.2.6, приложение: стр. 5–8).

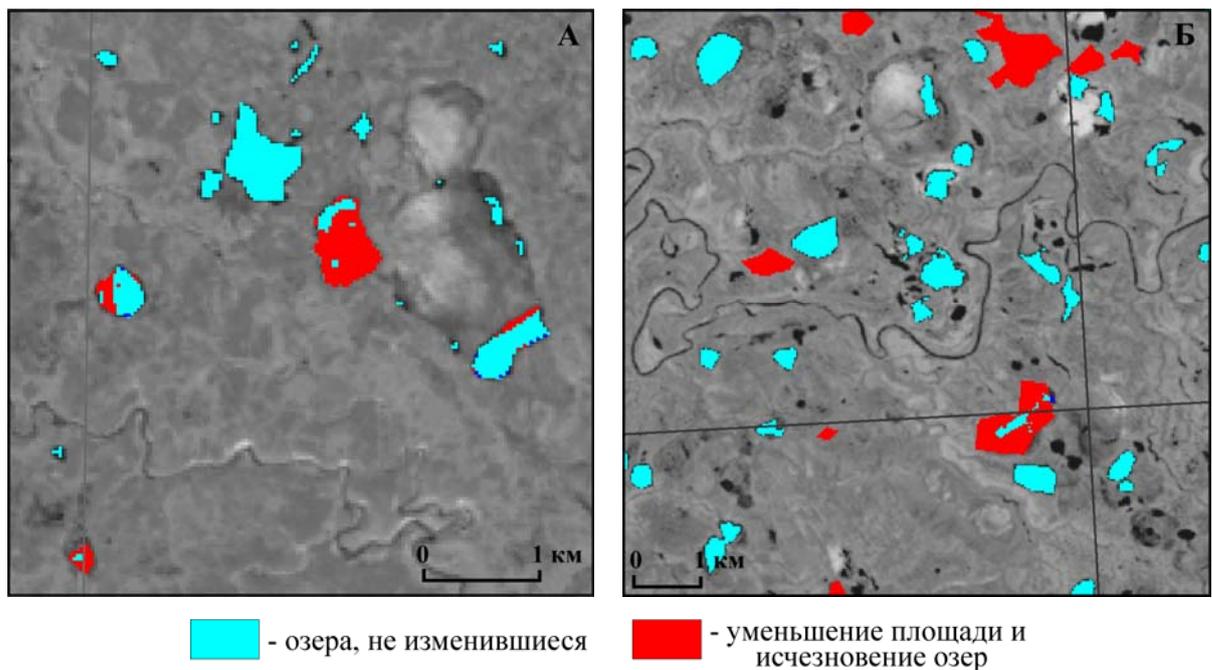


Рисунок 3.2.6. Фрагменты эталонных участков: А - №2 (1986 – 2009 гг.), Б - №3 (1985 – 2010 гг.)

Интенсивное сокращение площади озер здесь отмечается и другими исследователями (Елсаков, Марущак, 2011; Смирнова с соав., 2013). На первый взгляд, казалось бы, выявляется связь динамики озер с характером распространения ММП – более значительное сокращение их площади и количества в зоне сплошного распространения мерзлоты. Однако анализ ситуации на этих эталонных участках показывает, что сокращение озер, как правило, наблюдается вблизи водотоков и реальной причиной сокращения площади озер является эрозионная деятельность рек, спуск озер небольшими речками. В отдельных случаях в качестве причины сокращения площади озер рассматривается зарастание водоемов.

Разнонаправленные изменения площади озер отмечаются в низовьях р. Печоры в пределах эталонного участка №4: в восточной части участка расположено большое количество озер (114 озер), у которых площадь сократилась (рисунок 3.2.7-А, приложение: стр. 9, 10), а в западной – большое количество озер (105 озер), у которых площадь увеличилась (рисунок 3.2.7-Б, приложение: стр. 11, 12). Это единственный участок в этом районе, на котором отмечается увеличение площади озер. Увеличившиеся озера расположены в западной части эталонного участка – в дельте реки Печоры и соединены между собой водотоками. Как показали более поздние снимки, этим озерам свойственна межгодовая динамика: в отдельные годы площадь озер увеличивается, а в другие – уменьшается. Такая межгодовая динамика, скорее всего, обусловлена различиями сезонных условий в разные годы, а распределение воды зависит от захваченной съемкой фазы спада половодья на реке и многочисленных водотоках.

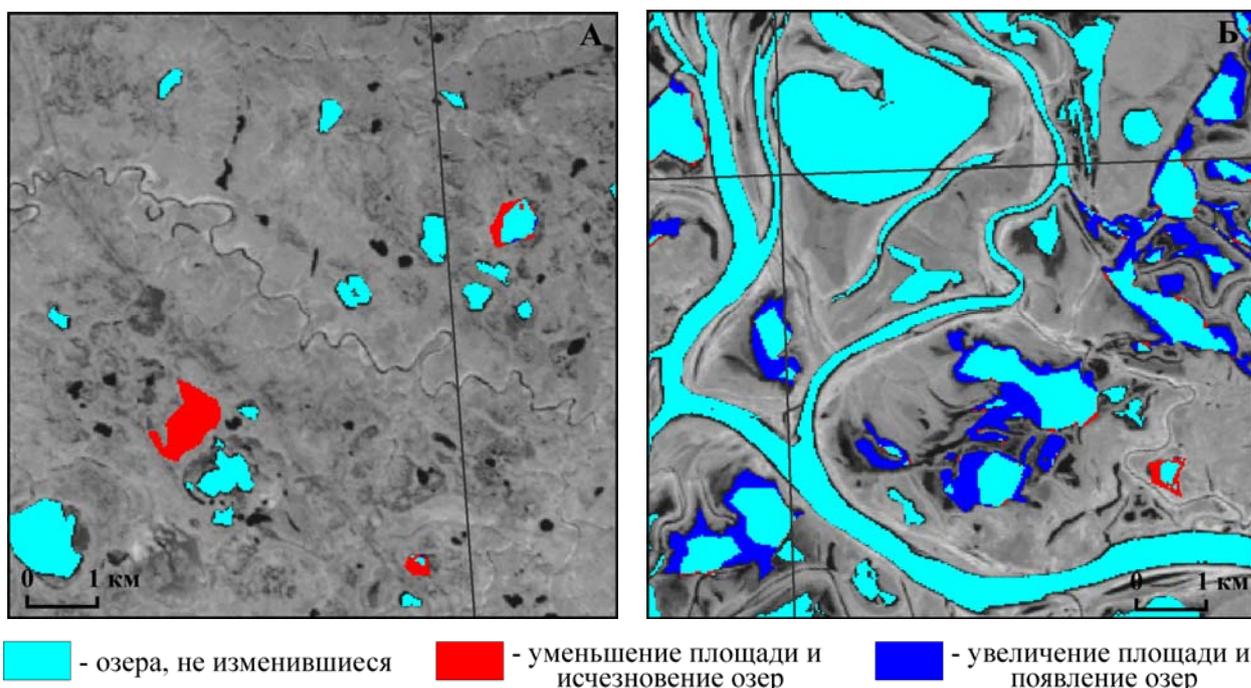


Рисунок 3.2.7. Фрагменты эталонного участка №4 (1973 – 2007 гг.)

На остальных эталонных участках наблюдается меньшее количество изменившихся озер (до 5 озер на 1000 км²) (на о. Вайгач в пределах эталонного участка №1 и в южной части п-ова

Канин в пределах участка №6) и меньшая величина изменения площади озер (до 0,05% эталонного участка) (на юго-западе Малоземельской тундры в пределах эталонного участка №5) (рисунок 3.2.4, 3.2.5). Однако аналогично рассмотренным выше участкам преобладает процесс сокращения площади озер. Спущенные озера распределены неравномерно в пределах всех рассматриваемых участков (приложение: стр. 3, 4, 13–16). Они локализованы в непосредственной близости от водотоков и могли быть спущены в результате эрозионной деятельности рек.

Таким образом, для Севера Европейской России характерна относительно невысокая динамичность термокарстовых озер с преобладанием их сокращения, как по площади (составляющего до 0,15% исследованного участка), так и по количеству уменьшившихся озер (до 50 озер на 1000 км²). Увеличение площади и количества озер наблюдается лишь на участке, расположенном в дельте Печоры и связано с гидрологическим режимом водотоков дельты. Различия в показателях динамики озер в зонах сплошного и прерывистого распространения ММП, ранее отмечавшиеся в исследованиях В.В. Елсакова и И.О. Марущака (2011) и подтвердившиеся на наших эталонных участках, неправильно связывать непосредственно с реакцией ММП на потепление, поскольку изменения термокарстовых озер в большинстве случаев здесь вызваны гидрологическими причинами, деятельностью водотоков и зарастанием озер. Влияние потепления климата на эти процессы возможно, однако требует дополнительных исследований.

3.3. Западная Сибирь

Природные особенности района. На территории Западной Сибири выделяют три зоны распространения многолетнемерзлых пород: сплошного, прерывистого и островного (рисунок 3.3.1). Они отличаются друг от друга не только слитностью многолетней мерзлоты, но и рядом других физико-географических условий.

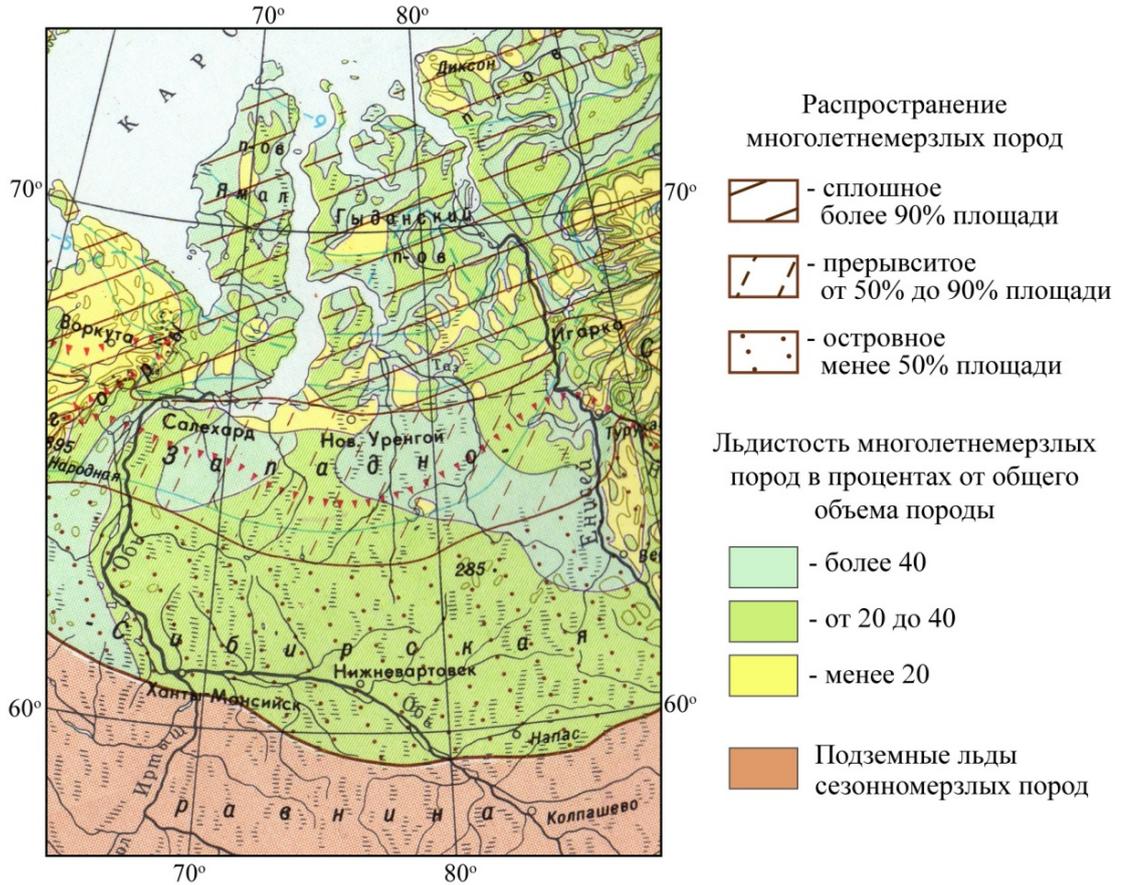


Рисунок 3.3.1. Распространение многолетнемерзлых пород на территории Западной Сибири (фрагмент карты “Подземные льды” из Атласа снежно-ледовых ресурсов Мира, 1997)

Зона островного распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири занимает территорию, ограниченную с юга долиной реки Оби, а с севера – южным склоном Сибирских Увалов. На западе территория ограничена возвышенностью Белогорский материк (с абсолютными отметками до 200 м), простирающейся с севера на юг вдоль правого берега реки Оби, на востоке – Верхнетазовской возвышенностью (с абсолютными отметками высот до 250 м).

Большая часть территории занята Среднеобской низменностью, которая занимает отрицательную опущенную морфоструктуру с абсолютными отметками высот менее 70 м (Атлас Тюменской области, 1971). Территория представляет собой долины с комплексом террас и равнинами, которые покрыты четвертичными озерно-аллювиальными и аллювиальными отложениями, представленными суглинками, супесями и песками с растительными остатками и торфом. Углы наклона поверхности не превышают $0,5^\circ$, лишь в пределах возвышенностей и

Аганского увала углы наклона возрастают до $1,5^\circ$. Территория характеризуется слабой густотой и глубиной (менее 5 м) расчленения рельефа. Показатели годового стока здесь несколько ниже (225–250 мм (1 мм слоя стока соответствует $0,032$ л/сек с км^2)), нежели в более северных регионах. Отмечается увеличение годового стока с запада на восток.

На территории отсутствует современная многолетняя мерзлота, характерно глубокое залегание древней вечной мерзлоты. Лишь на северо-востоке встречаются участки разобщенного залегания современной и древней мерзлоты. Температура грунтов колеблется от 0°C до $-0,5^\circ\text{C}$. Имеющиеся участки современной мерзлоты представлены эпигенетически промерзшими криолититами (Атлас Тюменской области, 1971), имеющими массивную и слоистую толстошлировую криогенную текстуру, образуемую льдом-цементом и миграционным льдом. Большая же часть территории, где отсутствует современная мерзлота, подвержена лишь сезонному промерзанию.

По сравнению с более северными регионами для зоны островного распространения мерзлоты характерно достаточно большое количество осадков и более высокие температуры воздуха. Годовое количество осадков увеличивается с запада на восток и варьирует от 450 до 550 мм. Средняя температура июля составляет 16°C , а средняя температура января -22°C . Высота снежного покрова 60–70 см. Для района характерны достаточно высокие показатели испарения (около 550 мм), однако, несмотря на это, он характеризуется избыточным увлажнением и пониженной теплообеспеченностью.

Территория расположена в зоне средней тайги, однако большая ее часть занята болотами, преимущественно микстотрофными и мезотрофными (переходными). Среди болотных ландшафтов встречается большое количество реликтовых термокарстовых озер. Среди болот и озер практически повсеместно распространены неглубокие залежи торфа. Леса (сосновые с лиственницей, местами кедром, лишайниковые и лишайниково-брусничные) и редколесья встречаются лишь в районах возвышенностей.

Зона прерывистого распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири ограничена с юга Северным склоном Сибирских Увалов и простирается на север вплоть до широты полярного круга. На востоке территория ограничена Нижнеенисейской возвышенностью. В пределах зоны расположены долины таких крупных рек, как Обь, Надым, Пур и Таз. Абсолютные отметки высот по долинам рек не превышают 50 м. Более высокие абсолютные отметки отмечаются в междуречьях рек (до 100 м и более) и на Полуийской возвышенности (до 200 м).

Долины рек расположены в пределах отрицательных опущенных морфоструктур, междуречья – в пределах отрицательных морфоструктур, вовлеченных в поднятие, а Полуийская возвышенность – в пределах слабо поднятой положительной морфоструктуры. Долины рек

сложены четвертичными озерно-аллювиальными и аллювиальными отложениями, представленными суглинками, супесями и песками с прослоями погребенных почв и линзами торфа. Междуречья и возвышенность представляют собой сильно переработанные денудацией морские равнины, сложенные морскими и ледниково-морскими отложениями (глинами, суглинками, супесями и песками с валунами, галькой и гравием). Территория характеризуется большими показателями расчленения рельефа, нежели более южные районы зоны островного распространения мерзлоты. Для района характерна средняя и значительная (особенно в западной и восточной частях) густота расчленения рельефа. Глубина расчленения рельефа варьирует от 5 до 25 м, а в западных и восточной частях достигает 50 м. Показатели годового стока здесь также выше и составляют 250–300 мм (1 мм слоя стока соответствует 0,032 л/сек с км²).

Для района характерно разобщенное залегание современной и древней мерзлоты с островами сквозных таликов. Температура грунтов колеблется от 0°С до –1°С. Современная мерзлота представлена главным образом эпигенетически промерзшими криолититами, имеющими массивную, крупносетчатую и крупнослоистую толстошлировую криогенную текстуру, образуемую льдом-цементом и миграционным льдом. По долинам рек встречаются также сингенетически промерзшие криолититы, имеющие массивную криогенную текстуру, образуемую льдом-цементом.

Количество осадков и температуры воздуха в данном регионе немного ниже, нежели в зоне островного распространения мерзлоты. Годовое количество осадков уменьшается с юга на север от 500 до 400 мм. Средняя температура июля составляет 15°С, а средняя температура января –24°С. Высота снежного покрова увеличивается с запада на восток от 60 до 70 см. Показатели испарения также несколько ниже и составляют около 500 мм. В общем территория характеризуется весьма избыточным увлажнением и пониженной теплообеспеченностью.

Территория расположена в зоне северной тайги, однако, как и в предыдущем регионе, лесом (редкостойным сосново-лиственничным, местами сосновым с кедром и лиственницей, лишайниковым с участками кустарничково-зеленомошного) и редколесьями занята незначительная часть, преимущественно в районе возвышенностей на западе и востоке региона. В центральной же части региона в основном развиты торфяные комплексные мезо-олиготрофные болота с мерзлотным мезо-микрорельефом и распространены неглубокие вечномерзлые залежи торфа.

Зона сплошного распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири простирается к северу от полярного круга вплоть до Северного Ледовитого океана и охватывает полуостров Ямал, Гыданский и Тазовский полуостров. Большая часть территории занята низменными плоскими морскими равнинами с абсолютными отметками высот до 50 м. Эти

низменные равнины лежат в пределах отрицательных опущенных морфоструктур и сложены преимущественно морскими отложениями (глинами, суглинками, супесями, песками с растительными остатками). Помимо морских отложений, вдоль рек распространены песчаные аллювиальные, а по побережью – суглинистые лайдовые отложения (особенно в центральной и восточной части Ямала, на северо-западе Гыданского полуострова). Встречаются также локальные возвышенные участки, представляющие собой приподнятые сильно переработанные денудацией морские равнины, сложенные морскими и ледниково-морскими отложениями (глинами, суглинками, супесями, песками с валунами, галькой и гравием). Такие участки с абсолютными отметками высот до 100 м в пределах отрицательных, но вовлеченных в поднятие морфоструктур расположены в центральной части южного и северного Ямала, в западной части Тазовского полуострова. Более высокие участки с абсолютными отметками до 150 м в пределах положительных морфоструктур расположены на западе (Юрибейская гряда) и в центральной части (Гыданская гряда) Гыданского полуострова. Для района характерна сильная и очень сильная (в пределах Юрибейской и Гыданской гряд) густота расчленения рельефа. Глубина расчленения рельефа также варьирует от 5 до 25 м, местами до 50 м, в зависимости от занимаемой территории.

Для района характерно слитное залегание мощной современной и древней вечной мерзлоты. Температура грунтов уменьшается с юга на север от -1°C до -9°C . На большей части территории (в пределах низменных плоских равнин) мерзлота представлена эпигенетически промерзшими криолититами с массивной криогенной текстурой, образуемой льдом-цементом. На приподнятых равнинах развиты эпигенетически промерзшие криолититы с мелкосетчатой и мелкослоистой тонкошлировой криогенной текстурой, образуемой миграционным льдом (Атлас Тюменской области, 1971). По долинам рек распространены эпигенетически и сингенетически промерзшие полигонально-жильные льды (растущие и реликтовые) в сочетании с сетчатой и слоистой криогенной текстурой. Наибольшее количество реликтовых полигонально-жильных льдов встречается на территории Тазовского полуострова. На территории полуострова Ямал и Гыданского полуострова отмечается также наличие ледяных пластовых тел (замерзших водоносных горизонтов).

Годовое количество осадков в данном регионе уменьшается с юга на север от 400 до 300 мм и менее. Средняя температура июля также уменьшается с юга на север (от 13°C до 5°C), однако изменения происходят неодинаково: в восточной части (в пределах Гыданского и Тазовского полуостровов) отмечаются более высокие температуры, нежели на той же широте в пределах полуострова Ямал. А уменьшение средней температуры января в меридиональном направлении наблюдается также с запада на восток (от -22°C на западе полуострова Ямал до -27°C на

востоке Гыданского полуострова). Таким образом, в районе Гыданского полуострова летом теплее, а зимой холоднее, нежели в районе полуострова Ямал на одной и той же широте. Регион относится к зоне недостаточной теплообеспеченности и весьма избыточного увлажнения.

Территория расположена в зоне тундры и представляет собой безлесные, преимущественно незаболоченные пространства, занятые кустарниковой и кустарничковой, а в северной части – и лишайниковой растительностью. Болота, как правило, минеральные и торфяно-минеральные эвтрофные, имеют локальный характер распространения, приурочены к долинам рек. Залежи торфа отсутствуют.

На всей территории распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири отмечается повышение температуры воздуха в последнее десятилетие (2000-2010 гг) относительно нормы (среднего значения за 1961-1990 гг) более чем на 1°C (Малкова, Павлов, 2012). Более высокий тренд увеличения температуры воздуха (см. рисунок 3.2) отмечается в зоне островного распространения мерзлоты и в западной части зоны прерывистого распространения мерзлоты. Более низкие показатели отмечаются в зоне сплошной мерзлоты, однако эти показатели намного выше по сравнению с другими северными регионами России.

Согласно карте метеогеокриологического риска под воздействием современных климатических изменений (см. рисунок 3.1.3) северная часть Западной Сибири в зоне сплошного распространения мерзлоты попадает в область высокого метеогеокриологического риска. Здесь отмечается максимальный риск и отепляющее влияние на мерзлые толщи климатических параметров (Малкова, Павлов, 2012).

Помимо возможного влияния наблюдаемого потепления климата на активизацию термокарстовых процессов, следует также учитывать влияние антропогенной деятельности. На территории Западной Сибири расположено большое количество нефтегазовых месторождений (рисунок 3.3.2). Большая часть разрабатываемых месторождений и действующих трубопроводов расположена в зоне островного и в восточной части зоны прерывистого распространения мерзлоты. Для удобства ориентирования дополнительно на карту были нанесены эталонные участки, проанализированные в исследовании, речь о которых пойдет далее. Забегая вперед, отметим, что наиболее активная хозяйственная деятельность отмечается на территории эталонных участков №2, №8, №9 и №11.

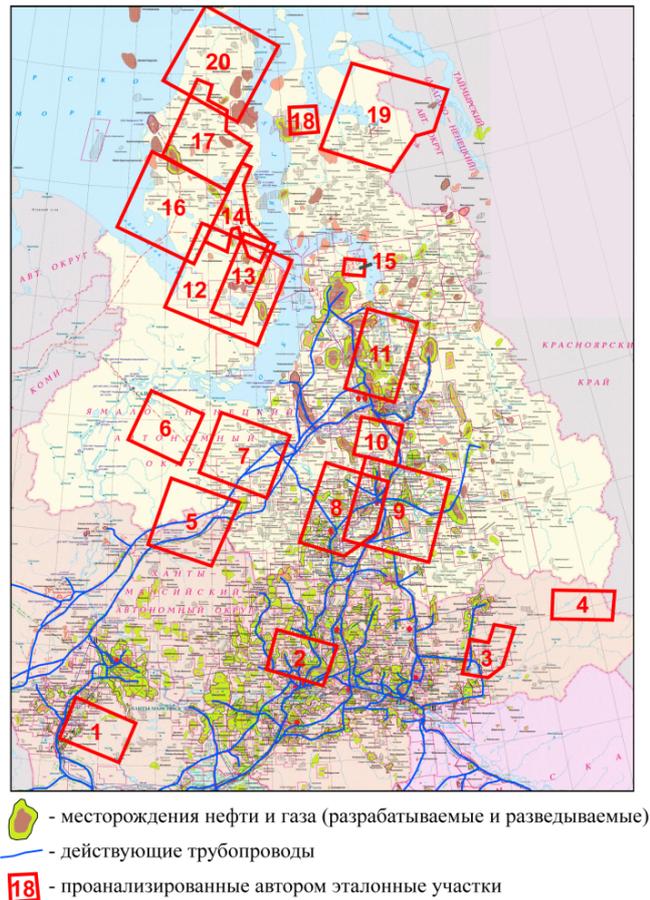


Рисунок 3.3.2. Расположение месторождений и трубопроводов нефти и газа

Предшествующие исследования. На территории Западной Сибири работы по изучению динамики озер проводились многими исследователями (Smith et al, 2005; Кирпотин с соавт., 2008; Днепровская, Полищук, 2008; Брыксина с соавт., 2009; Кравцова, Быстрова, 2009; Кравцова, Тарасенко, 2010), однако результаты этих исследований далеко не одинаковы. По данным американских и западносибирских исследователей (Smith et al, 2005; Брыксина с соавт., 2009) в зоне сплошной многолетней мерзлоты севернее 70° с.ш. площади озер увеличиваются, а в зоне прерывистой многолетней мерзлоты – сокращаются, что не соответствует результатам, полученным специалистами МГУ (Кравцова, Быстрова, 2009; Кравцова, Тарасенко, 2010). Согласно последним наблюдается сокращение площади озер как в зоне прерывистой, так и в зоне сплошной многолетней мерзлоты.

Эталонные участки. Расхождения в результатах ранее проведенных работ потребовали дополнительного исследования, цель которого – выявление действительного характера изменений площади озер и установление причин наблюдаемых расхождений. Для этого в пределах Западной Сибири было выбрано 20 эталонных участков (рисунок 3.3.3, 3.3.4), 10 из которых расположено в области сплошного, 6 – в области прерывистого, 3 – в области островного распространения мерзлоты и 1 – вне области распространения многолетнемерзлых пород. Размеры эталонных участков от 31×46 км до 169×169 км.



Рисунок 3.3.3. Расположение эталонных участков на территории Западной Сибири

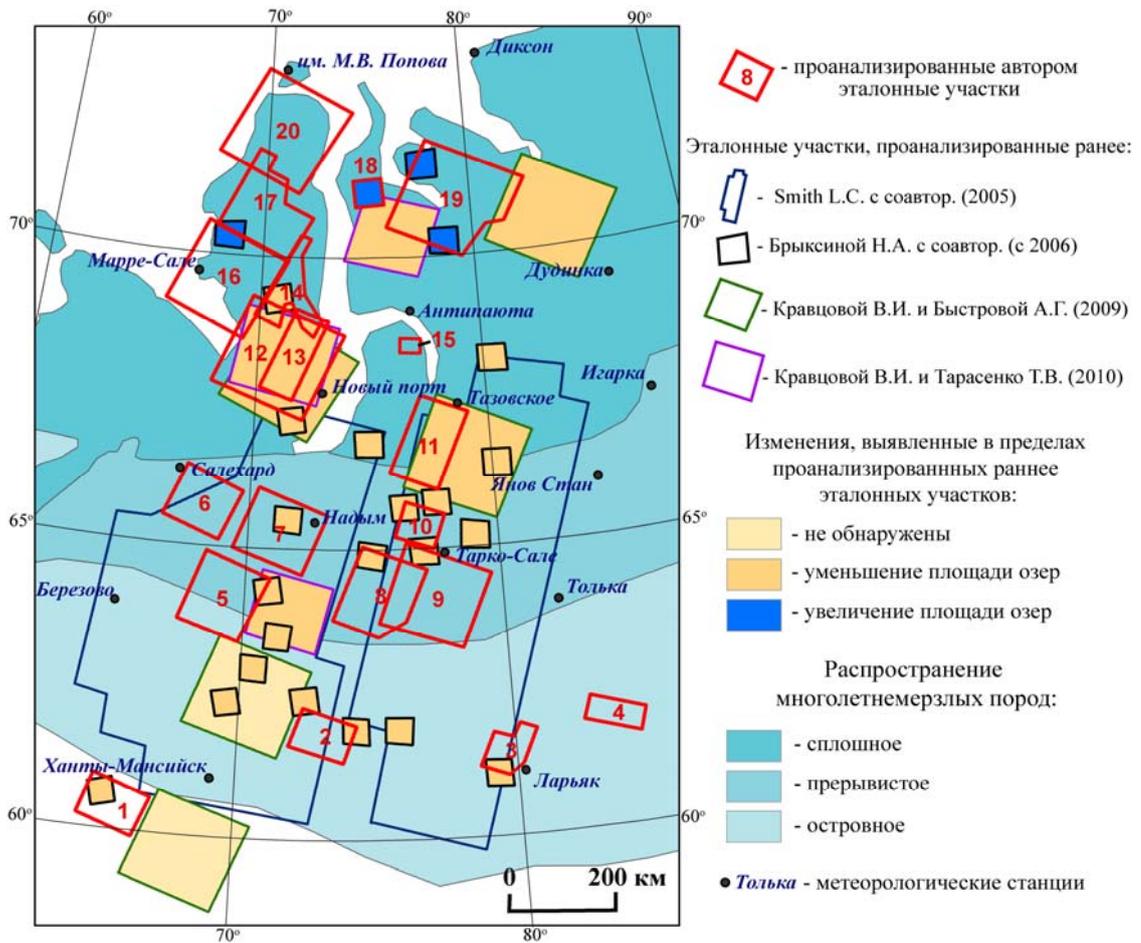


Рисунок 3.3.4. Расположение эталонных участков на территории Западной Сибири

Выбранные эталонные участки частично, а некоторые и полностью перекрывают ранее рассмотренные другими исследователями тестовые участки. Особый интерес с точки зрения поставленной цели представляют эталонные участки, расположенные севернее 70° с.ш. на территории п-ова Ямал и Гыдан (№ 16, 17, 18 и 19), перекрывающие тестовые участки, в пределах которых было выявлено увеличение площади озер Брыксиной Н.А. с соавторами (рисунок 3.3.4). Выбранные эталонные участки отличаются друг от друга по площади и количеству озер, а также по соотношению озер разного размера (таблица 3.3.1).

Таблица 3.3.1

**Характеристика сети озер эталонных участков
по современным космическим снимкам со спутника Landsat**

№ эталонного участка	Площадь участка, км ²	Общее количество озер	Плотность озер*	Общая площадь озер, км ²	Озерность района**, %	Соотношение озер разного размера***
1	9755	6915	0,7	1235	13	
Зона островного распространения многолетнемерзлых пород						
2	8252	58014	7,0	2015	24	
3	6018	13165	2,2	689	11	
4	5070	44495	8,8	618	12	
Зона прерывистого распространения многолетнемерзлых пород						
5	17497	23309	1,3	627	4	
6	12126	32193	2,7	797	7	
7	17395	31810	1,8	848	5	
8	18769	52039	2,8	1525	8	
9	26063	100687	3,9	3376	13	
10	5294	9261	1,7	473	9	
Зона сплошного распространения многолетнемерзлых пород						
11	14848	36174	2,4	1431	10	
12	32815	89590	2,7	5084	15	
13	10401	28393	2,7	2238	22	
14	9071	18640	2,1	1554	17	
15	1003	2039	2,0	130	13	
16	27325	37345	1,4	1875	7	
17	17645	22472	1,3	1021	6	
18	2537	4956	2,0	278	11	
19	31293	41894	1,3	3232	10	
20	29680	30657	1,0	770	3	

* - количество озер на 1 км²

** - доля площади водной поверхности озер от общей площади участка

*** - голубой цвет – малые озера (до 0,5 га); синий – средние (от 0,5 га до 10 га); фиолетовый – крупные (более 10 га)

Однако, несмотря на имеющиеся различия характеристик озер, в распределении озер прослеживаются общие черты. На всех эталонных участках преобладают малые озера площадью менее 0,5 га, которые, как правило, составляют больше половины всех имеющихся озер. По сравнению с количеством малых озер, число крупных озер площадью более 10 га существенно меньше. Однако именно крупные озера определяют озерность эталонных участков.

Материалы и методика исследования. В пределах каждого эталонного участка были проанализированы многолетние изменения площади озер по паре разновременных космических снимков со спутника Landsat (таблица 3.3.2).

Таблица 3.3.2

Космические снимки, использованные для анализа многолетних изменений площади озер

№ эталонного участка	Дата съемки	Съемочная система	Пространственное разрешение, м	Path/Row
1	18 06 1973	Landsat-1 MSS	80	175/018
	12 08 2011	Landsat-5 TM	30	162/018
2	13 06 1973	Landsat-1 MSS	80	170/017
	22 09 2007	Landsat-5 TM	30	158/017
3	27 06 1973	Landsat-1 MSS	80	166/017
	14 09 2011	Landsat-5 TM	30	153/017
4	17 08 1973	Landsat-1 MSS	80	163/017
	21 09 2007	Landsat-5 TM	30	151/017
5	11 08 1973	Landsat-1 MSS	80	175/015
	03 07 2002	Landsat-7 ETM+	30	161/015
6	12 08 1973	Landsat-1 MSS	80	176/014
	04 09 2011	Landsat-5 TM	30	163/014
7	17 06 1973	Landsat-1 MSS	80	174/014
	14 07 2009	Landsat-5 TM	30	161/014
8	24 08 1973	Landsat-1 MSS	80	170/015
	22 09 2007	Landsat-5 TM	30	158/015
9	23 08 1973	Landsat-1 MSS	80	169/015
	05 09 2006	Landsat-5 TM	30	156/015
10	24 08 1973	Landsat-1 MSS	80	170/014
	18 07 2009	Landsat-5 TM	30	157/014
11	24 08 1973	Landsat-1 MSS	80	170/013
	26 08 2009	Landsat-5 TM	30	158/013
12	03 07 1994	Landsat-5 TM	30	163/012
	28 07 2009	Landsat-5 TM	30	163/012
13	11 08 1973	Landsat-1 MSS	80	175/012
	08 07 2010	Landsat-5 TM	30	162/012
14	02 08 1988	Landsat-4 TM	30	164/011
	18 08 1988	Landsat-4 TM	30	164/011
	11 09 2011	Landsat-5 TM	30	164/011
15	21 07 1973	Landsat-1 MSS	80	172/012
	15 07 2006	Landsat-5 TM	30	160/012
16	31 07 1988	Landsat-4 TM	30	166/011
	10 08 2003	Landsat-7 ETM+	30	166/011
17	31 07 1988	Landsat-4 TM	30	166/010
	10 08 2003	Landsat-7 ETM+	30	166/010
18	26 07 1985	Landsat-5 TM	30	163/010
	08 08 2001	Landsat-5 TM	30	162/010
19	06 08 1988	Landsat-4 TM	30	160/010
	31 07 2006	Landsat-5 TM	30	160/010
20	20 07 1990	Landsat-5 TM	30	167/009
	25 08 2009	Landsat-5 TM	30	167/009

В качестве основных материалов за первую дату были использованы космические снимки, полученные съемочной системой MSS, что позволило проанализировать изменения площади озер с 1973 года. При отсутствии таких снимков были использованы снимки, полученные съемочной системой TM, что несколько сократило рассматриваемый временной интервал, так как эта съемочная система начала свою работу лишь с 1982 года.

Несмотря на более длительный рассматриваемый временной интервал, сравнение разновременных космических снимков разного пространственного разрешения (в нашем случае, снимков полученных съемочными системами MSS и TM) требует исключения из анализа большого количества малых озер площадью менее 2 га (см. разделы 2.5 и 2.6). При сравнении космических снимков одинакового разрешения исключены из анализа озера площадью менее 0,4 га.

В результате исключения из анализа озер малого размера количество и общая площадь проанализированных озер в пределах каждого эталонного участка (таблица 3.3.3) становится несколько меньше по сравнению с общим количеством и общей площадью всех выделенных озер (таблица 3.3.1).

Таблица 3.3.3

Характеристика сети озер, проанализированных по современным космическим снимкам со спутника Landsat на эталонных участках

№ эталонного участка	Количество проанализированных озер	% проанализированных озер от их общего количества	Общая площадь проанализированных озер	% общей площади проанализированных озер от общей площади всех озер
1	1165	17	1217	99
2	3006	5	1752	87
3	910	7	637	92
4	1838	4	421	68
5	1719	7	515	82
6	2920	9	620	78
7	4586	14	681	80
8	8328	16	1304	86
9	10359	10	2862	85
10	1554	17	424	90
11	5178	14	1232	86
12	61776	69	5059	100
13	6015	21	2078	93
14	14677	79	1550	100
15	586	29	124	95
16	33347	89	1872	100
17	16209	72	1015	99
18	2897	58	276	99
19	29881	71	3221	100
20	22455	73	763	99

После исключения из анализа малых озер проводилось определение площади каждого отдельного озера и отбор озер с величиной изменения, превышающей величину среднеквадратического погрешности определения площади озер по снимкам со спутника Landsat (см. разделы 2.6 и 2.7). Для проверки наблюдаемых изменений проводился визуальный контроль, а на характерные фрагменты эталонных участков составлялись схемы динамики озер, представленные в приложении.

Результаты исследования. В результате было определено количество озер, площадь которых уменьшилась, количество озер, площадь которых увеличилась и изменение площади озер в км² (таблица 3.3.4, рисунок 3.3.5). Все показатели были подсчитаны также относительно площади эталонных участков и приведены в виде графиков (рисунок 3.3.6, 3.3.7).

Согласно полученным данным в пределах эталонных участков на территории Западной Сибири наблюдаются процессы как увеличения, так и уменьшения площади озер. Однако уменьшение существенно преобладает над увеличением как по количеству изменившихся озер, так и по величине изменения площади озер.

Таблица 3.3.4

Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков

№ эталонного участка	Площадь участка, км ²	Количество уменьшившихся озер	Изменение площади уменьшившихся озер, км ²	Количество увеличившихся озер	Изменение площади увеличившихся озер, км ²
1	9755	14	-20	1	+0,1
2	8252	10	-12	75	+15
3	6018	12	-47	3	+1
4	5070	3	-0,1	3	+0,4
5	17497	16	-7	5	+1
6	12126	105	-31	4	+1
7	17395	300	-53	21	+2
8	18769	268	-69	14	+2
9	26063	283	-101	20	+5
10	5294	74	-26	10	+4
11	14848	270	-67	31	+7
12	32815	1651	-205	22	+1
13	10401	225	-49	83	+31
14	9071	363	-92	79	+7
15	1003	26	-14	4	+1
16	27325	455	-51	10	+1
17	17645	200	-16	10	+2
18	2537	17	-5	15	+1,5
19	31293	329	-29	112	+17
20	29680	183	-24	27	1

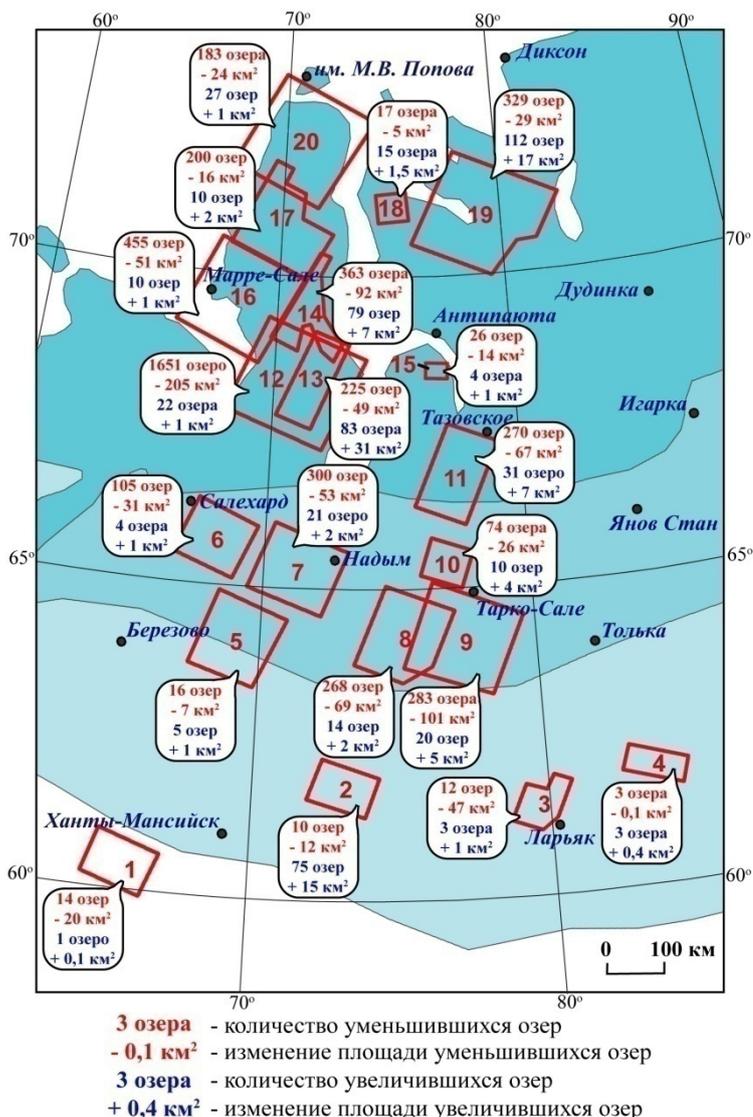


Рисунок 3.3.5. Изменения площади озера, выявленные в пределах эталонных участков



Рисунок 3.3.6. Изменение площади озера относительно площади эталонных участков

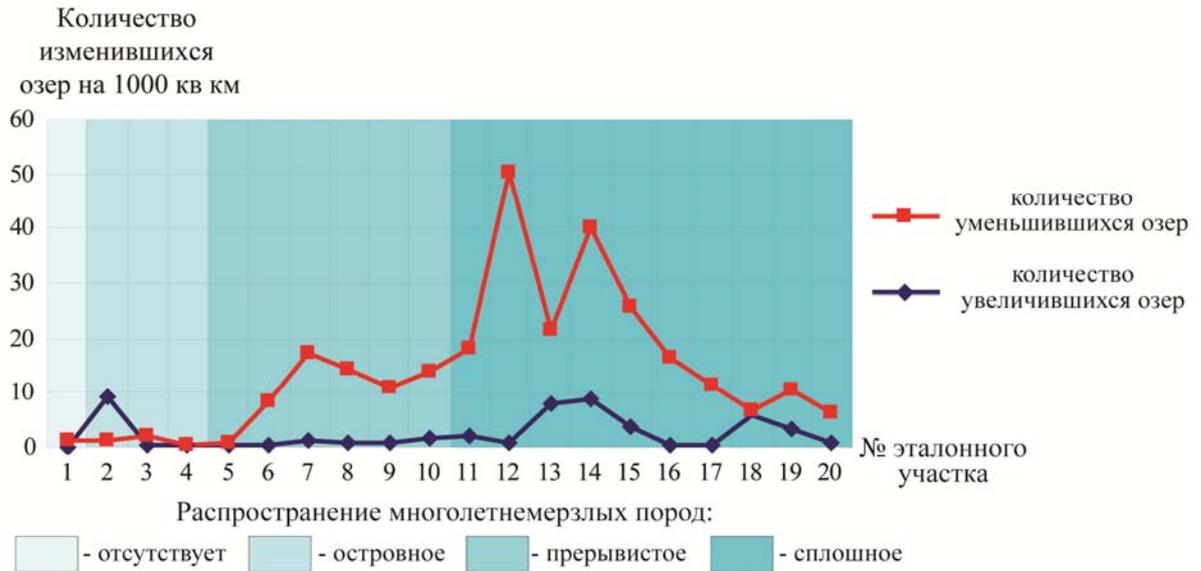
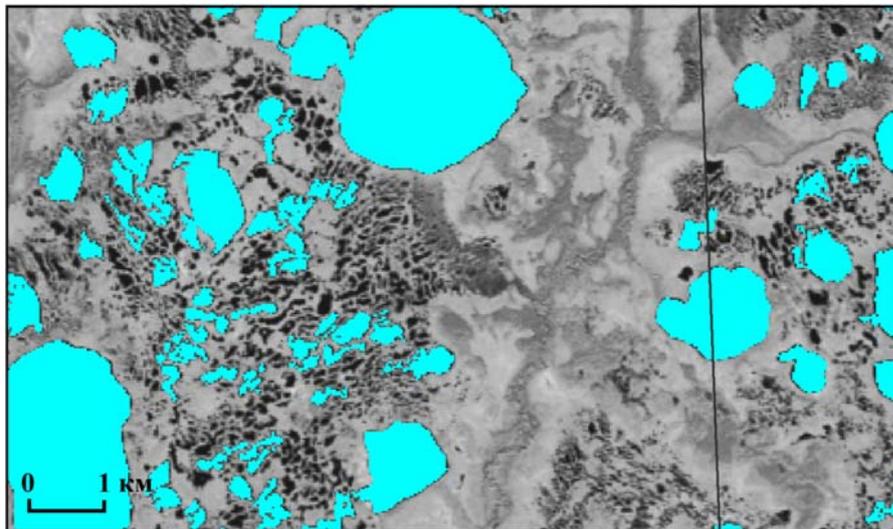


Рисунок 3.3.7. Количество изменившихся озер в пределах эталонных участков

Более детально изменения площади озер были рассмотрены в региональном аспекте в зависимости от особенностей распространения многолетнемерзлых пород.

В пределах зоны островного распространения многолетней мерзлоты, охватывающей южные склоны Сибирских Увалов, где распространены в основном реликтовые термокарстовые озера, количество изменившихся озер существенно меньше, нежели в областях прерывистого и сплошного распространения мерзлоты (рисунок 3.3.5, 3.3.7, приложение: стр. 18–25). Изменения незначительны, а изменившиеся озера распространены локально (рисунок 3.3.8).



 - озера, не изменившиеся

Рисунок 3.3.8. Фрагмент эталонного участка №4 (1973 – 2007 гг.)

Однако, несмотря на незначительное количество изменившихся озер практически на всех участках уменьшение площади озер преобладает. Наиболее сильное сокращение площади зафиксировано в долине р. Вах на территории эталонного участка №3 (см. рисунок 3.3.6).

Сокращение площади здесь обусловлено зарастанием очень крупного озера Сигтын-Эмтор (рисунок 3.3.9) и спуском нескольких озер вдоль реки Сабун и его правого притока (приложение: стр. 23).

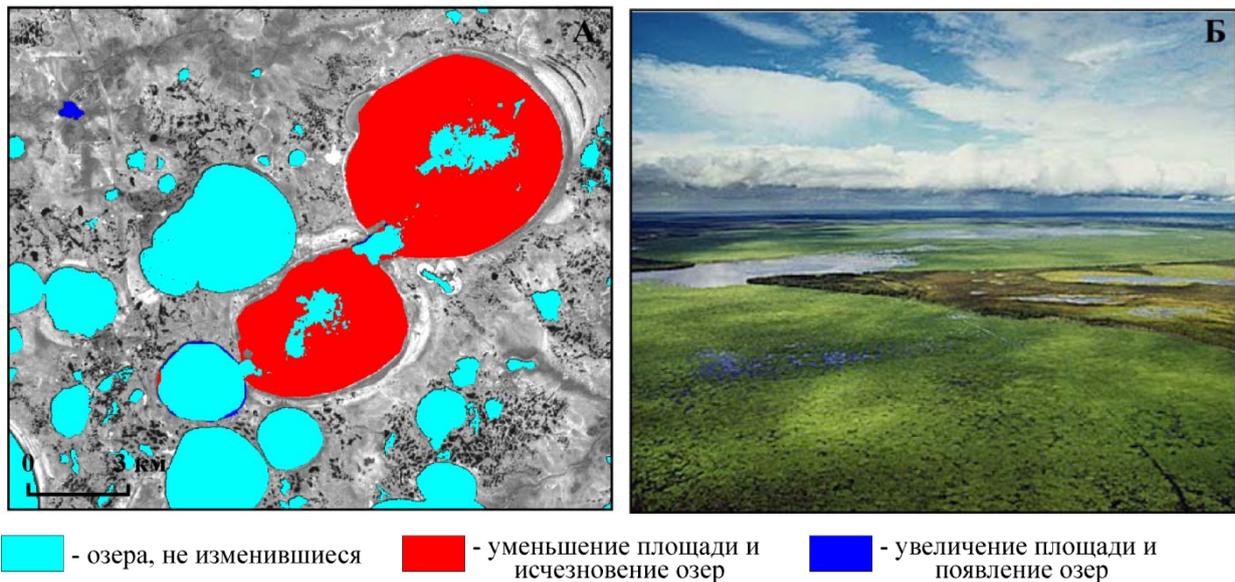


Рисунок 3.3.9. А - фрагмент эталонного участка №3 (1973 – 2011 гг.), Б – фотография озера Сигтын-Эмтор

Исключение из общей тенденции изменения площади озер в зоне островной мерзлоты представляет эталонный участок №2, расположенный на территории Среднеобской низменности севернее города Сургута, в районе энергичной нефтедобычи (рисунок 3.3.10, приложение: стр. 21).

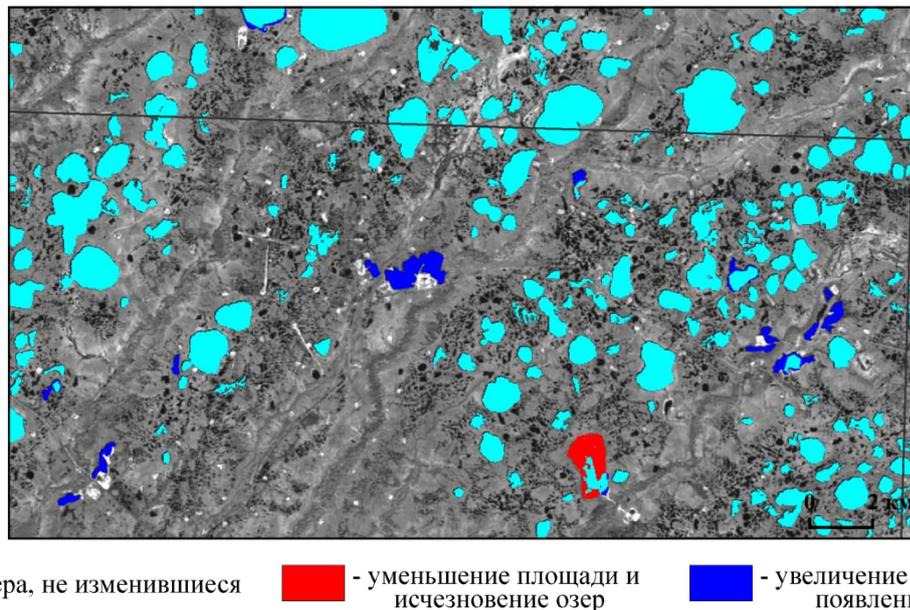


Рисунок 3.3.10. Фрагмент эталонного участка №2 (1973 – 2007 гг.)

В пределах этого эталонного участка отмечается большое количество появившихся и увеличившихся озер, что представляет собой результат антропогенной деятельности, связанной с разработкой нефтегазовых месторождений. Появившиеся и увеличившиеся озера, как

правило, расположены рядом с дорогами или насыпными кустовыми площадками скважин (рисунок 3.3.11).

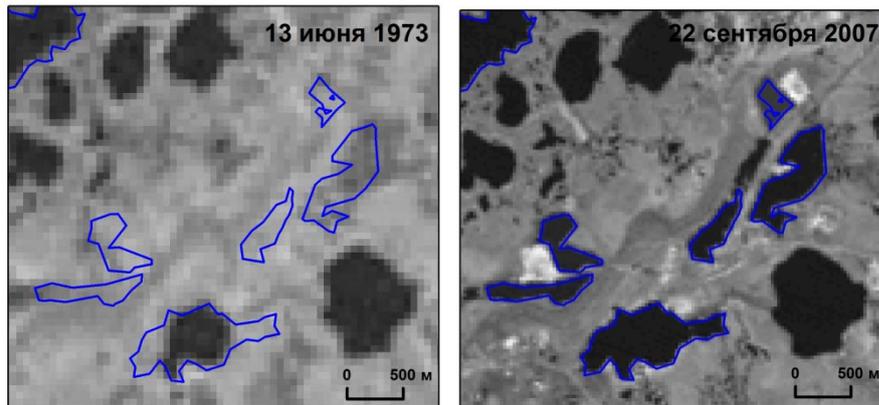


Рисунок 3.3.11. Появление и увеличение площади озер в пределах эталонного участка №2

Представленный эталонный участок из западно-сибирских является единственным, у которого процесс увеличения озерности преобладает над уменьшением. Однако антропогенное воздействие проявляется не только в увеличении площади озер, но и в уменьшении. Некоторые уменьшившиеся озера также расположены рядом с объектами инфраструктуры (рисунок 3.3.12). Антропогенная деятельность по откачке подземных вод, закачке растворов в пласты приводит к изменению уровня грунтовых вод. Сооружение многочисленных дамб для дорог, нефтепроводов, вызывает нарушение поверхностного стока, заболачивание, изменение направления или характера течения ручья, дополнительно питающего озеро, что в свою очередь приводит к изменению площади озер.

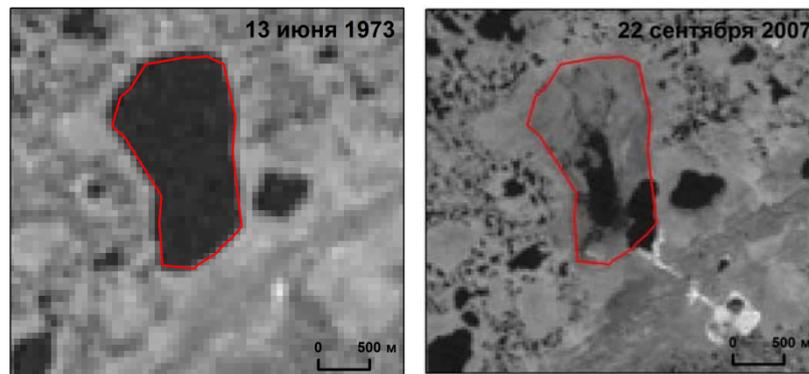


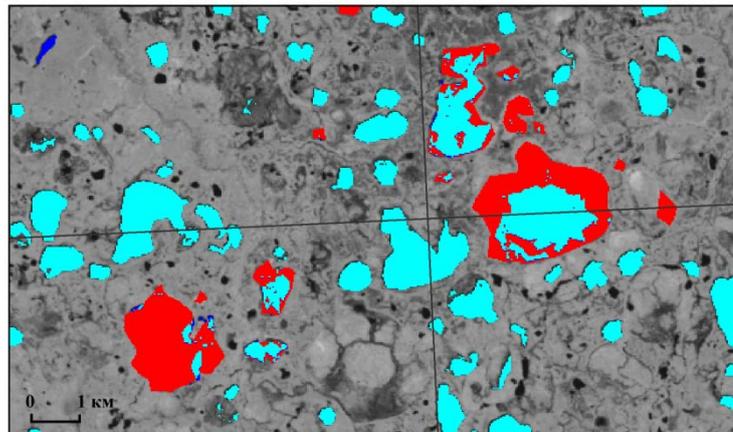
Рисунок 3.3.12. Уменьшение площади озера рядом с объектами инфраструктуры

Антропогенная деятельность влияет на динамику площади озер также в пределах других эталонных участков, однако имеет там локальный характер.

Таким образом, в пределах участков, расположенных в зоне островного распространения многолетней мерзлоты, наблюдаются относительно небольшие изменения площади озер: у 39 озер площадь уменьшилась, у 82 – увеличилась. Лишь на территории отдельных эталонных участков отмечается зарастание крупных озер и спуск небольших озер в результате эрозийной

деятельности рек. Незначительные изменения связаны с реликтовым характером термокарстовых озер, а также с географическими условиями рассматриваемой зоны, которая характеризуется пологим рельефом с абсолютными отметками высот не более 70 м, малыми углами наклона, слабой густотой и глубиной расчленения и сильной заболоченностью. В пределах всех эталонных участков отмечается влияние антропогенной деятельности на изменение (главным образом на увеличение) площади озер. Особенно сильно проявляется антропогенная деятельность на Среднеобской низменности в пределах эталонного участка №2 (у 75 озер площадь увеличилась), где отмечается появление большого количества новых озер и преобладание процесса увеличения площади озер над уменьшением.

В зоне прерывистого распространения многолетней мерзлоты преобладает уменьшение озерности – растет количество уменьшившихся озер (рисунок 3.3.7), и сокращение их площади (рисунок 3.3.6). Относительное количество уменьшившихся озер (10–20 озер на 1000 км²) здесь существенно больше, нежели в пределах зоны островного распространения мерзлоты, где оно исчисляется первыми единицами на 1000 км². Это хорошо видно на примере фрагмента эталонного участка №7, охватывающего левобережье р. Надым (рисунок 3.3.13), и в Приложении: стр. 26–37.



- озера, не изменившиеся

 - уменьшение площади и исчезновение озер

 - увеличение площади и появление озер

Рисунок 3.3.13. Фрагмент эталонного участка №7 (1973 – 2009 гг.)

Отмечается как частичное уменьшение площади озер (рисунок 3.3.14) с зарастанием обмелевшей части дна, так и полный спуск озер (рисунок 3.3.15). Основными причинами уменьшения площади озер является эрозионная деятельность рек, об этом говорит тот факт, что очень часто спущенные озера расположены рядом с водотоками; часто также зарастание озер растительностью. Возможно, имеются и другие причины, однако для выявления причин уменьшения площади каждого конкретного озера требуются дополнительные исследования.

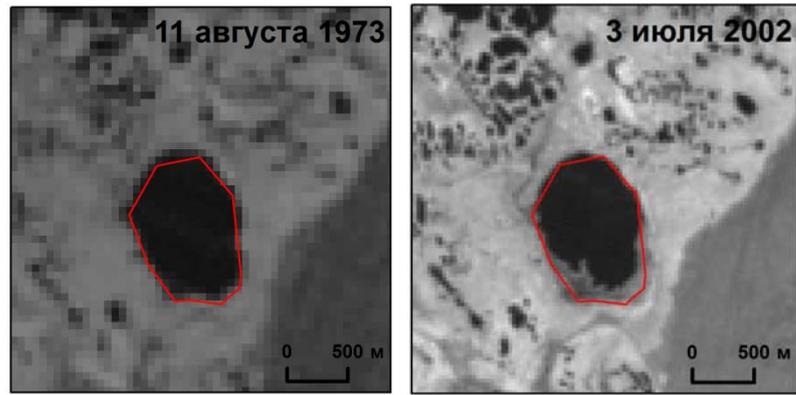


Рисунок 3.3.14. Частичный спуск озера рекой

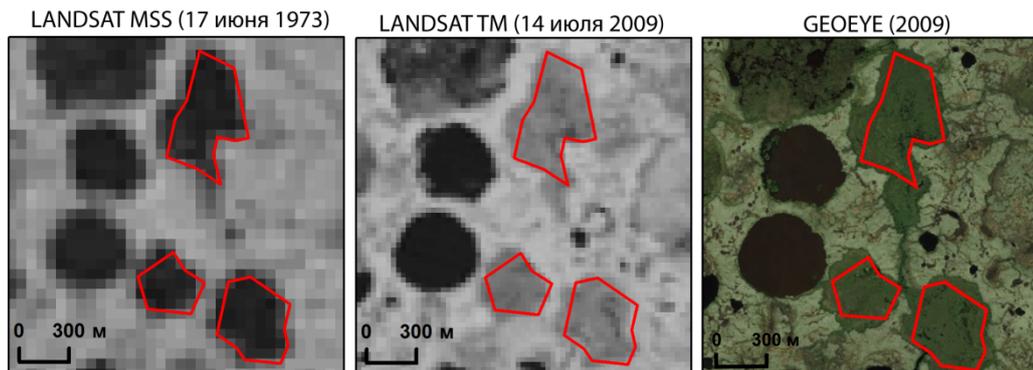
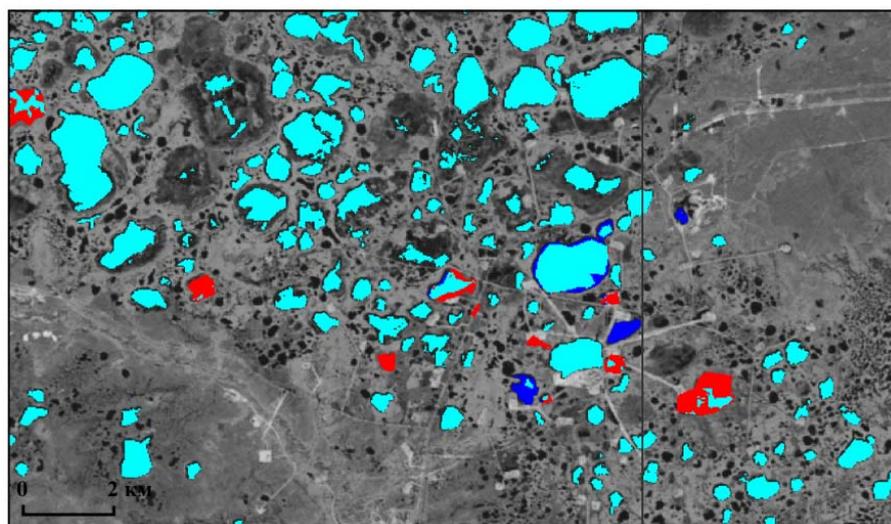


Рисунок 3.3.15. Полный спуск озер рекой

Влияние антропогенной деятельности также отмечается, особенно в верховьях р. Пур на территории эталонных участков №8, №9 и №10, где разрабатываются месторождения нефти и газа. На этих участках рядом с объектами хозяйственной деятельности – с дорогами или насыпными кустовыми площадками скважин произошли разнонаправленные изменения – увеличение либо уменьшение площади озер (рисунок 3.3.16, приложение: стр. 33, 35, 37).



■ - озера, не изменившиеся
 ■ - уменьшение площади и исчезновение озер
 ■ - увеличение площади и появление озер

Рисунок 3.3.16. Фрагмент эталонного участка №8 (1973 – 2007 гг.)

В целом в пределах зоны прерывистого распространения мерзлоты наблюдается значительное количество уменьшившихся озер (1046 озер) и незначительное количество увеличившихся озер (74 озера). Процесс уменьшения площади озер, составляющий до 0,5% от площади участков значительно преобладает над процессом ее увеличения (до 0,1% площади). Основными причинами уменьшения площади озер являются эрозионная деятельность рек и зарастание озер. Рассматриваемая территория представляет собой северный склон Сибирских Увалов, который характеризуется более высокими показателями расчленения рельефа и является более дренированным, нежели сильно заболоченный южный склон. Возможно поэтому в районе наблюдается большое количество спущенных озер. В зоне прерывистого распространения мерзлоты отмечается также изменение площади озер под влиянием антропогенной деятельности, особенно в районах интенсивной добычи нефти и газа. С антропогенной деятельностью связано в большинстве случаев увеличение, а в некоторых – уменьшение площади озер.

В зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты наблюдаются наибольшие изменения. Именно здесь отмечаются максимальные показатели уменьшения площади озер – до 1,4% от площади участков (см. рисунок 3.2.5, 3.2.6). Практически повсеместно встречаются озера, у которых наблюдается частичное или полное сокращение площади (рисунок 3.3.17, Приложение: стр. 38-41, 46-57, 66-69). Увеличение же площади озер, наиболее заметное в юго-восточной части п-ова Ямал на участках №13 и 14, имеет существенно более низкие показатели, в частности рост площади составляет 0,3% от площади участка.

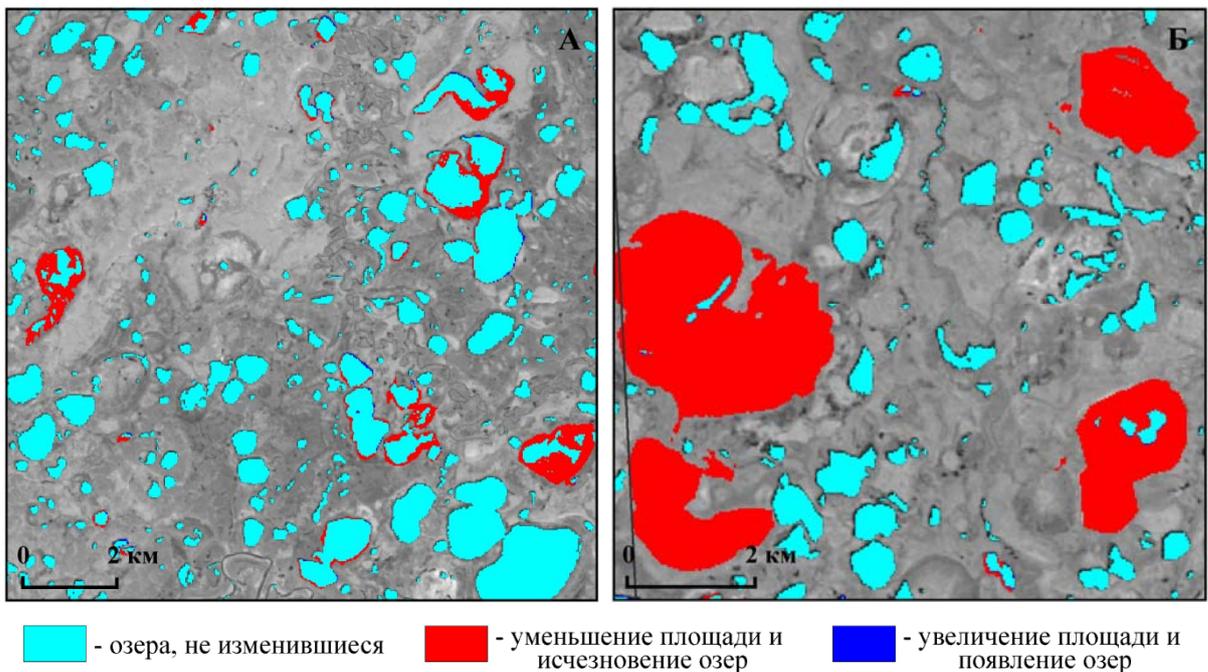


Рисунок 3.3.17. Фрагменты эталонных участков: А - №12 (1994 – 2009 гг.), Б - №14 (1988 – 2011 гг.)

Анализ географической ситуации на снимках показал, что в качестве основных причин изменений также следует рассматривать зарастание озер и эрозионную деятельность рек, особенно, когда озера расположены в непосредственной близости от рек и небольших водотоков. На широкое развитие на полуострове Ямал процессов спуска озер указывают также и другие исследователи (Крицук с соавт., 2012). В их работе зафиксировано около 500 спущенных озер, распределенных практически на всей территории полуострова Ямал, однако наибольшее количество спущенных озер сосредоточено в краевых частях полуострова, в поймах рек, на лайдах и на низких террасах. В качестве основной причины современного спуска озер авторы рассматривают также развитие термоэрозионных процессов, приводящих к быстрому формированию систем логов и оврагов в линейных льдистых зонах (Крицук с соавт., 2012). Процесс уменьшения площади озер под влиянием эрозионной деятельности может протекать достаточно быстро и приводить к значительным изменениям площади озер. Осушенная котловина впоследствии опять может быть заполнена водой, а механизм спуска через некоторое время может повториться.

Помимо широко распространенного уменьшения площади озер, на территории многих эталонных участков в зоне сплошного распространения мерзлоты (№11, №13, №14, №15, №18, №19) отмечается некоторое количество увеличившихся озер. В отличие от рассмотренных выше случаев антропогенного увеличения термокарстовых озер, здесь антропогенную деятельность нельзя рассматривать в качестве основной причины их увеличения, поскольку территории этих эталонных участков не относятся к районам активной нефтегазодобычи или транспортировки углеводородов.

Характерную черту увеличения площади крупных озер на указанных эталонных участках в зоне сплошного распространения ММП составляет небольшое расширение озер по краю (рисунок 3.3.18, приложение: стр. 43, 45, 49, 51, 59, 61, 63), что может быть обусловлено активизацией термоабразии и термокарстового процесса.

Такое увеличение по краю в виде узкой каймы бывает сложно зафиксировать при сравнении пары космических снимков со спутника Landsat, потому что оно, как правило, лежит в пределах точности определения площади озер. Чтобы точно зафиксировать такого рода изменения, необходимы высокодетальные данные, например аэрофотоснимки или космические снимки сверхвысокого разрешения. В связи с этим была выполнена проверка наблюдаемого увеличения площади озер на юго-востоке п-ова Ямал в пределах эталонного участка № 13 с помощью фотографических космических снимков, полученных с разведывательного спутника Corona (КН-9) 21 августа 1968 года. Данные снимки имеют высокое пространственное разрешение (2 м), что позволило удостовериться в достоверности выявленных изменений (рисунок 3.3.19). Представленные примеры подтверждают увеличение площади озера по краю.

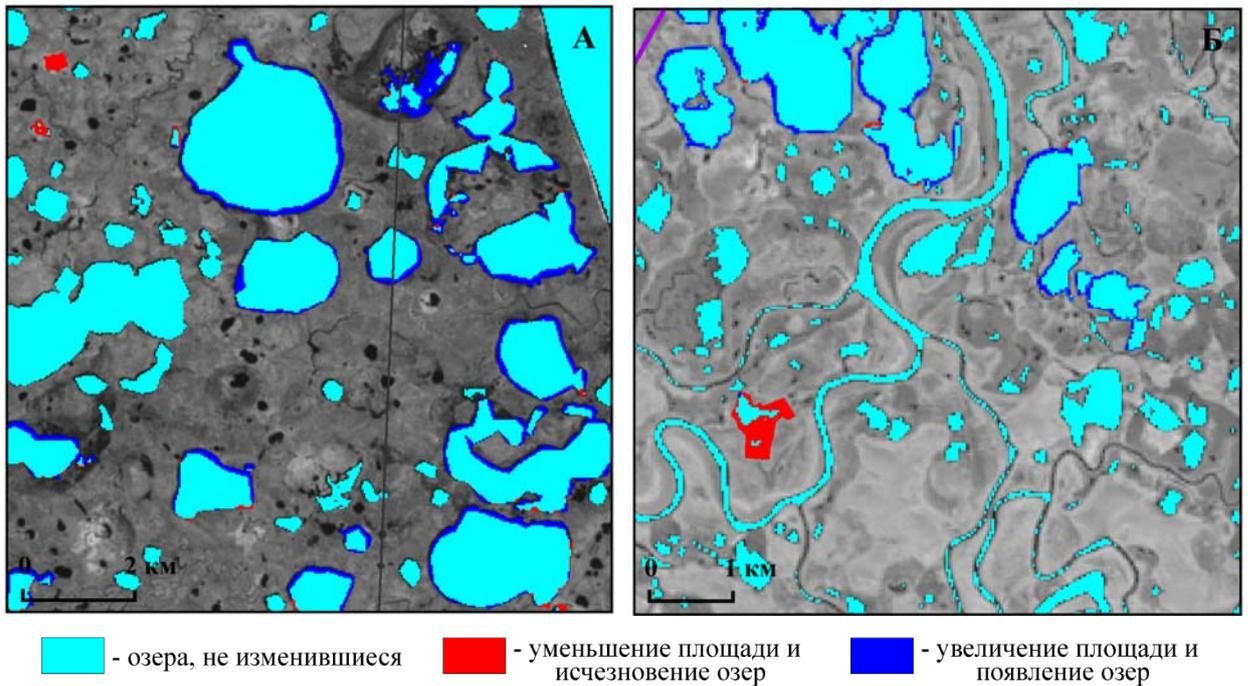


Рисунок 3.3.18. Фрагменты эталонных участков: А - №13 (1973 – 2010 гг.), Б - №19 (1988 – 2006 гг.)

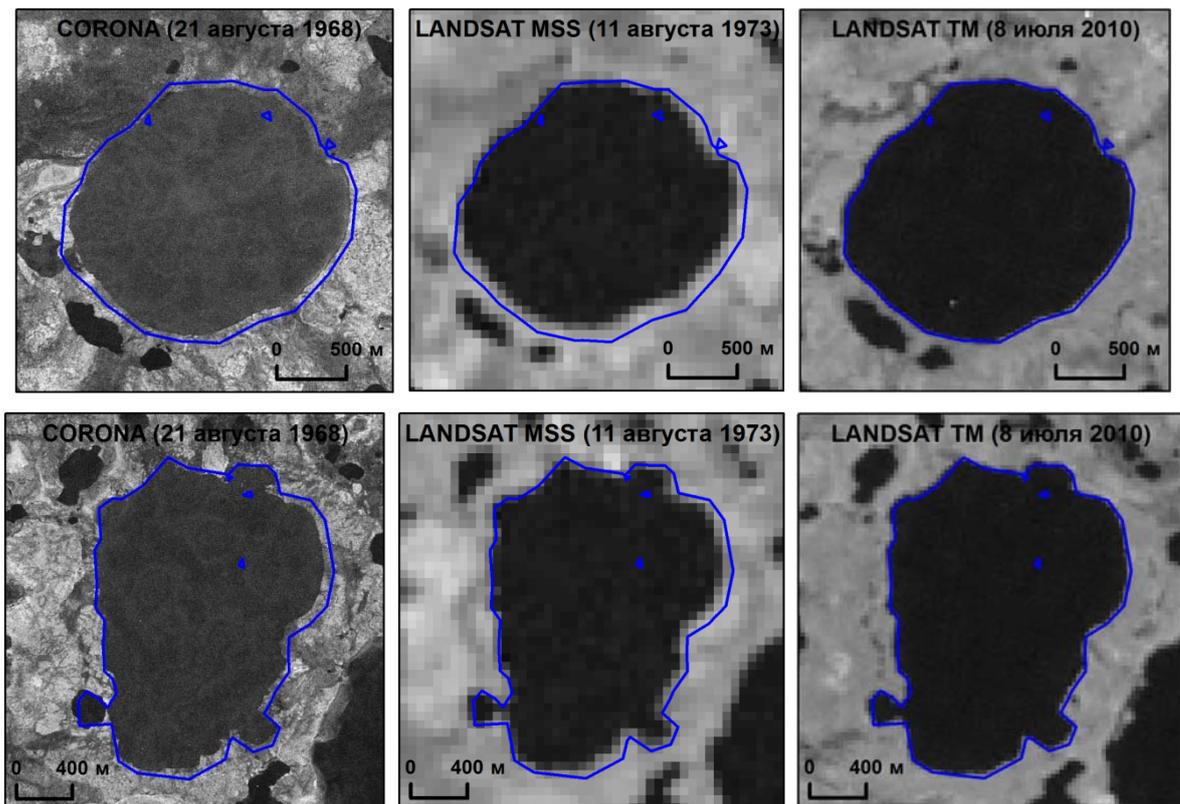


Рисунок 3.3.19. Увеличение площади озера по краю. Синим цветом показана береговая линия озера в 2010 г.

Как отмечалось выше, такое незначительное увеличение площади озера по краю было зафиксировано в пределах нескольких эталонных участков, расположенных в области сплошного распространения многолетней мерзлоты. На территории одних участков такие озера встречаются единично, а в пределах других имеются группы таких озера. Помимо групп

расширившихся озер на востоке полуострова Ямал (в пределах эталонных участков №13 (Приложение: стр. 42) и №14 (Приложение: стр. 46)), такие скопления были зафиксированы на севере Гыданского полуострова (в районе Гыданской губы, эталонные участки №18 (Приложение: стр. 58) и №19 (Приложение: стр. 60)), а также на территории Тазовского полуострова (в северо-восточной части эталонного участка №15 (Приложение: стр. 50) и в центральной части эталонного участка №11, в низовьях р. Пур (Приложение: стр. 38)). Практически все увеличившиеся таким образом озера расположены в пределах отрицательных опущенных морфоструктур, где отмечается незначительное расчленение рельефа.

При наблюдаемой в большинстве случаев природной причине увеличения площади озер, в отдельных случаях зафиксировано также влияние антропогенной деятельности. Однако эти случаи единичны, в отличие от хорошо освоенных южных регионов. В качестве примера можно привести увеличение и уменьшение площади озер в пределах Бованенковского месторождения, которое отмечается и другими исследователями (Санников, 2012).

Таким образом, в пределах зоны сплошного распространения многолетнемерзлых пород в Западной Сибири на 10 эталонных участках зафиксирована разнонаправленная динамика озер с преобладанием уменьшения озер. У 3719 озер наблюдается сокращение площади, а у 393 озер – увеличение площади. Уменьшение площади озер имеет широкое распространение и встречается в пределах всех эталонных участков. Сокращение площади озер, как правило, вызвано развитием термоэрозии и эрозионной деятельности рек, зарастанием озер, а в отдельных случаях обусловлено антропогенными причинами. Помимо уменьшения площади озер, практически на всех эталонных участках наблюдаются озера, площади которых немного увеличились. Процесс увеличения площади озер в области сплошного распространения мерзлоты значительно отличается от процесса увеличения площади в области прерывистого и островного распространения мерзлоты и высокой льдистости пород, где это увеличение связано с заполнением озерных котловин реками, либо с деятельностью человека в районах нефтегазодобычи. Лишь в зоне сплошной мерзлоты отмечается большое количество озер, увеличившихся по краю, вдали от объектов антропогенной деятельности. Такое увеличение крупных озер по краю может свидетельствовать об активизации процессов термоабразии и термокарста по сильнольдистым породам зоны сплошного распространения мерзлоты. Возможно, на наблюдаемую активизацию процессов могло повлиять современное потепление климата, ведь именно север Западной Сибири находится в области высокого метеогеокриологического риска (см. рисунок 3.1.3).

Проанализированные нами эталонные участки частично, а некоторые и полностью перекрываются с тестовыми участками, в пределах которых томскими исследователями было установлено преимущественное увеличение площади озер (Брыксина с соавтор., 2009) (рисунок

3.3.4). Нами в пределах большинства этих тестовых участков также было зафиксировано небольшое увеличение площади озер, которое характеризуется увеличением площади озер по краю и может свидетельствовать об активизации процесса термокарста. Однако, несмотря на наблюдаемое увеличение площади некоторых озер, процесс сокращения водоемов в этих районах протекает значительно интенсивнее как в отношении количества изменившихся озер, так и изменения их площади – количество озер, площадь которых увеличилась в 4,5 раза меньше, чем уменьшившихся озер, а увеличение площади озер в 3,5 раза меньше, чем уменьшение. Данные факты подтверждаются составленными схемами динамики озер (Приложение: стр. 52-53, 58-59, 60-65) и результатами картометрических определений по ним. Полученные нами результаты в очередной раз подтвердили расхождения с выводами томских исследователей относительно преобладающего увеличения площади термокарстовых озер в зоне сплошного распространения ММП – севернее 70° с.ш., а также с результатами группы американских исследователей (Smith et al, 2005), по данным которых отмечается увеличение площади озер в зоне сплошного распространения мерзлоты на 12%. Несмотря на то, что нами также установлено увеличение площади многих озер в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород, оно составляет по 10 участкам в целом лишь 0,1–0,2% их площади, в то время как уменьшение озер охватило до 1,4% площади эталонных участков. Процесс сокращения площади водоемов существенно преобладает над увеличением в пределах всех эталонных участков.

3.4. Север Восточной Сибири и Дальнего Востока

Природные особенности района. Рассматриваемая территория находится в пределах двух физико-географических стран: Северо-Восточной Сибири и Дальнего Северо-Востока. Равнинная территория, относящаяся к Северо-Восточной Сибири, протянулась от низовьев Лены до Чаунской губы, а в пределах Дальнего Северо-Востока выделяют п-ов Чукотский, Анадырско-Пенжинскую депрессию, Анадырское плоскогорье и Корякское нагорье с рядом других более мелких хребтов и массивов (Макунина, 1985).

Северо-Восточная Сибирь. Из регионов Северо-Восточной Сибири в нашем исследовании наибольший интерес представляет *Северная Яно-Колымская область*, включающая равнинно-низменное побережье северных морей и низменные пространства континентальной части (в частности, Яно-Индибирскую низменность и Колымскую низменность), глубоко вдающиеся в горные пространства.

Эта территория образовалась в пределах погруженной синклинали мезозойской зоны и погребенных древних срединных массивов. Местами останцы складчатого основания возвышаются над поверхностью морских и озерно-аллювиальных равнин, образуя низкие горы и плоскогорья. Среди поверхностных отложений аккумулятивных равнин преобладают песчаные и озерно-аллювиальные четвертичные, скованные мерзлотой, которая охватывает не только четвертичные, но и неогеновые и более древние породы (Макунина, 1985).

Современный рельеф территории имеет равнинный облик и представлен главным образом аккумулятивными и эрозионно-аккумулятивными формами. Яно-Индибирская и Колымская низменности характеризуются абсолютными отметками высот до 100 – 120 м. Эти низменности имеют пологохолмистую поверхность и большое количество термокарстовых озер. Термокарстовая переработка поверхности столь значительна, что во многих случаях от первичной поверхности равнины остались лишь изолированные останцы – “едомы”, разбросанные среди сильно заболоченных аласных равнин (Региональная криолитология, 1989).

По климатическому районированию северная часть рассматриваемого региона относится к океанической области Арктического климатического пояса, а внутренние (центральные) части – к континентальной области субарктического пояса. Летом температуры воздуха с юга на север в целом понижаются, а в зимний период наоборот – повышаются. Значения среднегодовой температуры воздуха на большей части территории изменяется от $-13,5^{\circ}$ до -15° . Самые низкие температуры ($-15,1^{\circ}$... $-15,2^{\circ}$) отмечаются в низовьях Индибирки и Алазеи, более высокие ($-11,6^{\circ}$... $-13,5^{\circ}$) – в северо-восточной и восточной частях Колымской низменности. Континентальность климата возрастает с севера на юг.

Годовая сумма осадков невелика, она зонально увеличивается от 130–170 мм на островах до 250–270 мм на юге региона вблизи предгорий. Несмотря на малое количество осадков,

степень увлажнения большей части поверхности избыточна, что связано с незначительным испарением и экранирующим влиянием многолетнемерзлых пород. Мощность снега возрастает от 20–30 см на островах и побережье до 60–70 см на юге региона. Приморская часть района испытывает значительное перевевание снега сильными ветрами. На континентальной же части всю зиму господствует антициклональная штилевая погода и снег распределяется относительно равномерно.

С севера на юг в пределах рассматриваемого района выделяют последовательно сменяющие друг друга: зону арктических пустынь, зону тундры с выделением в ее пределах подзон мохово-лишайниковой и ерниково-кочкарной тундр и зону тундролесий, переходящих в лесотундру (Геокриология СССР, 1989).

Район расположен в области сплошной вечной мерзлоты. Для основной части низменности мощность мерзлоты составляет 400–600 м. На междуречных пространствах в пределах арктической тундры она достигает 700 м, в субарктической тундре и лесотундре уменьшается до 300–400 м, а под крупными аласами и аласными равнинами даже в арктической и субарктической тундре уменьшается до 200–400 м (Региональная криолитология, 1989).

В строении многолетнемерзлых пород региона выделяют два яруса: синкриогенные аллювиальные свиты верхнего яруса подстилаются либо эпикриогенным русловым аллювием, либо поликриогенными отложениями древних аласных комплексов, а на самом севере – синкриогенными лагунно-морскими отложениями. В верхнем ярусе развиты высокольдистые (до 80%) криолититы и большие массивы криолитов, представленные в основном полигонально-жильным льдом. Накоплению таких грандиозных масс подземного льда в плейстоценовых отложениях района способствовало: 1. высокоширотное положение района в зоне устойчивого охлаждения с конца плиоцена; 2. аккумуляция на протяжении всего времени сингенетически промерзавших континентальных осадков; 3. сохранение вечной мерзлоты во время низкотемпературных эпох относительно потепления; 4. отсутствие покровного оледенения (Региональная криолитология, 1989).

В районе широко развиты разнообразные формы мерзлотного рельефа. В пределах низменностей с высокольдистыми синкриогенными мерзлыми породами ведущим рельефообразующим процессом является термокарст, который приводит к образованию самых разнообразных форм: от мелких термокарстовых понижений до обширных термокарстовых озер и котловин – аласов. Глубина аласов, как правило, определяется мощностью синкриогенных толщ, подверженных вытаиванию, и достигает 30 м. Днища аласов и поверхности аласных равнин в свою очередь, а также морские низкие террасы, дельты и поймы рек представляют собой участки преобладающей аккумуляции, где ведущим рельефообразующим криогенным процессом является морозобойное растрескивание. Оно

сопровождается сингенетическим ростом жильных льдов и формированием полигонального рельефа.

Дальний Северо-Восток. Из регионов Дальнего Северо-Востока в исследовании были рассмотрены отдельные приморские долины рек *Чукотской области* и Анадырская низменность в пределах *Анадырско-Пенжинской области*.

Основу орографии Дальнего Северо-Востока составляют два ряда средневысотных гор, разделенных крупной компенсационной Анадыро-Пенжинской депрессией, большая часть днища которой выстлана озерно-аллювиальными песчано-глинистыми отложениями (Гвоздецкий, 1968).

Особенности расположения Чукотки (с запада – континентальные районы Якутии, с востока – Тихий океан) придают ее климату специфические черты. В зимнее время, с одной стороны, континентальные северные районы находятся под влиянием сибирского и арктического антициклонов, с другой стороны, восточное побережье находится в зависимости от циклонической деятельности над Тихим океаном. При взаимодействии этих барических образований, главным образом в восточных районах, возникают резкие смены погоды. Выделяют два типа климата: резко континентальный со средней температурой января ниже -32° (континентальные районы) и умеренно континентальный со средней температурой января выше -32° (прибрежные районы).

Распределение осадков в условиях преобладающего горного рельефа крайне неравномерно. Максимальное количество осадков (600–700 мм в год) отмечается на Тихоокеанском побережье. Во внутригорных впадинах, на северном побережье их количество сокращается до 200 мм в год (Региональная криолитология, 1989).

Суровые климатические условия, выраженные в низких среднегодовых температурах воздуха, короткий безморозный период, небольшое количество осадков, близость к холодным морям определяют формирование вечномерзлых толщ и развитие преимущественно тундровой растительности как зонального типа.

В прибрежных низменностях мощность вечной мерзлоты довольно резко уменьшается: на Нижнеанадырской низменности – не превышает 200 м, на берегу Анадырского лимана – около 100 м. Под руслами рек, крупными озерами формируются многочисленные талики.

Синкриогенные породы достаточно широко распространены в пределах аллювиальных, аллювиально-озерных, озерных, водно-ледниковых, болотных, делювиально-солифлюкционных и других образований. Они содержат повторно-жильные льды, их льдистость нередко превышает 50–60%, а криогенные текстуры массивные, линзовидные, слоистые и более сложные разношлировые (Геокриология СССР, 1989).

Предшествующие исследования. Работы по изучению динамики озер на севере Восточной Сибири и Дальнего Востока проводились разными исследователями (Кравцова, Быстрова, 2009; Morgenatern et al, 2011; Hese et al, 2010; Гюнтер с соавт., 2010; Grosse et al., 2008б; Веремеева, 2011; Тюкавина, 2009) (рисунок 3.3.1). Результаты этих исследований в большинстве своем указывают на разнонаправленные изменения (как уменьшение, так и увеличение площади озер) в пределах одного района. При этом многими исследователями отмечается преобладание спада озер под влиянием термоэрозионных процессов, что впоследствии приводит к затуханию процесса термокарста.

Эталонные участки. С целью более детального исследования и выявления региональных особенностей динамики термокарстовых озер на территории Севера Восточной Сибири и Дальнего Востока было выбрано 8 эталонных участков (рисунок 3.4.1). Все эталонные участки расположены в зоне сплошного распространения мерзлоты – в пределах широкого и фрагментарного распространения пород ледового комплекса (рисунок 3.4.2).

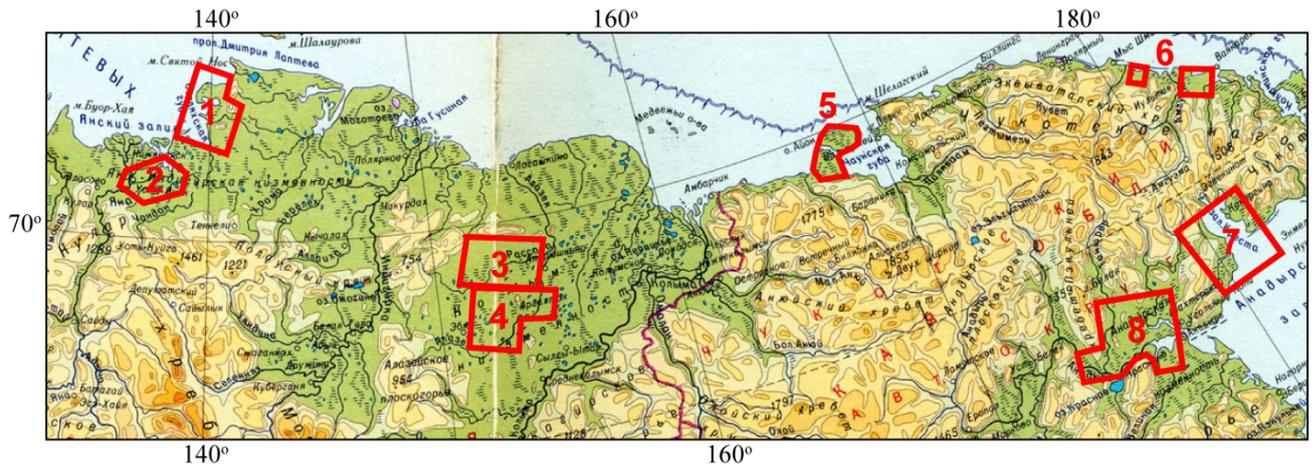


Рисунок 3.4.1. Расположение эталонных участков на Севере Восточной Сибири и Дальнего Востока; *В пределах Яно-Индигоирской низменности:* 1 – на территории п-ова Широкостан и южнее, 2 – в дельте р. Яны; *В пределах Колымской низменности:* 3 – в бассейне р. Рассоха, 4 – в верховьях р. Алазея; *На побережье Северного Ледовитого Океана:* 5 – на территории о. Айон и южнее, 6 – на побережье Чукотского моря; *На побережье Анадырского залива:* 7 – на побережье залива Креста, 8 – на территории Анадырской низменности

Выбранные эталонные участки отличаются друг от друга по площади, количеству и площади озер, а также по соотношению озер разного размера (таблица 3.4.1).

Несмотря на имеющиеся различия (таблица 3.4.1), практически на всех эталонных участках значительную долю составляют малые озера площадью менее 0,5 га. Исключение представляют собой эталонные участки №3 и №4, расположенные на территории Колымской низменности, где по сравнению с другими участками встречается наибольшее количество крупных озер (до 30%) и наименьшее количество малых озер.

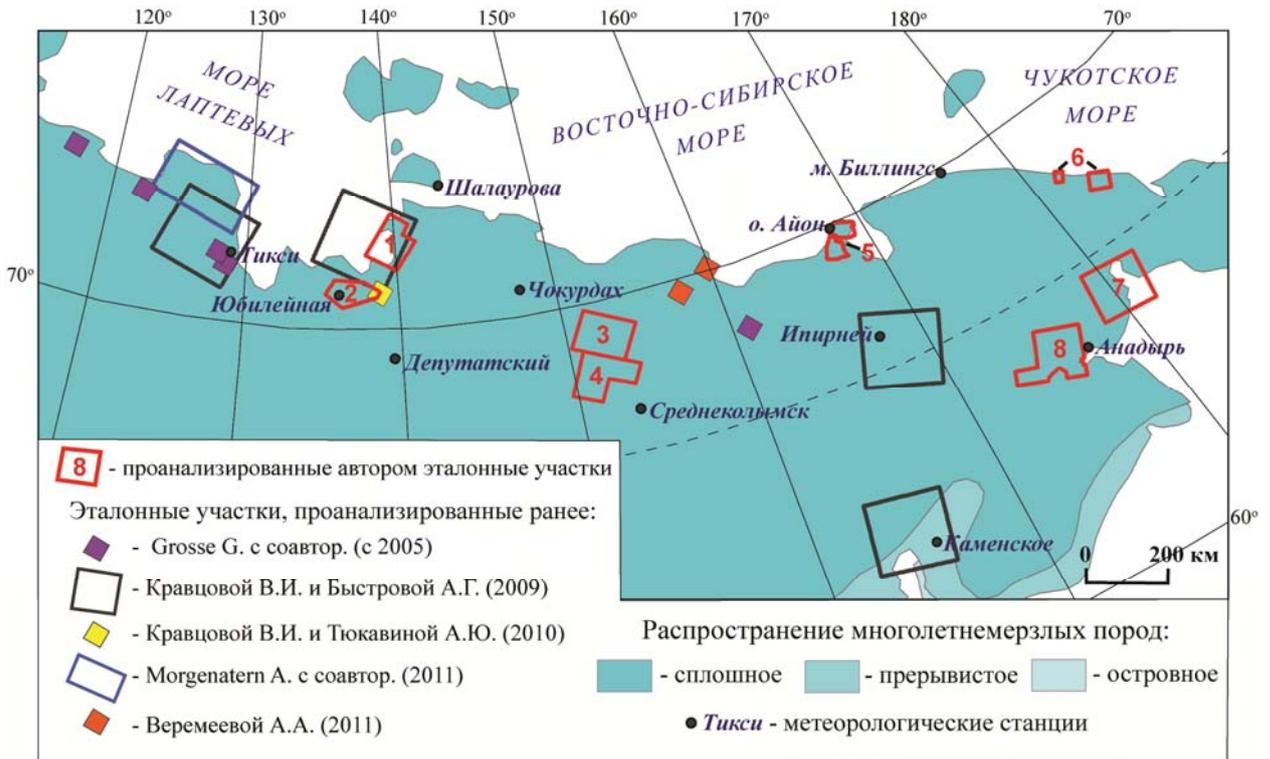


Рисунок 3.4.2. Расположение эталонных участков на Севере Восточной Сибири и Дальнего Востока

Таблица 3.4.1

Характеристика сети озер эталонных участков
по современным космическим снимкам со спутника Landsat

№ эталонного участка	Площадь участка, км ²	Общее количество озер	Плотность озер*	Общая площадь озер, км ²	Озерность района**, %	Соотношение озер разного размера***
<i>Яно-Индигирская низменность</i>						
1	8863	11778	1,3	384	4	66% 29% 4% 0,5 га 10 га
2	5797	11386	2,0	1408	24	52% 35% 13% 0,5 га 10 га
<i>Колымская низменность</i>						
3	12945	7379	0,6	2142	17	31% 38% 31% 0,5 га 10 га
4	12425	7366	0,6	2719	22	38% 33% 29% 0,5 га 10 га
<i>Побережье Северного Ледовитого Океана</i>						
5	4088	6587	1,6	377	9	49% 40% 11% 0,5 га 10 га
6	2742	4153	1,5	488	18	47% 44% 9% 0,5 га 10 га
<i>Побережье Анадырского залива</i>						
7	18697	8389	0,4	8997	48	45% 44% 10% 0,5 га 10 га
8	15971	25760	1,6	2686	17	47% 45% 8% 0,5 га 10 га

* - количество озер на 1 км²

** - доля площади водной поверхности озер от общей площади участка

*** - голубой цвет – малые озера (до 0,5 га); синий – средние (от 0,5 га до 10 га); фиолетовый – крупные (более 10 га)

Материалы и методика исследования. Аналогично рассмотренным ранее регионам на территории Восточной Сибири по парам разновременных снимков со спутника Landsat (таблица 3.4.2) были проанализированы многолетние изменения площади озер.

Таблица 3.4.2

Космические снимки, использованные для анализа многолетних изменений площади озер

№ эталонного участка	Дата съемки	Съемочная система	Пространственное разрешение, м	Path/Row
1	16 09 1972	Landsat-1 MSS	80	134/009
	19 07 2011	Landsat-5 TM	30	122/009
2	16 09 1972	Landsat-1 MSS	80	134/010
	19 07 2011	Landsat-5 TM	30	122/010
3	01 07 1974	Landsat-1 MSS	80	121/011
	03 08 2001	Landsat-7 ETM+	30	111/011
4	17 06 1973	Landsat-1 MSS	80	120/012
	27 07 2001	Landsat-7 ETM+	30	110/012
5	08 07 1974	Landsat-1 MSS	80	110/011
	09 08 2002	Landsat-7 ETM+	30	100/011
6	13 07 1974	Landsat-1 MSS	80	098/012
	30 07 2007	Landsat-5 TM	30	091/012
7	13 07 1974	Landsat-1 MSS	80	098/014
	19 09 2002	Landsat-7 ETM+	30	090/014
8	26 09 1974	Landsat-1 MSS	80	101/014
	04 08 2001	Landsat-7 ETM+	30	093/014

На территории всех эталонных участков в качестве материалов за первую дату были использованы снимки, полученные съемочной системой MSS с пространственным разрешением 80 м, а за вторую дату – снимки, полученные съемочными системами TM и ETM+ с пространственным разрешением 30 м. Сравнение таких снимков вынуждает исключать из анализа малые озера, не отобразившиеся на снимках MSS, путем введения порогового значения в 2 га для обоих снимков. В результате количество и общая площадь проанализированных озер в пределах каждого эталонного участка (таблица 3.4.3) становится меньше по сравнению с количеством и общей площадью всех выделенных озер по современным космическим снимкам со спутника Landsat (таблица 3.4.1).

Методика анализа изменений площади озер была аналогична той, что использовалась при анализе изменений площади озер других регионов. По совмещенным разновременным снимкам проводилось определение изменений площади каждого конкретного озера, отбор озер с величиной изменения, превышающей величину среднеквадратической погрешности определения площади озер, и визуальный контроль наблюдаемых изменений.

Таблица 3.4.3

Характеристика сети озер, проанализированных по современным космическим снимкам со спутника Landsat на эталонных участках

№ эталонного участка	Количество проанализированных озер	% проанализированных озер от их общего количества	Общая площадь проанализированных озер	% общей площади проанализированных озер от общей площади всех озер
1	1020	9	325	85
2	2429	21	1341	95
3	3885	53	2109	98
4	3245	44	2689	99
5	1239	19	336	89
6	831	20	461	94
7	1706	20	8942	99
8	8305	32	2576	96

Результаты исследования. В результате определено количество озер, площадь которых уменьшилась, количество озер, площадь которых увеличилась и изменение площади озер в км² (таблица 3.4.4, рисунок 3.4.3). Полученные показатели были подсчитаны также относительно площади эталонных участков и приведены в виде графиков (рисунок 3.4.4, 3.4.5).

Таблица 3.4.4

Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков

№ эталонного участка	Площадь участка, км ²	Количество уменьшившихся озер	Изменение площади уменьшившихся озер, км ²	Количество увеличившихся озер	Изменение площади увеличившихся озер, км ²
<i>Яно-Индибирская низменность</i>					
1	8863	27	-14	83	+31
2	5797	30	-20	175	+92
<i>Колымская низменность</i>					
3	12945	204	-134	35	+17
4	12425	101	-146	70	+24
<i>Побережье Северного Ледовитого Океана</i>					
5	4088	15	-3	20	+5
6	2742	11	-2	25	+4
<i>Побережье Анадырского залива</i>					
7	18697	66	-11	1	+0,4
8	15971	338	-86	1	+0,09

Согласно полученным результатам на севере Восточной Сибири наблюдаются разнонаправленные изменения площади озер: на территории Яно-Индибирской низменности (в пределах эталонных участков № 1 и №2) и на побережье Северного Ледовитого Океана (в пределах эталонных участков №5 и №6) преобладает процесс увеличения площади озер, а на территории Колымской низменности (в пределах эталонных участков № 3 и №4) и на побережье Анадырского залива (в пределах эталонных участков № 7 и №8) – процесс

уменьшения их площади. Наиболее сильные изменения, как в отношении количества изменившихся озер, так и площади изменений выявлены в дельте р. Яны (эталонный участок №2), на территории Колымской низменности: в бассейне р. Рассоха (эталонный участок №3) и в верховьях р. Алазея (эталонный участок №4), а также на территории Анадырской низменности (эталонный участок №8). С целью выявления причин наблюдаемых изменений эталонные участки были рассмотрены по регионам.



Рисунок 3.4.3 Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков

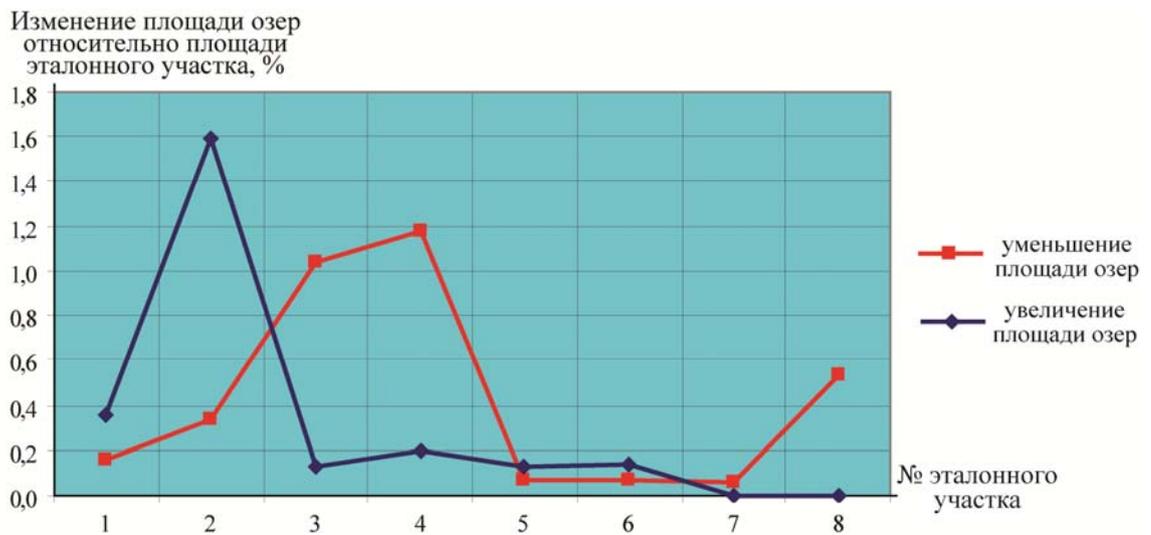


Рисунок 3.4.4. Изменение площади озер относительно площади эталонных участков

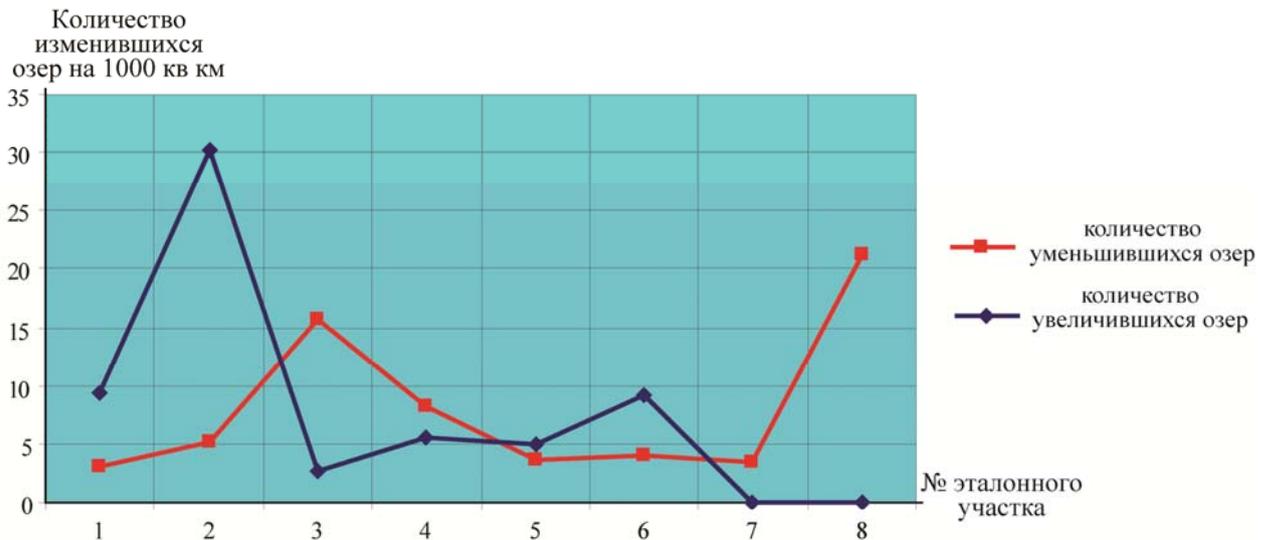
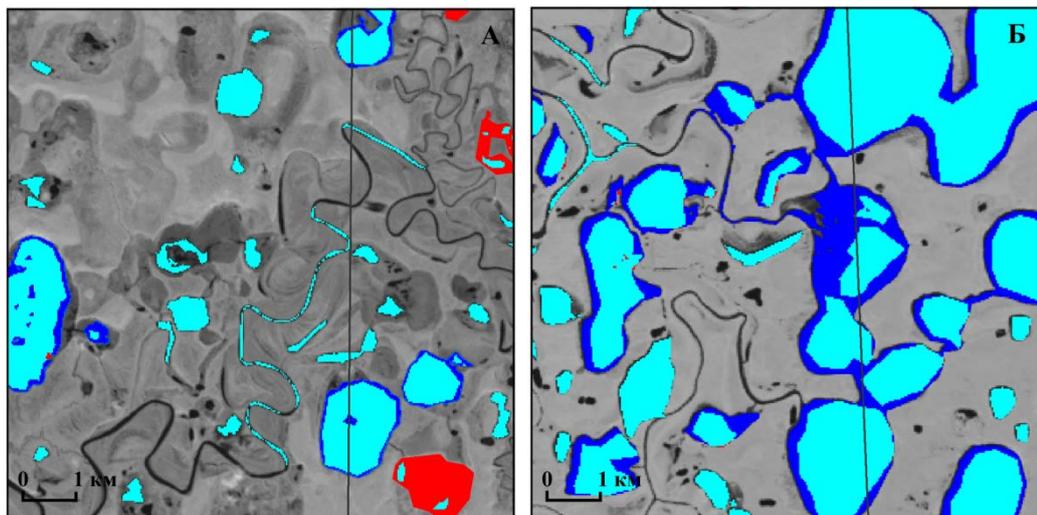


Рисунок 3.4.5. Количество изменившихся озер в пределах эталонных участков

На территории Яно-Индигорской низменности расположены эталонные участки №1 и №2, один из которых охватывает полуостров Широкостан и территорию вдоль Селляхской губы южнее Ванькиной губы моря Лаптевых, а другой – часть дельты реки Яны и территорию южнее нее. Несмотря на разнонаправленную динамику, для обоих участков характерно значительное увеличение площади озер, как по количеству увеличившихся озер – до 30 озер на 1000 км² (рисунок 3.4.5), так и по приращению площади, достигающему 1,6% от площади эталонного участка (рисунок 3.4.4). Наблюдается практически полное сокращение площади, т.е. исчезновение небольшого количества озер по долинам рек (в результате эрозионной деятельности этих рек) и увеличение по краю озерных котловин большого количества озер, распространенных на всей территории эталонных участков (рисунок 3.4.6-А, приложение: стр. 72, 76).



■ - озера, не изменившиеся
 ■ - уменьшение площади и исчезновение озер
 ■ - увеличение площади и появление озер

Рисунок 3.4.6. Фрагменты эталонных участков: А - №1 (1972 – 2011 гг.), Б - №2 (1972 – 2011 гг.)

В дельте реки Яны помимо увеличения площади по краю озерных котловин наблюдается существенное увеличение площади озер, соединенных между собой водотоками (рисунок 3.4.6-Б, Приложение: стр. 74). Как показал анализ снимков за 2001, 2009, 2010 и 2012 годы этим озерам свойственна межгодовая динамика: в отдельные годы площадь озер увеличивается, а в другие – уменьшается. Такая межгодовая динамика, скорее всего, обусловлена разными сезонными условиями стока в разные годы в дельте реки.

Увеличение же площади озер по краю озерных котловин, не подверженных межгодовой динамике и не имеющих прямой связи с водотоками дельты, может быть обусловлено, как это отмечалось на севере Ямала, развитием и проявлением процессов термоабразии и термокарста.

На территории Колымской низменности расположены эталонные участки №3 и №4, один из которых находится в бассейне р. Рассоха, а другой – в верховьях р. Алазея. Для обоих участков характерно значительное сокращение площади озер (рисунок 3.4.4, 3.4.5) с индивидуальными особенностями на каждом из них.

В долине р. Рассоха (эталонный участок №3) наблюдается значительное количество озер небольшого размера, площадь которых уменьшилась в результате спуска озер водотоками (рисунок 3.4.7-А, Приложение: стр. 77–80).

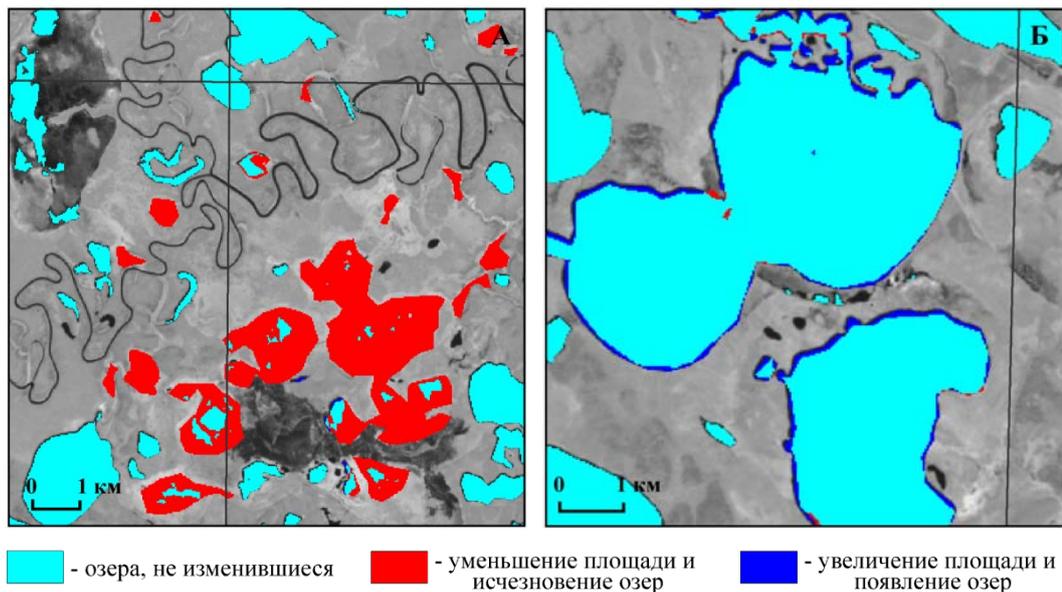


Рисунок 3.4.7. Фрагменты эталонного участка №3 (1974 – 2001 гг.)

Анализ снимков за 2009 и 2011 годы показал, что эти озера подвержены межгодовой изменчивости, поэтому спустя некоторое время озерные котловины вновь могут быть заполнены водой. Помимо этого наблюдается увеличение площади крупных озер по краю озерной котловины (рисунок 3.4.7-Б, Приложение: стр. 77–80), такие озера распределены неравномерно в пределах всего эталонного участка.

В верховьях р. Алазея (эталонный участок №4) также наблюдается значительное количество озер, площадь которых уменьшилась, однако в отличие от эталонного участка №3

это крупные озера, не связанные с речными долинами, и распределены неравномерно в пределах всего участка (рисунок 3.4.8-А, Приложение: стр. 81, 82). Практически все из них, как показал просмотр снимков 2009 и 2011 гг., не подвержены межгодовой динамике. Причиной сокращения площади этих озер, скорее всего, является зарастание водоемов.

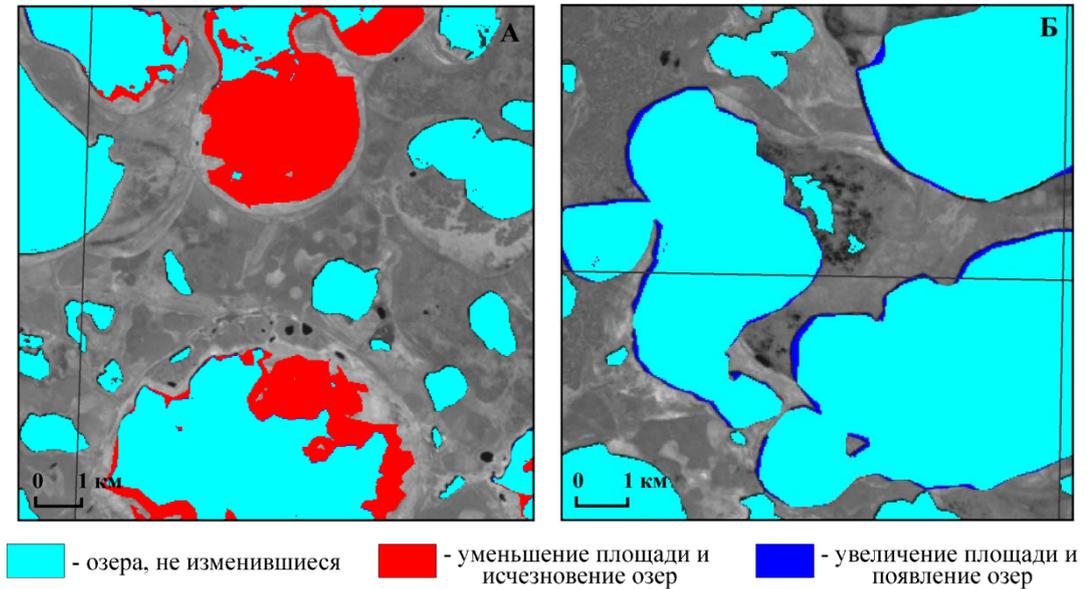


Рисунок 3.4.8. Фрагменты эталонного участка №4 (1973 – 2001 гг.)

Аналогично эталонному участку №3 здесь наблюдается увеличение площади крупных озер по краю (рисунок 3.4.8-Б, Приложение: стр. 81, 82). Однако количество таких озер существенно меньше. По долине реки Алазея на востоке эталонного участка встречается значительное количество увеличившихся и появившихся небольших озер, которые также подвержены межгодовой динамике (рисунок 3.4.9, Приложение: стр. 83, 84).

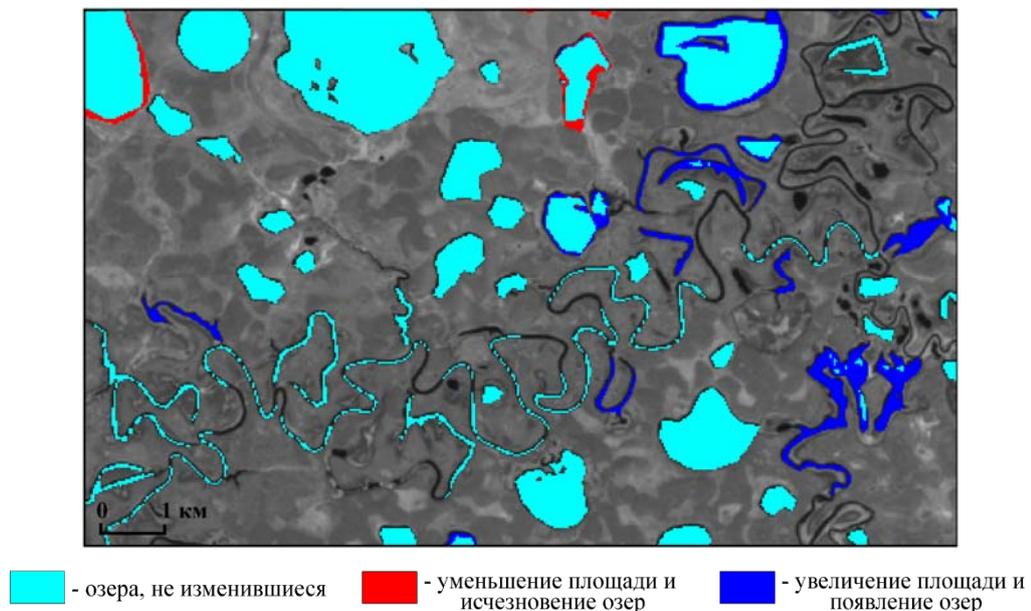


Рисунок 3.4.9. Фрагмент эталонного участка №4 (1973 – 2001 гг.)

В качестве основных причин изменения площади озер на территории Колымской низменности, где спущенные или увеличившиеся озера расположены по долинам, следует рассматривать деятельность рек, межгодовую изменчивость стока. Отмечается также зарастание крупных водоемов. Наблюдаемое вне речных долин увеличение площади крупных озер по краям озерных котловин может быть обусловлено развитием процессов термокарста и термоабразии.

На побережье Северного Ледовитого Океана расположены эталонные участки №5 и №6, один из них – на побережье Восточно-Сибирского моря, а другой – на побережье Чукотского моря; в этом регионе они относятся к участкам с наименьшими изменениями (рисунок 3.4.4, 3.4.5). Однако, несмотря на это, на территории этих эталонных участков встречается достаточно большое количество изменившихся озер, особенно, увеличившихся – до 10 озер на 1000 км². Наблюдается увеличение площади озер по краям озерных котловин и незначительное сокращение площади небольших озер (рисунок 3.4.10, Приложение: стр. 85–88). Распределены изменившиеся озера неравномерно. Такое увеличение площади озер узкой каймой, отмечавшееся, как и в предыдущих случаях, в районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород, может быть обусловлено процессами термоабразии и термокарста. Уменьшившиеся озера распределены локально и, как правило, вблизи водотоков, на изменение их площади могла повлиять деятельность рек и процессы термоэрозии.

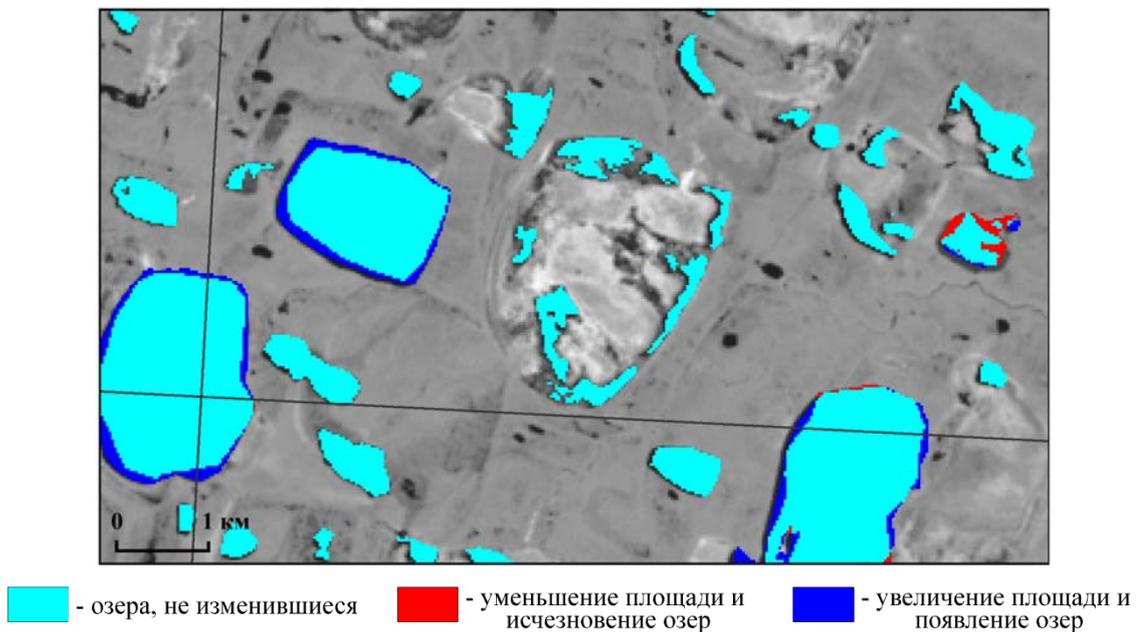


Рисунок 3.4.10. Фрагмент эталонного участка №5 (1974 – 2002 гг.)

На побережье Анадырского залива расположены эталонные участки №7 и №8, один из которых – на побережье залива Креста (эталонный участок №7), а другой – в бассейне реки Анадырь на Анадырской низменности (эталонный участок №8), – единственные эталонные участки Севера Восточной Сибири и Дальнего Востока, на которых не выявлено увеличение

площади озер. На территории этих эталонных участков было отмечено сокращение площади озер под влиянием деятельности рек и зарастания водоемов растительностью (Приложение: стр. 89–92). Наиболее сильное уменьшение площади озер наблюдается в пределах эталонного участка №8 (рисунок 3.4.11).

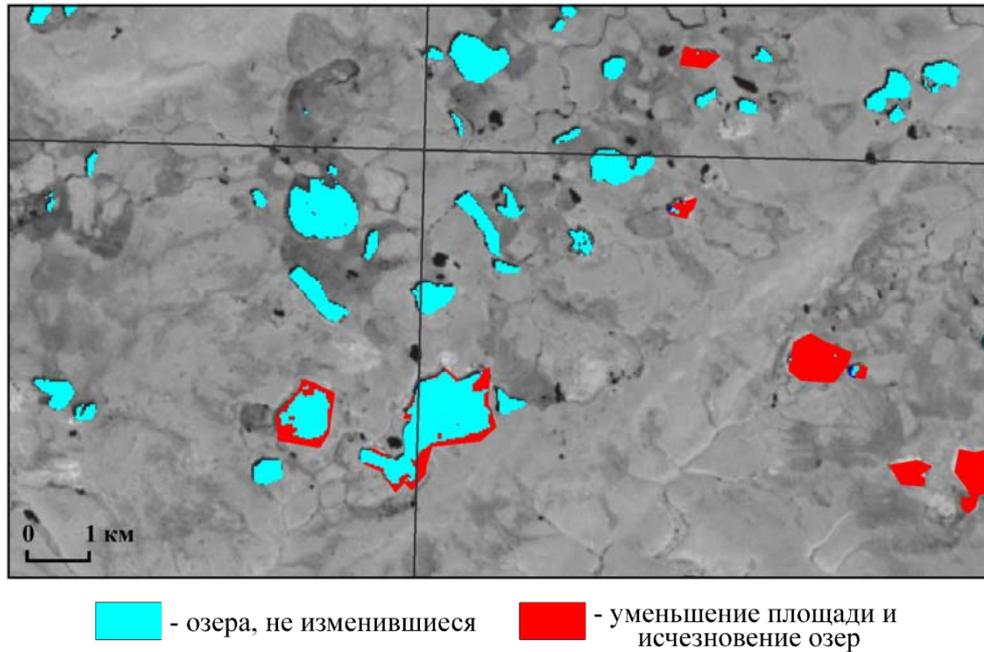


Рисунок 3.4.11. Фрагмент эталонного участка №8 (1974 – 2001 гг.)

В пределах всех проанализированных эталонных участков Севера Восточной Сибири и Дальнего Востока наблюдаются разнонаправленные изменения площади озер. На территории одних из них преобладает процесс увеличения площади озер – на Яно-Индигирской низменности (участки №1 и №2) и на побережье Северного Ледовитого океана (участки №5 и №6), а на территории других – процесс сокращения площади озер – на Колымской низменности (участки №3 и №4) и на побережье Анадырского залива (участки №7 и №8). Наибольшее количество озер, площадь которых уменьшилась, расположено в пределах эталонного участка №8 – до 25 озер на 1000 км², а наибольшее сокращение площади отмечается в пределах эталонного участка №4 – 1,2% от площади участка. Основными причинами сокращения площади в этих районах являются перераспределяющая деятельность рек и водотоков, особенно, когда озера расположены по долинам, и зарастание водоемов растительностью. Наибольшие показатели увеличения площади озер отмечаются на территории Яно-Индигирской низменности, где приращение площади составляет от 0,4% (участок №1) до 1,6% (участок №2) от площади участков. Увеличение площади озер в этом регионе встречается как в дельте реки Яны, так и за ее пределами – в районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород, где расширение площади озер в виде узкой каймы наблюдается по краю озерной котловины. Такое увеличение по краю озерной котловины наблюдается и в

других районах Севера Восточной Сибири – на Колымской низменности, на побережье Северного Ледовитого океана и рассматривается как пример возможного развития процессов термоабразии и термокарста по высокольдистым породам. Наибольшее количество таких озер было зафиксировано в пределах эталонного участка №1, представляющего значительный интерес и исследованного более детально.

Исследование динамики термокарстовых озер на полуострове Широкостан

На фрагмент эталонного участка №1, охватывающий полуостров Широкостан и расположенную к югу от него аласную равнину (назовем его ключевой участок “Широкостан”) (рисунок 3.4.12-а), был проведен дополнительный анализ с привлечением высокодетальных данных: аэрофотоснимков и космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения.

Особое внимание при исследовании динамики термокарстовых озер на территории этого ключевого участка было уделено влиянию тектонических процессов, которое, как правило, исследователями не затрагивается. Лишь единичные исследования указывают на различные изменения озер в пределах положительных и отрицательных структур (Веремеева, 2011).

В пределах рассматриваемого ключевого участка А.В. Гавриловым были выделены положительные и отрицательные морфоструктуры (рисунок 3.4.12-б), относимые к рубежу плейстоцена и голоцена. Согласно тенденциям современного развития территории рассматриваемого ключевого участка выделенная положительная морфоструктура имеет унаследованный характер развития, а отрицательная – в настоящее время меняет направленность вертикальных движений.

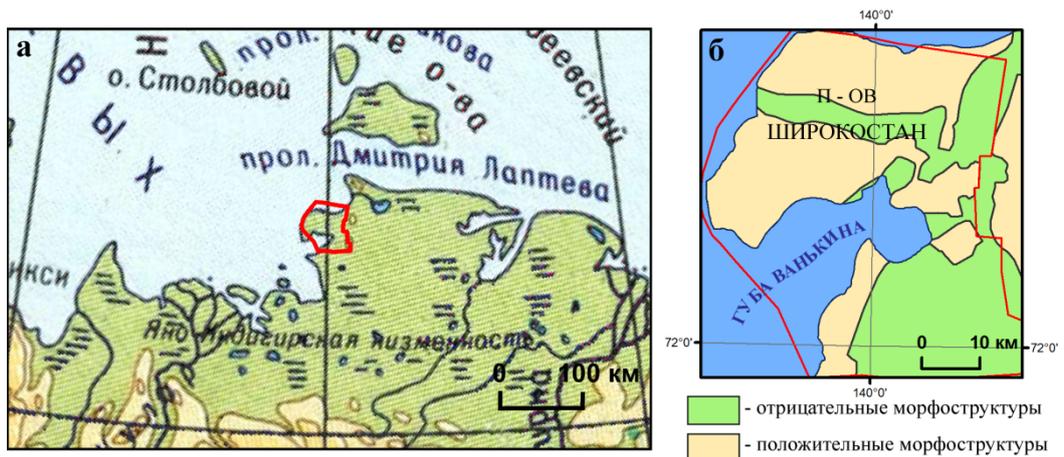


Рисунок 3.4.12. Расположение ключевого участка “Широкостан”

Природные особенности ключевого участка “Широкостан”. Территория эталонного участка относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород и представляет собой равнину, сложенную высокольдистыми отложениями. В эпохи потепления здесь широко были развиты процессы термокарста. Поэтому характерную черту ландшафта

составляют термокарстовые котловины (аласы), расчленяющие исходную равнину, сформировавшуюся в последний ледниковый период и в связи с этим насыщенную мощными подземными льдами. Ледяные жилы вместе с другими внутригрунтовыми льдами составляют 50-90% от объема верхней 30-70 – метровой рыхлой толщи, называемой “ледовым комплексом” (Космические методы геоэкологии, 1998).

Большая часть эталонного участка (45% территории) занята термокарстовым рельефом, представленным первичными и вторичными термокарстовыми котловинами (аласами), а также озерами, занимающими частично или полностью эти котловины (рисунок 3.4.13). Аласы – первичные и вторичные (образовавшиеся в результате термокарста в отложениях первичных аласных котловин) имеют различную глубину. Поверхность ледового комплекса имеет слабоволнистый рельеф, им занято 42% территории. Долинами рек занято 13% территории.

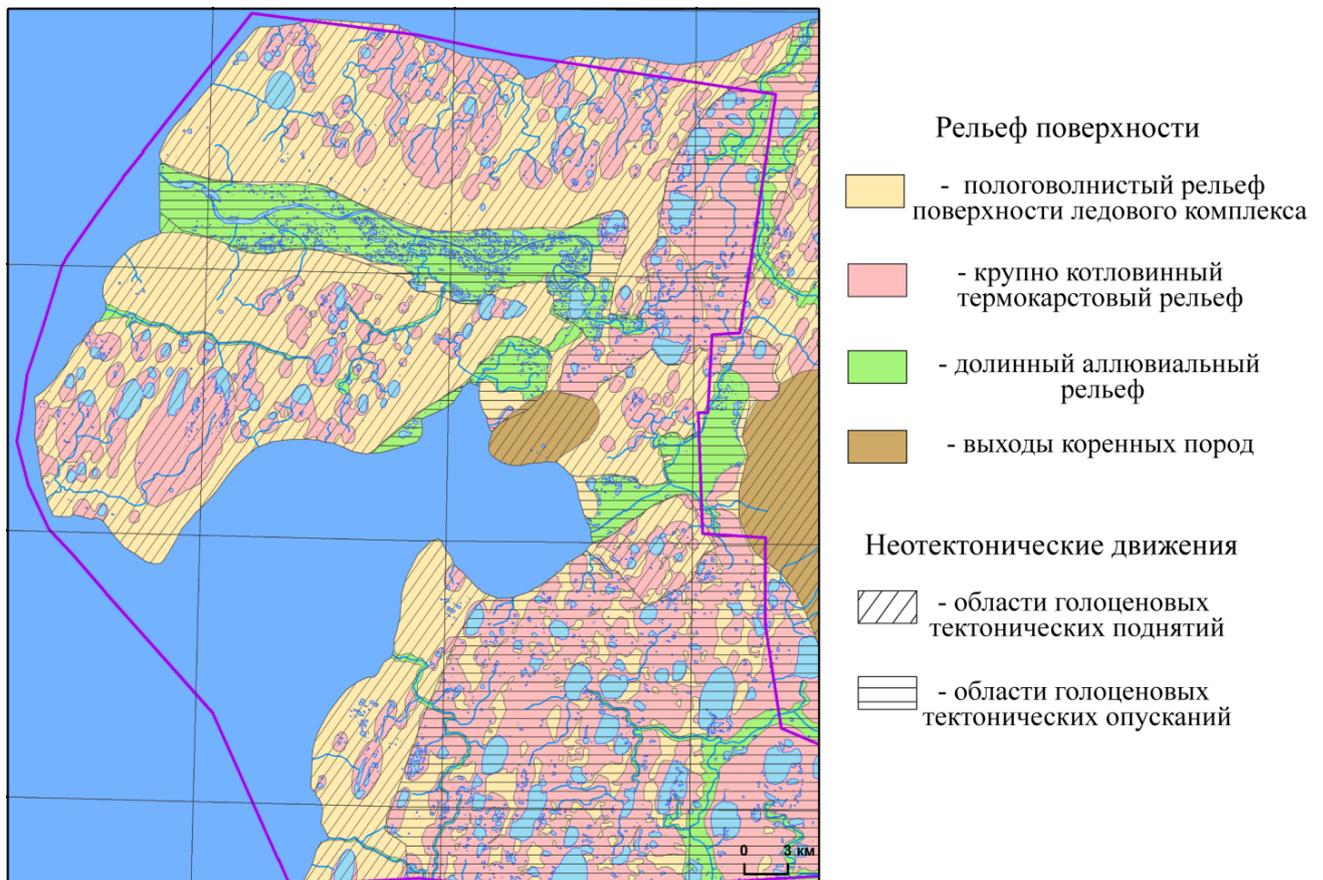
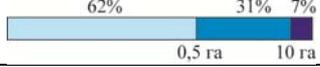
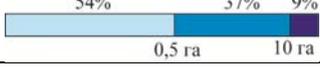
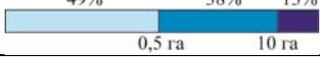
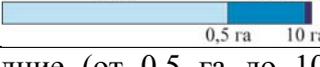


Рисунок 3.4.13. Рельеф поверхности ключевого участка “Широкостан”

Для участка характерна густая сеть озер. Озерность, определяемая долей площади, занятой озерами, составляет 8%, плотность озер – 1,2 озер на км². Преобладают малые озера площадью менее 0,5 га. Они составляют 62% от общего количества озер. На долю средних озер приходится 31%, а на долю крупных, площадью более 10 га – 7% (таблица 3.4.5).

Таблица 3.4.5

Распределение озер на территории ключевого участка “Широкостан”

Площадь района, км ²	Площадь озер, км ²	Озерность района	Количество озер	Плотность озерной сети, озер/км ²	Соотношение озер разного размера*
<i>Вся территория ключевого участка “Широкостан”</i>					
1999	153	8 %	2465	1,2	
<i>Рельеф ледового комплекса</i>					
826	7,4	0,9 %	97	0,1	
<i>Термокарстовый рельеф</i>					
895	125,2	14 %	1105	1,2	
<i>Долины рек</i>					
251	20,4	8 %	1263	5,0	

* - голубой цвет – малые озера (до 0,5 га); синий – средние (от 0,5 га до 10 га); фиолетовый – крупные (более 10 га)

Озера распространены в пределах всего эталонного участка, однако характер распределения озер различается в зависимости от условий рельефа (таблица 3.4.5). Наибольшее количество озер расположено в долинах рек – 51% от их общего количества. Это озера преимущественно не термокарстовые. Особенно выделяется долина реки Чуркун-Юряге с огромным количеством озер. Практически все озера, расположенные в пределах долин – малые, площадью менее 0,5 га, средние озера занимают лишь четвертую часть, а крупные озера с площадью более 10 га встречаются единично. Озерность долин рек в пределах эталонного участка составляет 8%.

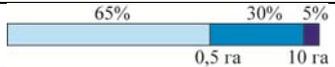
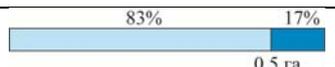
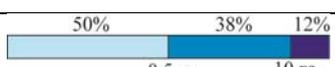
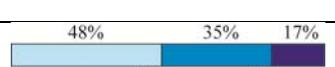
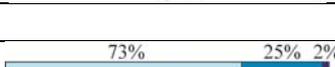
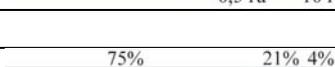
В пределах термокарстовых котловин также расположено большое количество озер – 45%, при этом половину из них занимают средние и крупные озера. По количеству крупных озер термокарстовые котловины лидируют среди остальных форм рельефа. Для термокарстовых котловин характерна наибольшая озерность, которая составляет 14% (таблица 3.4.5).

Меньше всего озер расположено в пределах ледового комплекса – всего 4%, большая часть из них – малые. Для ледового комплекса характерна наименьшая озерность района – 1% (таблица 3.4.5).

Области голоценовых тектонических поднятий и области голоценовых тектонических опусканий, выделенные А.В. Гавриловым (рисунок 3.4.13), занимают соответственно 55% и 45% территории эталонного участка (таблица 3.4.6).

Таблица 3.4.6

Распределение озер на территории ключевого участка “Широкостан”

Площадь района, км ²	Площадь озер, км ²	Озерность района	Количество озер	Плотность озерной сети, озер/км ²	Соотношение озер разного размера*
<i>Области голоценовых тектонических опусканий</i>					
902	109	12 %	1985	2,2	
<i>Рельеф ледового комплекса</i>					
126	0,01	0,01 %	6	0,05	
<i>Термокарстовый рельеф</i>					
545	90	17 %	740	1,4	
<i>Долины рек</i>					
231	19	8 %	1239	5,4	
<i>Области голоценовых тектонических поднятий</i>					
1098	44	4 %	480	0,4	
<i>Рельеф ледового комплекса</i>					
700	7,4	1,1 %	91	0,1	
<i>Термокарстовый рельеф</i>					
350	35,2	10 %	365	1,0	
<i>Долины рек</i>					
20	1,4	8 %	24	1,2	

* - голубой цвет – малые озера (до 0,5 га); синий – средние (от 0,5 га до 10 га); фиолетовый – крупные (более 10 га)

Области тектонических поднятий охватывают в основном ледовый комплекс, на который приходится 65% от их территории, термокарстовые котловины занимают лишь треть этих областей (таблица 3.4.6). Области тектонических опусканий соответствуют в основном термокарстовому рельефу и долинам рек. Участки ледового комплекса также встречаются, но лишь в виде островов между термокарстовыми котловинами и на долю ледового комплекса приходится всего 14% территории областей тектонических опусканий. Наблюдаются различия в количестве озер, их плотности и озерности в этих областях (таблица 3.4.6). Наибольшее количество озер (81% озер) приурочено к областям тектонических опусканий, в то время как на области тектонических поднятий приходится 19% озер. Для областей тектонических опусканий характерна наибольшая плотность озер (2,2 озер на км² против 0,4 озер на км² в областях поднятий) и наибольшая озерность (12% против 4%). В распределении озер разного размера также наблюдаются различия: в областях неотектонических опусканий преобладают малые и средние озера, а в областях поднятия – средние и крупные озера.

Материалы и методика исследования динамики озер ключевого участка “Широкостан”. Дополнительно к уже проанализированным по космическим снимкам со спутника Landsat многолетним изменениям площади озер на эталонном участке №1 с 1972 по 2011 гг. в пределах рассматриваемого эталонного участка были проанализированы многолетние изменения за более длительный период по материалам 1951 г. и 2009 г. Для этого были использованы аэрофотоснимки масштаба 1:60 000 за 9 июля 1951 г. и космический снимок со спутника Landsat-5 за 22 июля 2009 г. В процессе предварительной обработки аэрофотоснимки были трансформированы в проекцию и систему координат космического снимка Landsat. В связи с невозможностью автоматизированного дешифрирования озер по аэрофотоснимкам (из-за наличия бликов) выявление изменений проводилось путем наложения результатов автоматизированного выделения озер по космическому снимку Landsat на аэрофотоснимки в программном пакете Scanex Image Processor и визуального сравнения материалов. Выявленные таким образом изменения были дополнительно проверены и зафиксированы по современным космическим снимкам высокого пространственного разрешения (таблица 3.4.7).

Таблица 3.4.7

Космические снимки, использованные для проверки изменений площади озер

Дата съемки	Съемочная система	Пространственное разрешение
06.07.2009	GeoEye	0.5 м
09.07.2009	GeoEye	0.5 м
17.07.2009	GeoEye	0.5 м
07.07.2010	GeoEye	0.5 м
05.08.2010	GeoEye	0.5 м
18.06.2011	SPOT-4	10 м
03.07.2011	SPOT-4	10 м
19.07.2011	SPOT-4	10 м
26.09.2011	GeoEye	0.5 м
11.07.2012	GeoEye	0.5 м
15.09.2012	SPOT-5	10 м

Результаты исследования динамики озер ключевого участка “Широкостан”. Анализ многолетних изменений площади озер показал в пределах рассматриваемого эталонного участка изменение площади 110 озер (рисунок 3.4.14, таблица 3.4.8, 3.4.9), что составляет 4% от их общего количества. Практически все зафиксированные изменения относятся к крупным и средним озерам (таблица 3.4.10). За последние 60 лет на эталонном участке претерпели изменения 37% всех имеющихся крупных озер, 5% – средних озер и лишь 0,1% – малых озер. Небольшой процент изменения малых озер помимо возможного отсутствия самих изменений следует связывать с ограничениями, накладываемыми пространственным разрешением используемых снимков и недостатками визуального сравнения материалов.

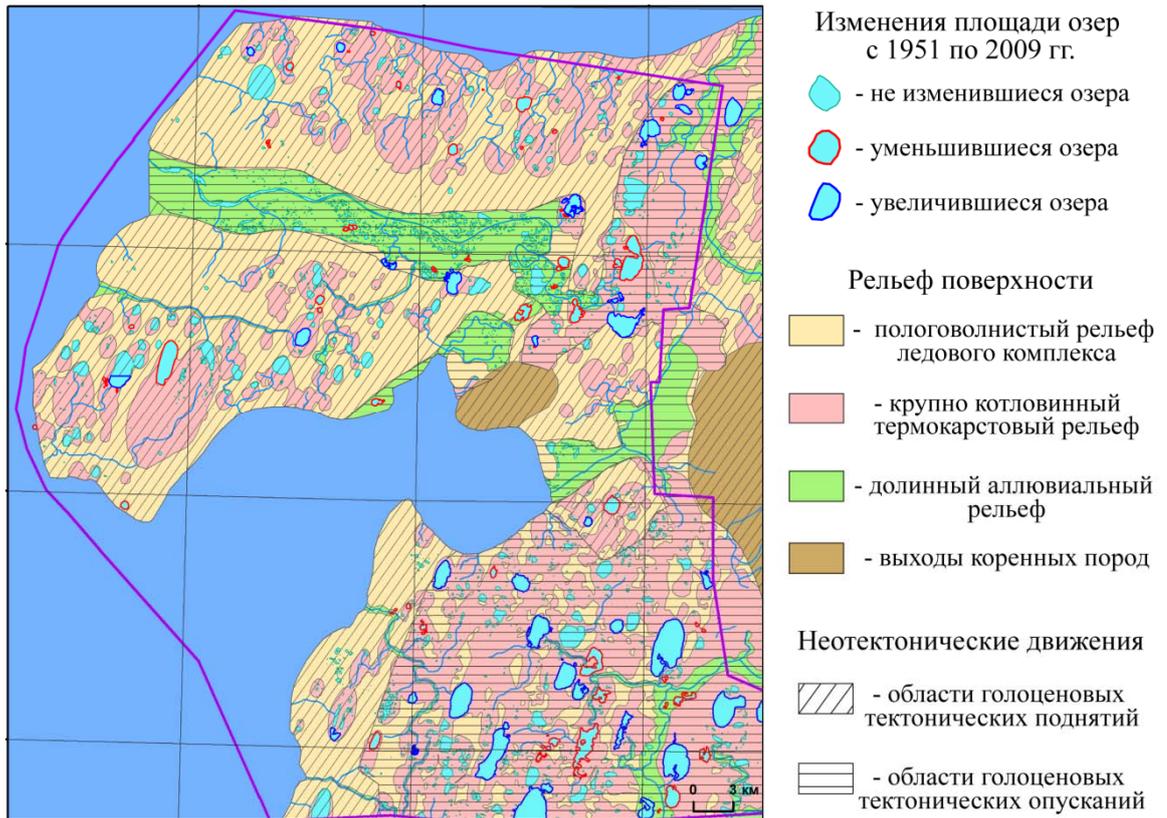


Рисунок 3.4.14. Изменения площади озер с 1951 по 2009 гг. в пределах ключевого участка “Широкостан”

Таблица 3.4.8

Многолетние изменения площади озер с 1951 по 2009 гг.

	Количество изменившихся озер	Изменения площади озер		
		в га	в % от площади озер за первую дату	в % от площади района
<i>Вся территория ключевого участка “Широкостан”</i>				
Общее изменение	110	-441 га	-2,8%	-0,22%
Уменьшение	72	-1323 га	-8,4%	-0,66%
Увеличение	38	+882 га	+5,6%	+0,44%
<i>Рельеф ледового комплекса</i>				
Общее изменение	3	-34 га	-4,4%	-0,04%
Уменьшение	3	-34 га	-4,4%	-0,04%
Увеличение	нет	нет	нет	нет
<i>Термокарстовый рельеф</i>				
Общее изменение	81	+87 га	+0,7%	+0,1%
Уменьшение	47	-751 га	-6,0%	-0,83%
Увеличение	34	+838 га	+6,7%	+0,94%
<i>Долины рек</i>				
Общее изменение	26	-494 га	-19,5%	-1,97%
Уменьшение	22	-539 га	-21,3%	-2,14%
Увеличение	4	+45 га	+1,8%	+0,18%

Таблица 3.4.9

Многолетние изменения площади озер с 1951 по 2009 гг.

	Количество изменившихся озер	Изменения площади озер		
		в га	в % от площади озер за первую дату	в % от площади района
<i>Области голоценовых тектонических опусканий</i>				
Общее изменение	72	-219 га	-2,0%	-0,24%
Уменьшение	42	-1048 га	-9,4%	-1,16%
Увеличение	30	+829 га	+7,5%	+0,92%
<i>Рельеф ледового комплекса</i>				
Общее изменение	нет	нет	нет	нет
Уменьшение	нет	нет	нет	нет
Увеличение	нет	нет	нет	нет
<i>Термокарстовый рельеф</i>				
Общее изменение	50	+204 га	+2,3%	+0,4%
Уменьшение	23	-590 га	-6,7%	-1,08%
Увеличение	27	+794 га	+9,0%	+1,46%
<i>Долины рек</i>				
Общее изменение	22	-423 га	-18,2%	-1,83%
Уменьшение	19	-458 га	-19,7%	-1,98%
Увеличение	3	+35 га	+1,5%	+0,15%
<i>Области голоценовых тектонических поднятий</i>				
Общее изменение	38	-221 га	-4,8%	-0,20%
Уменьшение	30	-275 га	-6,0%	-0,25%
Увеличение	8	+54 га	+1,2%	+0,05%
<i>Рельеф ледового комплекса</i>				
Общее изменение	3	-34 га	-4,4%	-0,05%
Уменьшение	3	-34 га	4,4%	-0,05%
Увеличение	нет	нет	нет	нет
<i>Термокарстовый рельеф</i>				
Общее изменение	24	-117 га	-3,2%	-0,3%
Уменьшение	7	-161 га	-4,4%	-0,46%
Увеличение	4	+44 га	+1,2%	+0,13%
<i>Долины рек</i>				
Общее изменение	4	-71 га	-33,6%	-3,5%
Уменьшение	3	-80 га	-37,9%	-4%
Увеличение	1	+10 га	+4,7%	+0,5%

Таблица 3.4.10

Соотношение размеров озер, изменившихся с 1951 по 2009 гг.

	Общие изменения площади озер	Уменьшение площади озер	Увеличение площади озер
Вся территория			
Области опускания			
Области поднятия			

Наблюдаются разнонаправленные изменения озер с общим преобладанием уменьшения их площади как по количеству озер (у 72 озер площадь уменьшилась, а у 38 озер – увеличилась), так и по площади изменения. Уменьшение площади озер составило 1323 га (– 8,4% относительно площади озер за первую дату), а увеличение – 882 га (+5,6% относительно площади озер за первую дату). Уменьшение площади озер наблюдается как у средних, так и у крупных озер, а увеличение площади – лишь у крупных озер.

Наибольшее количество озер, площадь которых изменилась, расположены в пределах термокарстовых котловин (74% всех изменившихся озер) и по долинам рек (таблица 3.4.14). Уменьшение площади озер при этом наблюдается как в пределах термокарстовых котловин, так и по долинам рек, а увеличение площади – главным образом в пределах термокарстовых котловин. По долинам рек увеличение площади имеет локальный характер.

Изменение площади озер в долинах рек. По долинам рек количество озер, площадь которых уменьшилась, меньше чем в термокарстовых котловинах, однако процесс уменьшения здесь происходит более интенсивно, вплоть до исчезновения озер. Наиболее сильные изменения наблюдаются там, где водотоки пересекают термокарстовые котловины. Основной причиной изменения площади озер здесь является взаимодействие с водотоками. При этом может наблюдаться как уменьшение площади озер (при их дренировании), так и увеличение (за счет поступления воды из реки или соседнего озера). Однако на территории эталонного участка преобладает процесс уменьшения площади озер под влиянием эрозионной деятельности рек. В частности спуск озер может наблюдаться при возникновении и развитии нового водотока (рисунок 3.4.15). На рисунке видно, что в 1951 году водотока, соединяющего озера между собой и с рекой, еще не наблюдается, но с течением времени произошло образование этого водотока, в результате чего вода из озер была спущена.

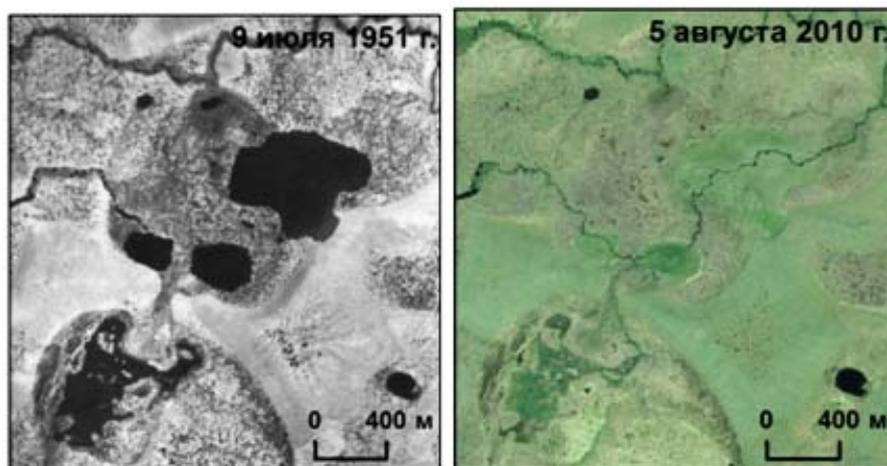


Рисунок 3.4.15. Дренирование озер образовавшимся водотоком

Спуск озер, главным образом, наблюдается в области тектонического опускания, меняющей в настоящее время направленность своего развития. На участках, испытывающих

тенденцию к поднятию, наблюдается активизация эрозионной и термоэрозионной деятельности.

Изменение площади озер в пределах территории распространения термокарстовых котловин. Наибольшее количество озер, площадь которых изменилась, расположено в пределах аласного рельефа. Для аласов характерна разнонаправленная динамика площади озер – площади одних озер уменьшились, а других увеличились. При этом увеличение площади преобладает над уменьшением, несмотря на большее количество озер, площадь которых уменьшилась (так, уменьшение площади 47 озер составило 751 га, а увеличение площади 34 озер – 837 га).

В пределах аласного рельефа выявлены некоторые различия между участками неотектонических поднятий и опусканий. По абсолютным показателям наибольшие изменения, как уменьшение, так и увеличение, зафиксированы на участках опускания. Однако на участках неотектонических опусканий преобладает процесс увеличения площади озер (суммарное увеличение площади составило 794 га, а уменьшение – 590 га), а на участках неотектонических поднятий – процесс уменьшения площади озер (суммарное уменьшение площади составило 161 га, а увеличение – 44 га).

Благодаря использованию снимков очень высокого разрешения в отдельных случаях удается проследить, как меняется поверхность озерной котловины после спуска озера. В результате спуска озера рекой процесс развития термокарста затухает, талые породы подозерного талика начинают промерзать, что сопровождается пучением с образованием булгунняхов или морозобойным растрескиванием с образованием повторно-жильных льдов. На дистанционных материалах высокого пространственного разрешения этот процесс фиксируется по наличию полигонального микрорельефа (рисунок 3.4.16).

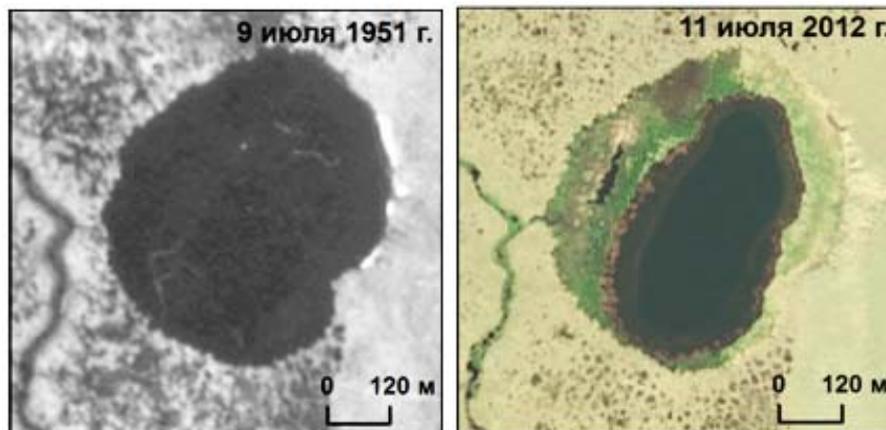


Рисунок 3.4.16. Изменение поверхности озерной котловины после спуска. Полигональный микрорельеф в термокарстовой котловине по периферии остаточного водоема свидетельствует о промерзании бывшего подозерного талика с морозобойным растрескиванием и формированием повторно-жильных льдов

В отдельных случаях прослеживается спуск озер по небольшим каналам, образованным в процессе вытаивания повторно-жильных льдов или в процессе термоэрозии. На рисунке 3.4.17 в юго-восточной части озера виден небольшой канал, образовавшийся по вытаявшей жиле льда. Вероятно, именно по этому каналу некоторая часть воды из озера была спущена в алас, расположенный гипсометрически ниже рассматриваемого озера. В результате этого, уровень воды в озере упал, а мелководные части озера по его краям осушились.

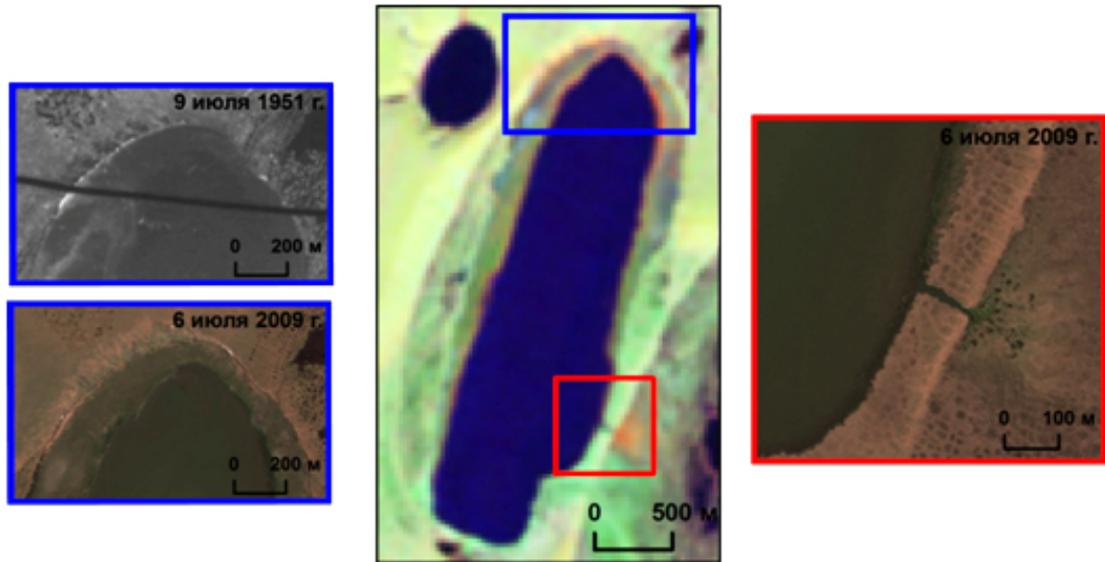


Рисунок 3.4.17. Частичный спуск озера по небольшому каналу

Увеличение площади озер в пределах термокарстовых котловин зафиксировано у крупных озер площадью более 10 га. Основная масса таких озер сконцентрирована на участках неотектонического опускания на юго-востоке исследуемого района (см. рисунок 3.4.14, 3.4.18).

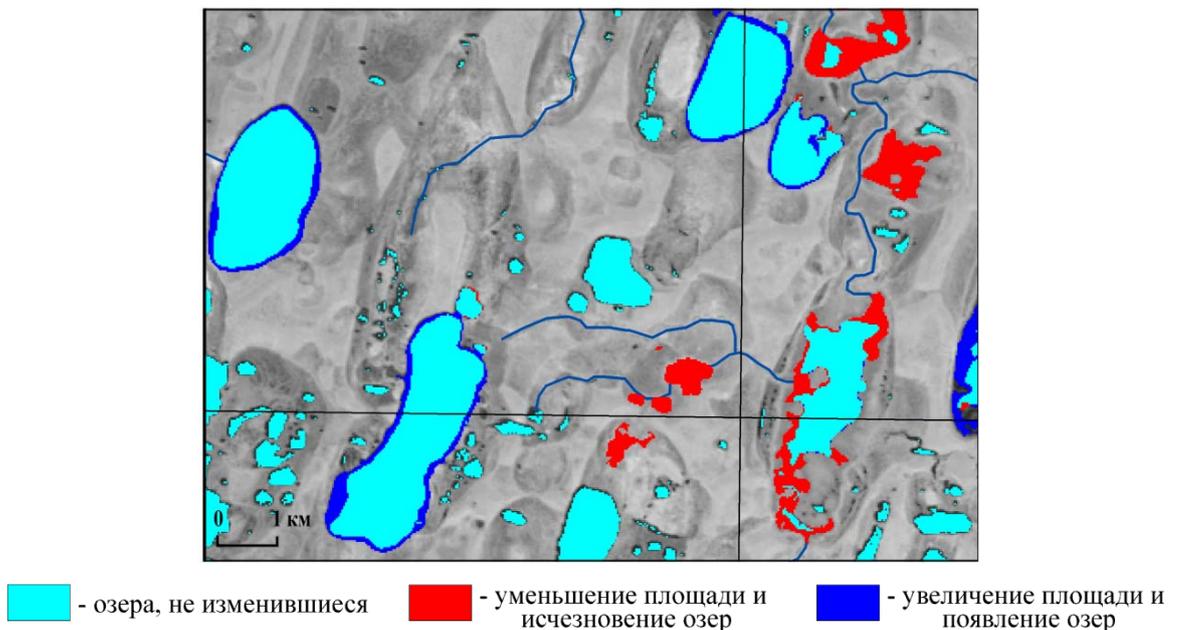


Рисунок 3.4.18. Фрагмент ключевого участка “Широкостан” (1951 – 2009 гг.)

Для этих озер характерно увеличение площади со всех или с одной стороны озера, захватывающее полигональный микрорельеф прибрежной территории (рисунок 3.4.19). В качестве причины такого увеличения площади озер следует рассматривать вытаивание полигонально-жильных льдов за счет процессов термокарста и термоабразии.

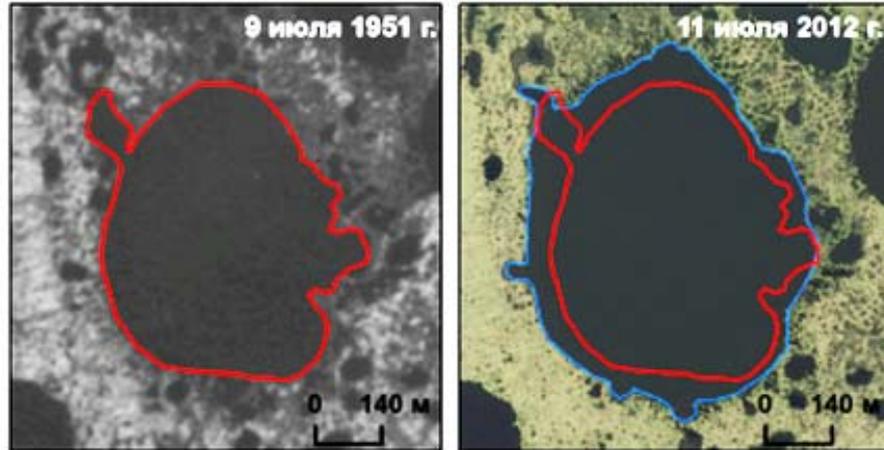


Рисунок 3.4.19. Увеличение площади озера за счет вытаивания полигонально-жильных льдов

Важно отметить, что вытаивание полигонально-жильных льдов наблюдается на озерах, целиком расположенных в пределах аласов, лишь некоторые из увеличившихся озер имеют рядом со своим берегом останцы ледового комплекса. В связи с этим можно предположить, что вытаивают современные полигонально-жильные льды, сформированные уже после образования аласов, или полигонально-жильные льды ледового комплекса, не протаявшие полностью под былыми термокарстовыми озерами. В результате, после спуска воды из озер талые породы начали промерзать и подвергаться криогенному растрескиванию. А в настоящее время наблюдается деградация вновь образованных полигонально-жильных льдов вдоль берегов озер и увеличение площади озер. Вытаивание льдов при этом наблюдается лишь у крупных озер, имеющих большие запасы воды, отепляющее воздействие которой может способствовать таянию льдов. Для них же наиболее вероятно воздействие волнового фактора и, как следствие, – расширение акватории вследствие термоабразии.

Изменение площади озер в пределах территории распространения ледового комплекса. В пределах территории распространения ледового комплекса не было установлено существенных изменений площади озер, наблюдаются изменения лишь трех озер, площади которых сократились. Все три озера расположены в области неотектонического поднятия. Одно из этих озер было спущено рекой и представляет собой очередной пример развития затухающего термокарста (рисунок 3.4.20). На рисунке отчетливо видно, что останцы осадочной породы, когда-то вмещавшей повторно-жильные льды, практически не переработаны водой, что, вероятно, может быть обусловлено небольшой глубиной существовавшего озера или относительной молодостью термокарстовой котловины.

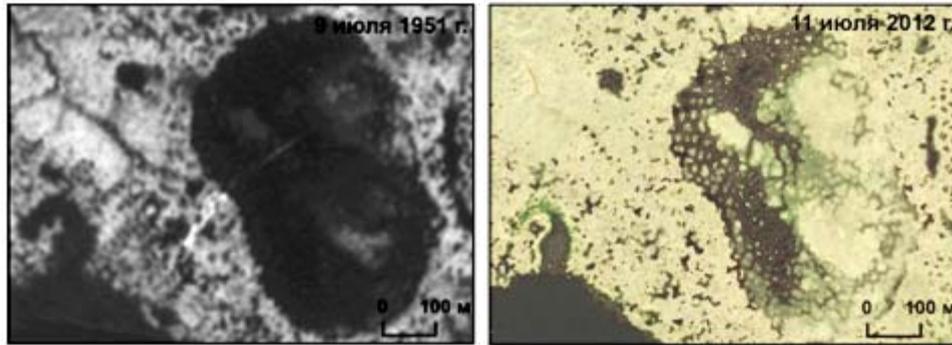


Рисунок 3.4.20. Спущенное озеро в пределах ледового комплекса

Два других изменившихся озера были спущены в море Лаптевых (рисунок 3.4.21, рисунок 3.4.22). Оба озера располагались в непосредственной близости от побережья и были спущены под влиянием термоабразии со стороны моря. На месте первого из них сохранилась термокарстовая котловина (рисунок 3.4.21), второе вместе с прилегающим побережьем было полностью переработано морем (рисунок 3.4.22).

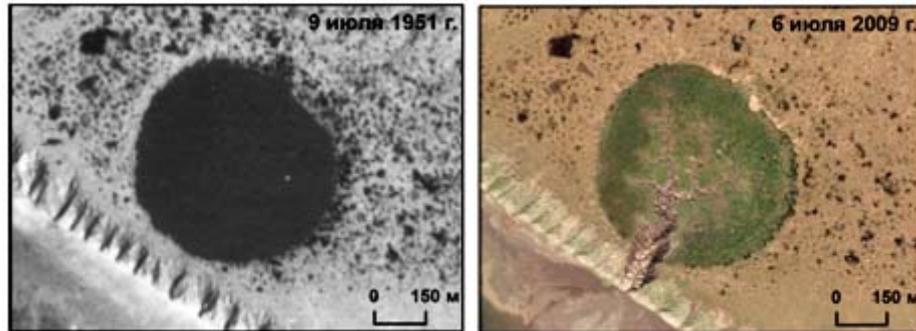


Рисунок 3.4.21. Озеро, спущенное в море в результате образования оврага по повторно-жильным льдам

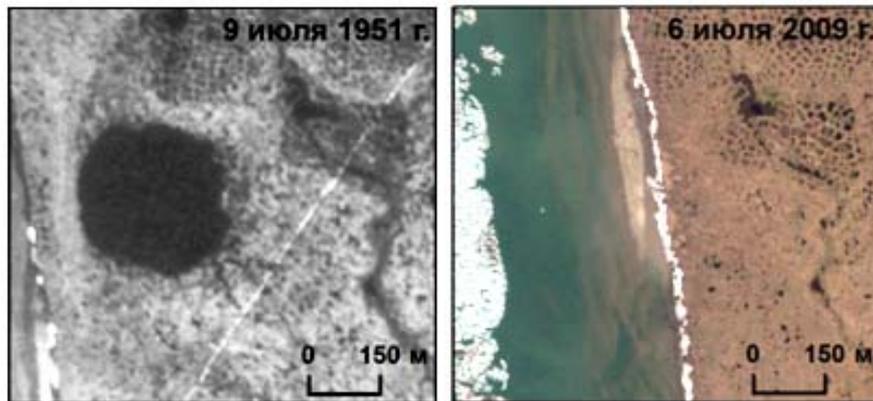


Рисунок 3.4.22. Озеро, спущенное в море в результате отступления берега моря

Дополнительно были визуально проанализированы изменения малых озера в пределах ледового комплекса по аэрофотоснимкам за 9 июля 1951 г. и космическим снимкам со спутника GeoEye за 11 июля 2009 г. Космические снимки со спутника Landsat не позволяют зафиксировать изменения малых озера площадью менее 0,4 га вследствие низкого пространственного разрешения этих снимков. Появление же небольших озера в пределах ледового комплекса могло бы рассматриваться как признак активизации термокарста под

влиянием современного глобального потепления климата. Однако визуальный анализ изменений площади имевшихся там озер показал сокращение и исчезновение некоторых из них (рисунок 3.4.23). Спуск воды из таких озер, расположенных на участках неотектонического поднятия, вероятно, происходит по ложбинам стока, заложенным по межполигональным понижениям (морозобойным трещинам), поэтому накопления воды и развития термокарста не наблюдается: когда-то начавшись, он затухает. Продолжающееся в настоящее время поднятие территории обеспечивает дренаж водоразделов. Таким образом, даже относительно крупные массивы и останцы ледового комплекса в пределах ключевого участка исследования дренированы реками и ложбинами стока, что препятствует скапливанию водных масс и развитию новых термокарстовых озер.

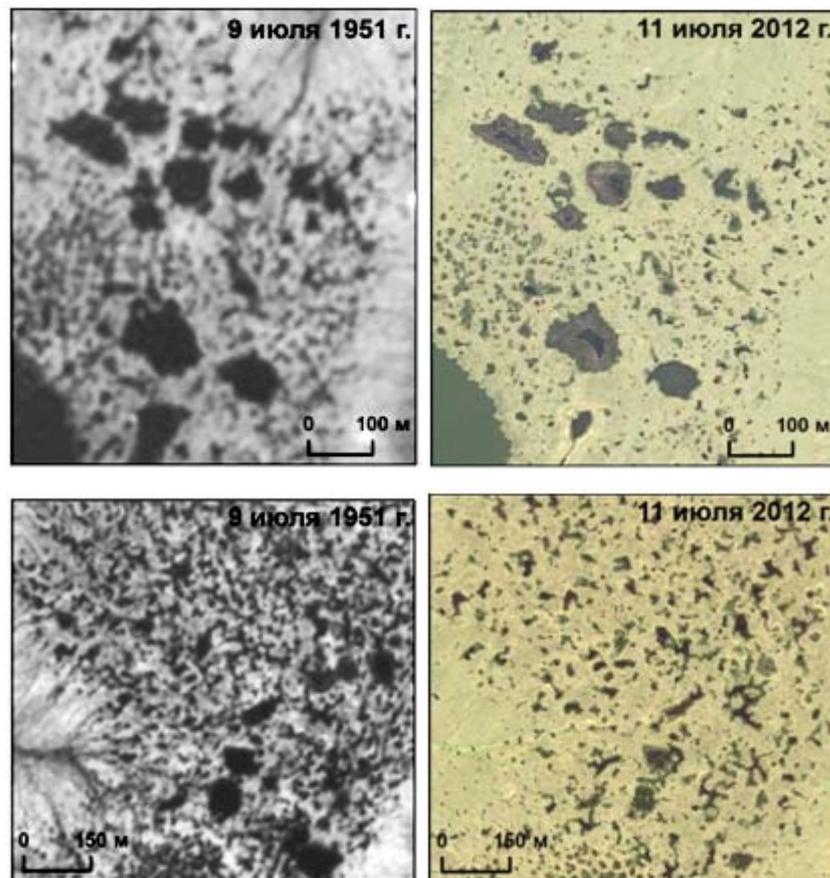


Рисунок 3.4.23. Сокращение площади малых озер в пределах ледового комплекса

В результате анализа многолетних изменений площади термокарстовых озер на территории ключевого участка “Широкостан” установлена разнонаправленная динамика их площади. Преобладает процесс уменьшения площади озер под влиянием эрозионной деятельности рек, особенно по долинам рек и в пределах термокарстовых котловин. Увеличение площади озер, обусловленное активизацией процесса термокарста по полигонально-жильным льдам, наблюдается лишь у крупных озер, расположенных в пределах крупно котловинного термокарстового рельефа.

Полученный нами результат отличается от вывода Т.Н. Каплиной (2009), которая отмечает, что в настоящее время рельеф приморских низменностей находится в состоянии, близком к равновесному, и термокарст на территории Северной Якутии практически не развивается. Несмотря на преобладающий процесс сокращения площади озер, на территории полуострова Широкостан была выявлена активизация термокарста в крупных озерах, расположенных в пределах аласного рельефа на участках тектонических опусканий. Активизация термокарстового процесса не наблюдается лишь в пределах ледового комплекса, который представляет собой дренированные массивы и останцы едомы, где не скапливается вода, в связи с чем возникновение на них новых термокарстовых озер затруднено или даже невозможно, что отмечается и другими исследователями (Каплина, 2011).

Проведенное детальное исследование показывает, что многолетнюю динамику термокарстовых озер необходимо рассматривать также с учетом современной тектоники территории. Озерам, расположенным в положительных морфоструктурах, свойственна относительная стабильность, в отрицательных – изменчивость с преобладанием процесса увеличения площади озер.

3.5. Центральная Якутия

Природные особенности района. Озерно-аллювиальная аккумулятивная Центральная якутская низменная равнина представляет собой плоскую поверхность, абсолютные высоты которой изменяются в пределах 150–250 м, относительные превышения от 5 до 30 м. Окраинные участки расположены несколько выше и местами достигают 300–400 м. Территория Центральной Якутии находится в области развития мезозойских отложений и особенностью геологических условий региона является преимущественное развитие осадочных пород, что обусловлено его положением, в основном в пределах морфоструктур с устойчивым опусканием в мезозое и кайнозое (Геокриология СССР, 1989). На значительной части территории аллювиальные равнины перекрыты верхнечетвертичными озерно-болотными осадками (пески, супеси, торф).

Климат Центральной Якутии определяется ее географическим положением в сравнительно высоких широтах и удалением от теплых морей. Климат суровый (средняя годовая температура воздуха -10° , -12°C), резко континентальный, что проявляется в больших годовых колебаниях температур (80 – 100°C). Основным фактором, влияющим на состояние атмосферы, является мощный и устойчивый зимний сибирский антициклон (Босиков, 1991). Зима в Центральной Якутии – самое продолжительное время года. Температура воздуха в декабре, январе понижается до -50° , -60°C . Лето отличается большим притоком солнечного тепла, усилением циклонической деятельности и увеличением атмосферных осадков. Средняя температура июля на западе территории составляет 14° – 16°C , а в районах Якутска – выше 18°C .

Среднегодовое количество осадков на территории Центральной Якутии колеблется от 250 до 300 мм. Наименьшее количество осадков выпадает зимой (50–70 мм). Район города Якутска является наиболее засушливым во все сезоны года.

В связи с невысоким гипсометрическим положением, небольшим количеством атмосферных осадков и малой дренированностью негустой гидрографической сетью Центральная Якутия представляет собой область с небольшим поверхностным стоком. Для низменности характерно широкое развитие аласов – термокарстовых котловин с остаточными озерами разной величины. Помимо непосредственно термокарстовых озер выделяют также озера: пойменные, эрозионно-термокарстовые, карстовые и озера от-юряхов (травяных речек). Кроме пойменных, все озера имеют главным образом снеговое и дождевое питание (Босиков, 1991) и поддерживаются водоупорным слоем многолетне-мерзлых пород (Суходровский, 1979).

Территория расположена в зоне северной, преимущественно лиственничной тайги. Она отличается от других таежных территорий засушливым холодным климатом, включением в

лиственничную тайгу лугово-лесостепных и лугово-болотно-лесных ландшафтов и сыпучих песков. Степные виды растений достигают 35% от общего состава растительности. Растительность аласов представляет совершенно уникальные сообщества – солончаковые и гликофитные луга, травяные болота, прибрежно-водные группировки, степи.

Центральная Якутия входит в область распространения многолетнемерзлых пород, сплошность которых прерывается только под крупными реками и озерами. Мощность этих пород увеличивается с юга на север. Наибольших значений она достигает на возвышенных пространствах в северных районах (480–500 м). На Лено-Амгинском междуречье в районе р. Улан-Тарын она уменьшается до 15–30 м. На правом берегу Вилюя достигает 300–500 м, а в районе устья Вилюя 100–200 м.

Основную массу подземных льдов составляют повторно-жильные льды (*ПЖЛ*). ПЖЛ очень широко распространены на межаласье. Жилы льда чаще всего развиты в толще пылевато-суглинистых грунтов. Такого рода горизонт, насыщенный жилами льда, более или менее единый и плащевидно залегающий на обширных участках, но неоднородный по возрасту, составу, генезису и мощности обычно трактуется как ледовый комплекс. Ледовый комплекс прорывают термокарстовые котловины и участки, на которых жилы льда не образовались или возникли в очень ограниченных размерах.

На территории Лено-Амгинского междуречья наибольшие глубины верхней поверхности ледового комплекса приурочены, во-первых, к наиболее низким элементам межаласья, во-вторых, к участкам, затронутым начальными стадиями термокарста. Наименьшие глубины залегания ледового комплекса приурочены к наиболее повышенным (относительно) элементам межаласья и к участкам с небольшой глубиной сезонного протаивания (Соловьев, 1959).

Предшествующие исследования. В 2009 г. В.И. Кравцовой и А.Г. Быстровой были проанализированы по разновременным космическим снимкам изменения площади термокарстовых озер в долине реки Вилюй с 1976 по 2000 гг. В результате ими было выявлено появление большого количества новых озер и увеличение площади существующих. Такое увеличение площади озер авторы связывали с возможной активизацией термокарстового процесса под влиянием наблюдаемого потепления климата.

Обзор работ по изучению динамики термокарстовых озер Центральной Якутии показал, что ряд ученых (Семенович, 1935; Егоров, 1942; Ефимов, 1950; Шнитников, 1950; Соловьев, 1952; Немчинов, 1958; Соловьев, 1961; Босиков, 1991) исследовали вопрос изменения площади озер, начиная с середины XX века, когда проблема глобального потепления климата еще не стояла с такой остротой. Естественная периодичность в водном режиме озер Центральной

Якутии, подмеченная местным населением, привлекала внимание исследователей (Соловьев, 1952, 1961; Немчинов, 1958; Босиков, 1991), которыми были выделены фазы обводнения (маловодья и многоводья) в режиме озер (таблица 3.5.1). Различия между выделенными разными исследователями фазами состоят главным образом в дробности деления фаз. Помимо этого все исследователи указывают, что наблюдаемая периодичность режима озер обусловлена внутривековыми колебаниями климата, то есть изменениями климатических характеристик, среди которых наиболее важны атмосферные осадки и температура воздуха.

Таблица 3.5.1

Фазы обводнения озер Центральной Якутии, выделенные разными исследователями

Фазы обводнения	А.Г. Немчинов, 1958	П.А. Соловьев, 1961	Н.П. Босиков, 1991
маловодье	1888-1900	1890-1900	1891-1901
многоводье	1901-1918	1901-1914	1902-1917
маловодье	1920-1931	1915-1947	1918-1930
многоводье	1934-1940		1931-1934
маловодье	1941-1945		1935-1950
многоводье	1946		
маловодье	1947-1949		
многоводье	1950-...	1948-...	1951-1973
маловодье			1974-1980
многоводье			1981-1984
маловодье			1985-1990

Таким образом, периодичность изменения режима озер Центральной Якутии отмечается рядом исследователей и выявленное В.И. Кравцовой и А.Г. Быстровой (2009) увеличение площади озер могло быть обусловлено этой периодичностью.

Эталонные участки. С целью выявления причин наблюдаемого увеличения площади озер на территории Центральной Якутии в пределах двух эталонных участков нами было проведено детальное исследование изменений площади озер (рисунок 3.5.1). Оба исследованных эталонных участка расположены в зоне сплошного распространения мерзлоты (рисунок 3.5.2). Эталонный участок №1 охватывает долину р. Вилюй в ее нижнем течении, а эталонный участок №2 находится на территории Лено-Амгинского междуречья.

Характеристика сети озер эталонных участков представлена в таблице 3.5.2. Для обоих участков эти характеристики примерно одинаковы. Различия лишь в том, что на территории эталонного участка №1 встречается несколько больше крупных озер площадью более 10 га, а на территории эталонного участка №2 плотность озер несколько больше. Озерность обоих участков одинакова и составляет 5%.

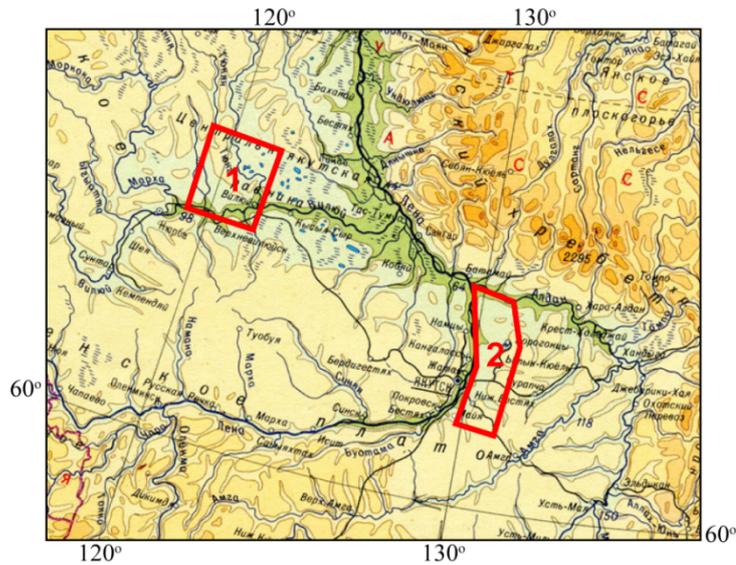


Рисунок 3.5.1. Расположение эталонных участков на территории Центральной Якутии: 1 – на левобережье Вилюя, 2 – на территории Лено-Амгинского междуречья

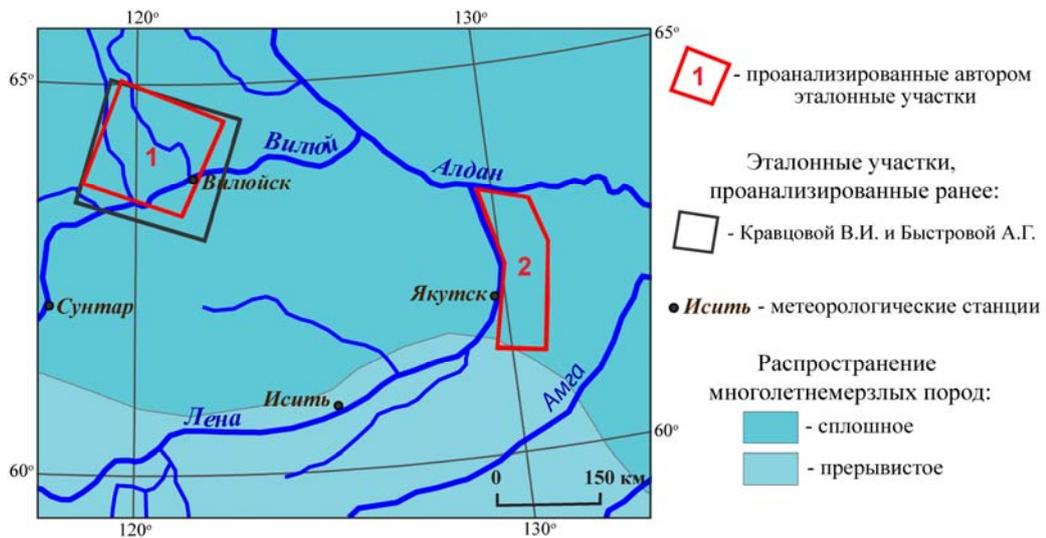


Рисунок 3.5.2. Расположение эталонных участков на территории Центральной Якутии

Таблица 3.5.2

Характеристика сети озер эталонных участков по современным космическим снимкам со спутника Landsat

№ эталонного участка	Площадь участка, км ²	Общее количество озер	Плотность озер*	Общая площадь озер, км ²	Озерность района**, %	Соотношение озер разного размера***						
1	22784	18242	0,8	1250	5	<table border="1"> <tr> <td>53%</td> <td>34%</td> <td>12%</td> </tr> <tr> <td colspan="3">0,5 га 10 га</td> </tr> </table>	53%	34%	12%	0,5 га 10 га		
53%	34%	12%										
0,5 га 10 га												
2	15306	18371	1,2	812	5	<table border="1"> <tr> <td>52%</td> <td>41%</td> <td>7%</td> </tr> <tr> <td colspan="3">0,5 га 10 га</td> </tr> </table>	52%	41%	7%	0,5 га 10 га		
52%	41%	7%										
0,5 га 10 га												

* - количество озер на 1 км²

** - доля площади водной поверхности озер от общей площади участка

*** - голубой цвет – малые озера (до 0,5 га); синий – средние (от 0,5 га до 10 га); фиолетовый – крупные (более 10 га)

Материалы и методика исследования. Многолетние изменения площади озер на территории эталонного участка № 1, как и в других обследованных регионах, были

проанализированы по паре разновременных космических снимков со спутника Landsat, по снимкам за 1973 и 2009 гг. (таблица 3.5.3). Для эталонного участка №2, ввиду отсутствия космических снимков со спутника Landsat 1970-х и 1980-х годов, такая возможность отсутствовала. Поэтому вместо снимка со спутника Landsat за первую дату были использованы космические снимки, полученные с разведывательного спутника Corona (KH-4b) (таблица 3.5.3). Ввиду небольшого охвата территории этими снимками, а также сложностей, связанных с геометрической коррекцией и отсутствием возможности автоматизированного выделения озер, изменение площади озер было проанализировано на ограниченной территории эталонного участка (рисунок 3.5.3). По этой же причине, количество проанализированных озер на территории этого эталонного участка оказалось значительно меньше (таблица 3.5.4) по сравнению с общим количеством озер, выделенных в пределах всего эталонного участка (таблица 3.5.2).

Таблица 3.5.3

Космические снимки, использованные для анализа многолетних изменений площади озер

№ эталонного участка	Дата съемки	Съемочная система	Пространственное разрешение, м	Path/Row
1	24_07_1973	Landsat-1 MSS	80	139/015
	24_08_2009	Landsat-5 TM	30	128/015
2	20_09_1967	KH-4b (Corona) J-1	1.8	DS1101-1068DF034_a DS1101-1068DA041_d DS1101-1068DA042_c DS1101-1068DA043_c
	02_08_2007	Landsat-5 TM	30	121/016; 121/017

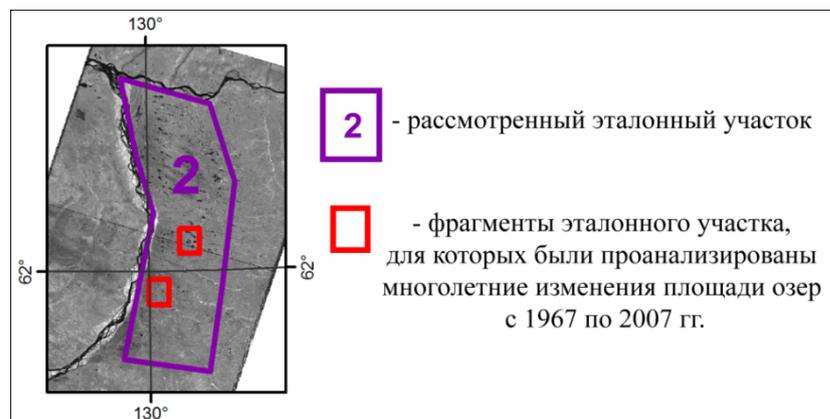


Рисунок 3.5.3. Расположение проанализированных фрагментов в пределах эталонного участка №2

Таблица 3.5.4

Характеристика сети озер, проанализированных по современным космическим снимкам со спутника Landsat на эталонных участках

№ эталонного участка	Количество проанализированных озер	% проанализированных озер от их общего количества	Общая площадь проанализированных озер	% общей площади проанализированных озер от общей площади всех озер
1	4833	26	1160	93
2	933	5	49	6

Несмотря на некоторые отличия материалов, использованных при анализе эталонного участка №2, методика анализа изменений площади озер была аналогична той, что использовалась при анализе изменений площади озер всех остальных регионов. По совмещенным разновременным снимкам определялось изменение площади каждого конкретного озера, проводился отбор озер с величиной изменения, превышающей величину среднеквадратической погрешности определения площади озер, а в заключение осуществлялся визуальный контроль выявленных изменений.

Результаты исследования. В результате проведенного исследования в пределах каждого эталонного участка было определено количество озер, площадь которых уменьшилась, количество озер, площадь которых увеличилась и изменение площади озер в км² (таблица 3.5.5, рисунок 3.5.4). Все полученные показатели также были подсчитаны относительно площади эталонных участков и приведены в виде графиков (рисунок 3.5.5, 3.5.6).

Таблица 3.5.5

Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков

№ эталонного участка	Площадь участка, км ²	Количество уменьшившихся озер	Изменение площади уменьшившихся озер, км ²	Количество увеличившихся озер	Изменение площади увеличившихся озер, км ²
1	22784	318	-120	1287	+285
2	654	25	-0,6	621	+24



Рисунок 3.5.4. Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков

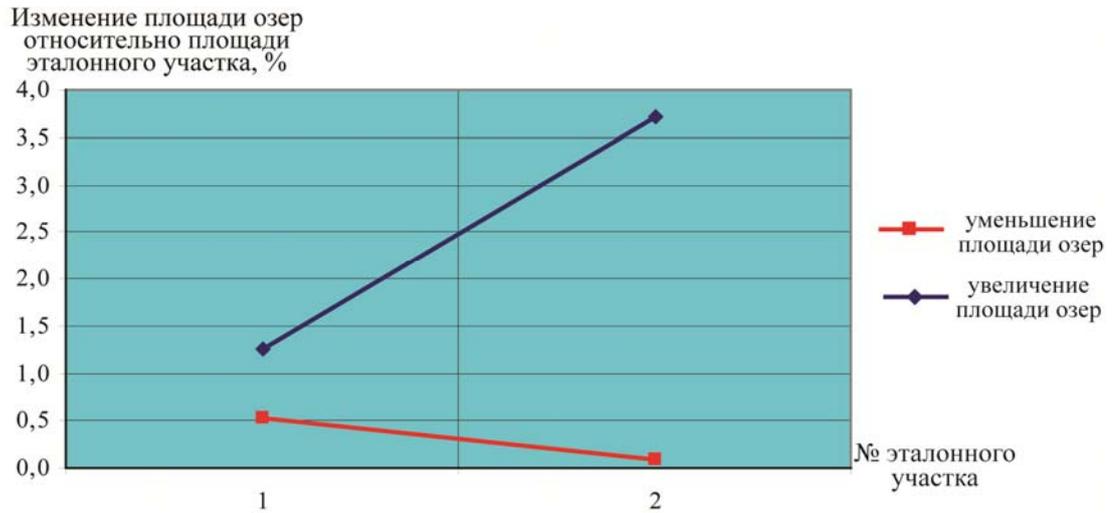


Рисунок 3.5.5. Изменение площади озёр относительно площади эталонных участков

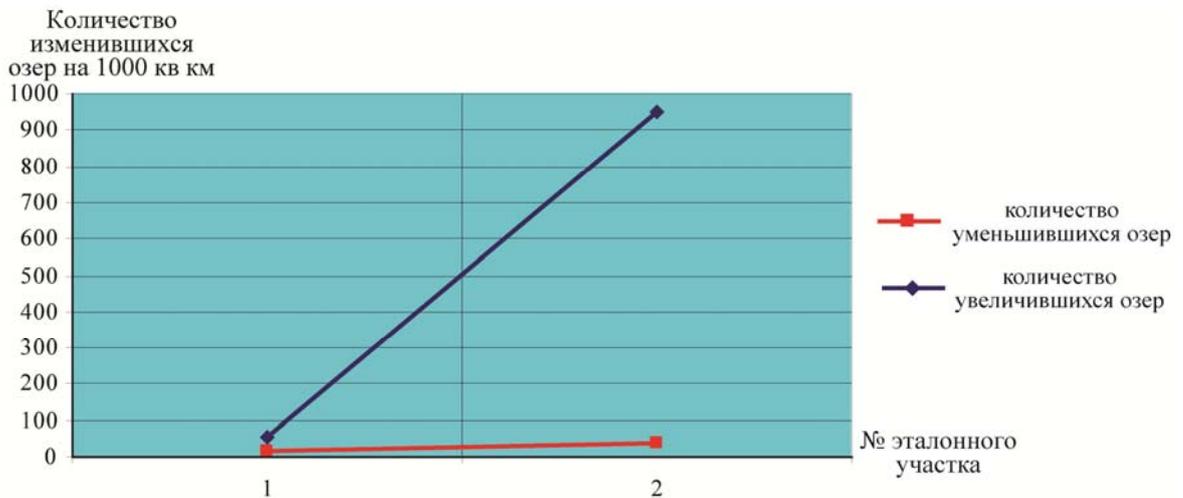


Рисунок 3.5.6. Количество изменившихся озёр в пределах эталонных участков

Анализ изменений площади озёр на территории Центральной Якутии в рассмотренный период показал значительное увеличение площади озёр в пределах обоих эталонных участков. Процесс увеличения площади озёр значительно преобладает над процессом ее сокращения, как по количеству озёр (рисунок 3.5.6), так и по изменению площади (рисунок 3.5.5). Озера, у которых отмечается увеличение площади, распределены повсеместно в пределах обоих эталонных участков (рисунок 3.5.7-А, приложение: стр. 94, 95, 98–101).

Наибольшее же количество озёр, у которых зафиксировано сокращение площади, отмечены на территории эталонного участка №1, где эти озера расположены по долинам рек или соединены водотоками (рисунок 3.5.7-Б, приложение: стр. 96, 97). В качестве основной возможной причины сокращения площади озёр здесь следует рассматривать деятельность этих водотоков.

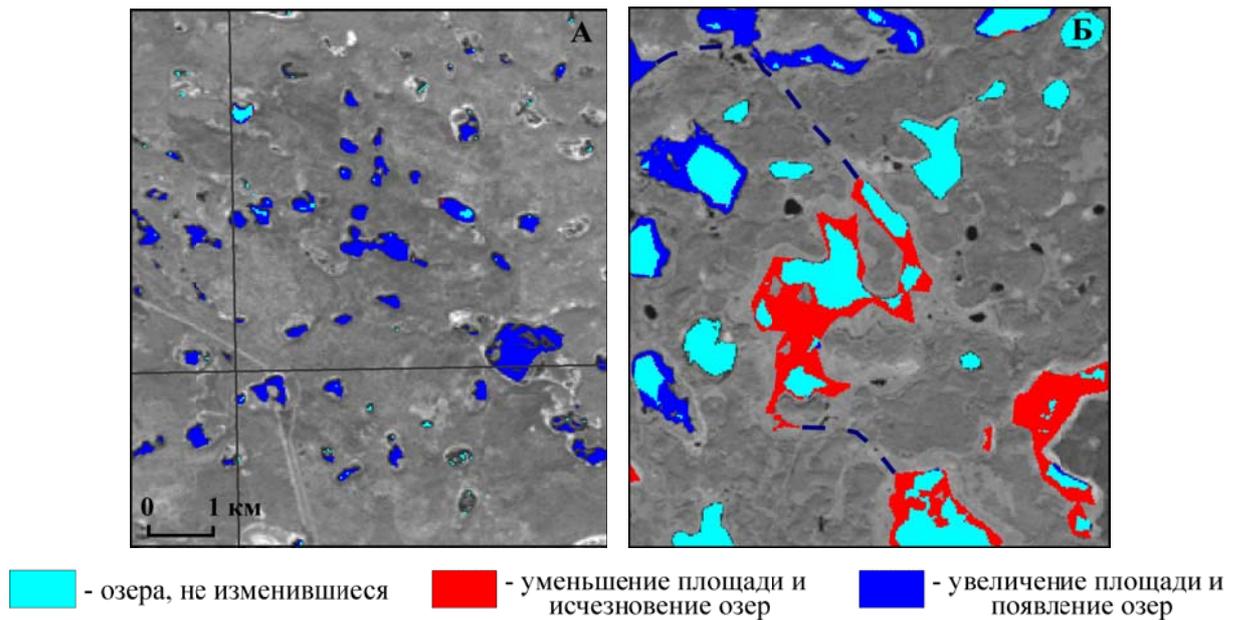


Рисунок 3.5.7. Фрагменты эталонных участков: А - №2 (1967 – 2007 гг.), Б - №1 (1973–2009 гг.)

Как указывает ряд исследователей (Немчинов, 1958; Соловьев, 1961, Босиков, 1991), при изучении динамики термокарстовых озер на территории Центральной Якутии немаловажное значение имеет анализ метеорологических характеристик, поэтому для выявления возможной причины повсеместного увеличения площади озер в работе были рассмотрены изменения температуры воздуха и атмосферных осадков. Использованы были данные с 1948 по 2008 гг., полученные с двух метеостанций: Вилуйск, расположенной в пределах эталонного участка №1 и Якутск, расположенной в пределах эталонного участка №2.

Для обеих станций приведены графики годовых сумм атмосферных осадков (рисунок 3.5.8, 3.5.9) и среднегодовой температуры воздуха (рисунок 3.5.12, 3.5.13) за рассматриваемый период. Помимо этого на основе представленных данных были построены графики шестилетних скользящих (рисунок 3.5.10, 3.5.11, 3.5.14, 3.5.15), позволяющие осреднить данные и увидеть характер изменения рассматриваемых характеристик. Вычислены средние многолетние значения за период наблюдений: для станции Вилуйск среднемноголетнее значение годовых атмосферных осадков составило 261 мм, для станции Якутск – 231 мм; среднемноголетнее значение среднегодовой температуры воздуха для Вилуйска составило – 8,9°C, для Якутска –9,7°C.

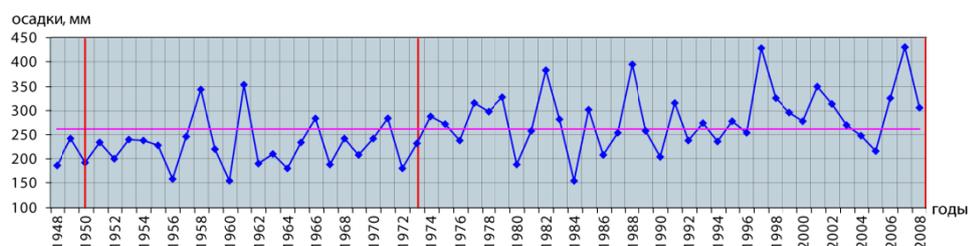


Рисунок 3.5.8. График годовых сумм осадков по станции Вилуйск

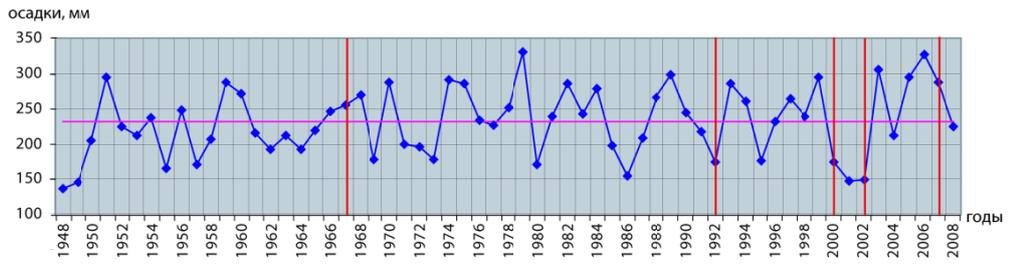


Рисунок 3.5.9. График годовых сумм осадков по станции Якутск

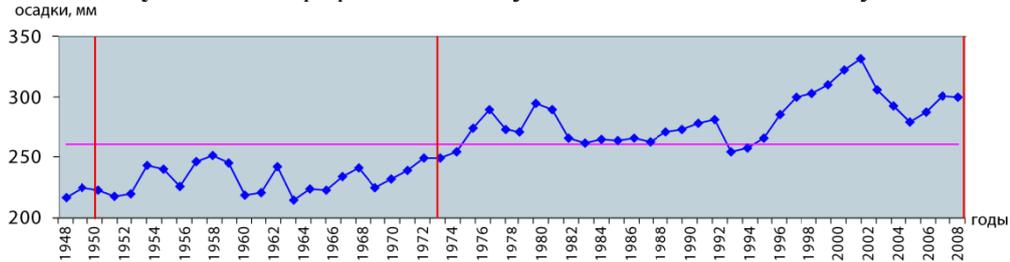


Рисунок 3.5.10. График скользящих 6-летних значений годовых сумм осадков по станции Вилюйск

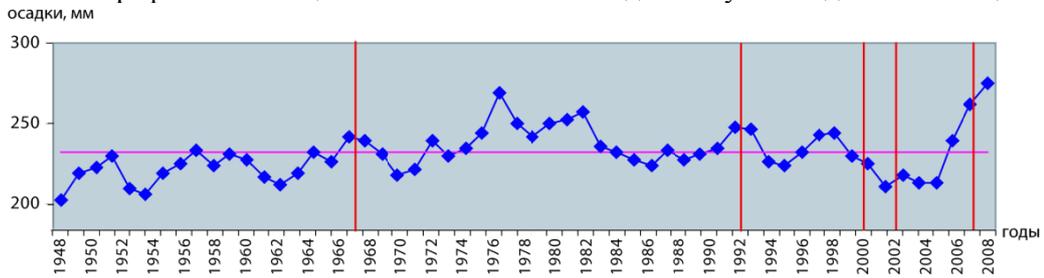


Рисунок 3.5.11. График скользящих 6-летних значений годовых сумм осадков по станции Якутск

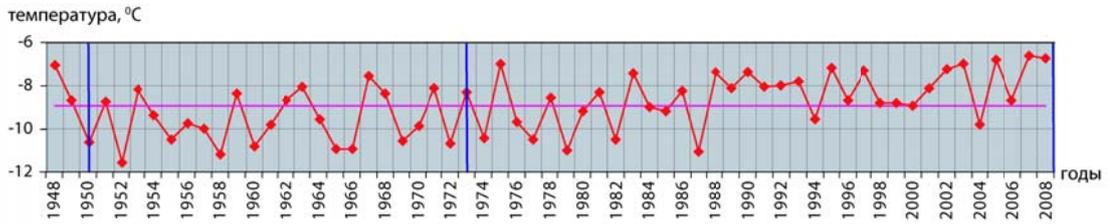


Рисунок 3.5.12. График среднегодовой температуры воздуха по станции Вилюйск

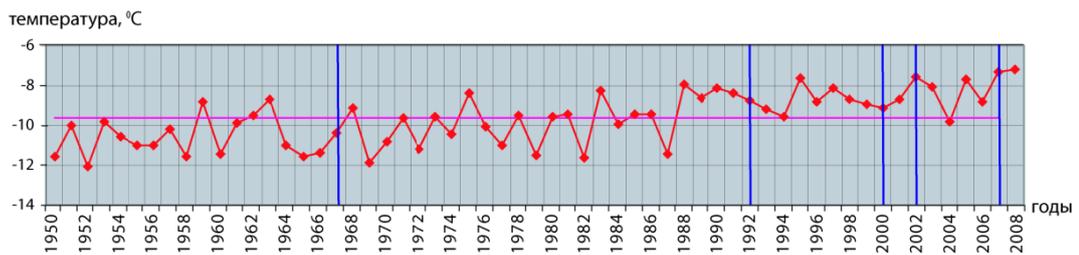


Рисунок 3.5.13. График среднегодовой температуры воздуха по станции Якутск

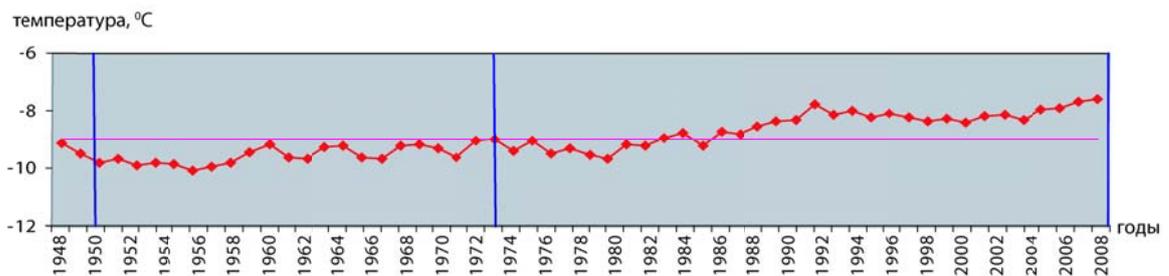


Рисунок 3.5.14. График скользящих 6-летних значений температуры воздуха по станции Вилюйск

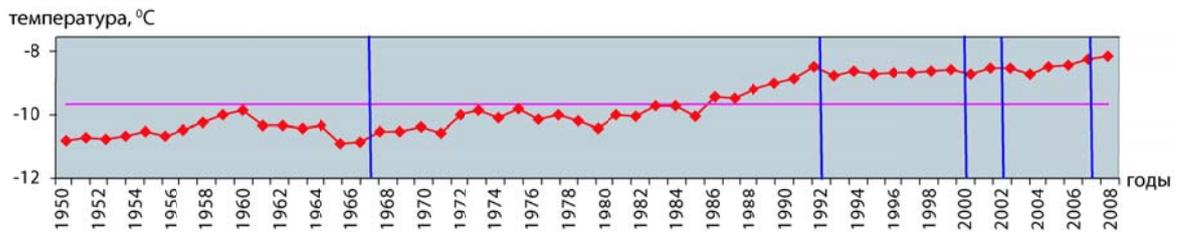


Рисунок 3.5.15. График скользящих 6-летних значений температуры воздуха по станции Якутск

Графики скользящих 6-летних значений среднегодовых температур для обеих станций (рисунок 3.5.14, 3.5.15) демонстрируют ситуацию общего увеличения температуры воздуха за период исследования. На фоне общего тренда увеличения температуры воздуха наблюдаются незначительные локальные колебания. Особенно это заметно в интервале с 1960 по 1986 год, когда незначительные похолодания сменялись потеплениями. Судя по графику, наиболее ярко потепление стало проявляться после 1986 года, когда практически все значения среднегодовой температуры воздуха стали больше среднемноголетней.

Кривые скользящих 6-летних значений годовых сумм осадков (рисунок 3.5.10, 3.5.11) показывают наличие ярко выраженных ритмических колебаний. Как известно, осадки являются весьма изменчивым метеорологическим элементом во времени и пространстве. Внутривековые колебания осадков имеют различную длительность. В пределах вековых циклов можно заметить колебания с увеличением и уменьшением количества осадков. Продолжительность таких внутренних циклов бывает различной, а иногда не представляется возможным их четко выделить (Батталов, 1968).

Более наглядное представление о циклических колебаниях получается при применении метода разностных интегральных кривых или суммарных кривых отклонений от средней многолетней величины (Босиков, 1991). Мы применили его на основе методики, предложенной Ф.З. Баталовым. Для построения разностных интегральных кривых необходимо иметь непрерывный ряд наблюдений. В нашем случае непрерывный ряд наблюдений составляет 61 год. На основе имеющихся данных вычисляется норма осадков за многолетний период $Q_{\text{ср}}$ (среднеарифметическое значение) и для каждого года определяется модульный коэффициент по формуле $K=Q_i/Q_{\text{ср}}$, где Q_i – это суммарное значение величины осадков для каждого конкретного года. Далее вычисляются величины разностей $K-1$ (отклонений от нормы), которые затем алгебраически суммируются $\sum(K-1)$ в нарастающем порядке. Эти суммарные величины откладываются по оси ординат с поправкой A , по оси абсцисс откладываются годы. A – поправка на величину ординат, при которой суммы положительных и отрицательных от середины будут равны, и кривая в этом случае расположится симметрично средней линии. Поправка A вычисляется как среднеарифметическое значение от всех полученных значений

$\sum(K-1)$, по формуле $A=\sum(K-1)/n$, где n – это число лет, входящих в непрерывный ряд наблюдений (Батталов, 1968).

На основе представленной методики были построены графики нормированной разностной интегральной кривой годовых сумм осадков для станции Вилюйск (рисунок 3.5.16) и станции Якутск (рисунок 3.5.18). На каждом из представленных графиков вертикальными линиями отмечены годы, для которых имеются аэрокосмические снимки, использованные в исследовании.



Рисунок 3.5.16. Нормированная разностная интегральная кривая годовых сумм осадков по станции Вилюйск

Как видно из графика нормированной разностной интегральной кривой для станции Вилюйск (рисунок 3.5.16) с 1948 по 1973 год характерна маловодная фаза, а с 1974 по 2008 год – многоводная фаза. Данное утверждение подтверждает также график скользящих 6-летних значений годовых сумм осадков (рисунок 3.5.10), где видно, что в период маловодной фазы все значения лежат ниже среднемноголетней величины, а в период многоводной фазы – выше этой величины. Особенно ярко многоводная фаза начала проявляться с 1996 года, до этого наблюдалась относительная стабильность. Именно этот факт мог сказаться на увеличении площади озер с 1973 по 2009 год (рассматриваемый временной интервал как раз попадает в период многоводной фазы). Кроме того, в 2006 и 2007 гг. два года подряд наблюдались осадки выше нормы, их годовые суммы превышали в 2006 г. 330 мм, а в 2007 430 мм. Таким образом, наблюдаемое увеличение площади озер в пределах эталонного участка №1 в рассматриваемый период обусловлено увеличением количества атмосферных осадков. Следует отметить, что повсеместное увеличение площади озер наиболее четко проявляется в районах распространения неглубоких нечетких аласных котловин на плоских плакорах. В озерах же с четко выраженной глубокой котловиной при повышении уровня воды контуры озер практически не изменяются, поэтому в районах распространения таких озер наблюдается относительная стабильность.

Влияние эрозионной деятельности рек, которая способствует тому, что аласные котловины то заполняются водой, то осушаются, может наблюдаться как в маловодный, так и в многоводный период. В результате этой деятельности по течению реки чередуются заполненные и осушенные аласы. Такая ситуация особенно четко выражена на территории эталонного участка №1 (рисунок 3.5.7-Б, приложение: стр. 96, 97), где помимо увеличения площади озер в рассмотренный многоводный период наблюдается сокращение площади некоторых из них по рекам.

Чтобы точно удостовериться в определяющей роли атмосферных осадков, оказывающих влияние на динамику площади озер, на территории эталонного участка №1 дополнительно был рассмотрен временной интервал с 1950 по 1973 год, который попадает в период маловодной фазы. Такое исследование было выполнено на фрагмент эталонного участка, в пределах которого ранее было установлено значительное увеличение площади озер. В качестве снимка за 1950 год были использованы аэрофотоснимки масштаба 1:60 000, предоставленные Производственным и научно-исследовательским институтом по инженерным изысканиям для строительства (ПНИИИС). С смонтированных по ним фотосхем на кальку были переведены береговые линии озер и границы аласов. В дальнейшем схемы береговых линий были отсканированы, привязаны и использованы в анализе.

В результате было установлено, что с 1950 по 1973 год на территории рассмотренного фрагмента (рисунок 3.5.17) наблюдается уменьшение площади и исчезновение крупных термокарстовых озер, вполне естественное для маловодной фазы 1948 – 1973 гг. Помимо уменьшения количества атмосферных осадков на сокращение площади озер могло повлиять усиление испарения при наблюдаемом повышении температуры воздуха.

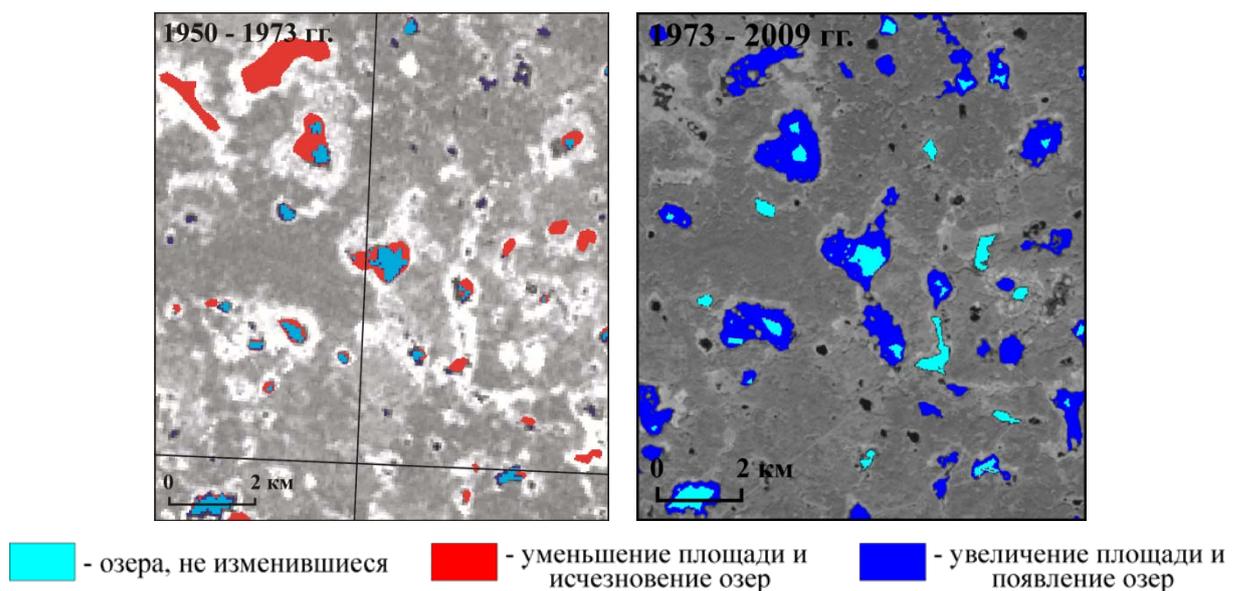


Рисунок 3.5.17. Изменение площади озер, представленное на фрагмент эталонного участка №1

Таким образом, на территории эталонного участка №1 наблюдается зависимость изменения площади озер от атмосферных осадков. В маловодный (1948 – 1973 гг.) – сокращение (рисунок 3.5.17), а в многоводный период (1974 – 2009 гг.) наблюдается увеличение площади озер.

На графике нормированной разностной интегральной кривой годовых сумм осадков по станции Якутск в отличие от станции Вилюйск наблюдается более сложная картина (рисунок 3.5.18), выраженная в относительно частом чередовании более коротких по продолжительности многоводных и маловодных фаз. Более продолжительные периоды в этом регионе можно выделить лишь с учетом того, что внутри каждого из них наблюдается чередование более коротких. Так можно говорить о маловодном периоде с 1948 по 1973 год и о многоводном периоде с 1974 по 1999 год, внутри каждого из которых чередуются локальные периоды. После них следует явно выраженный маловодный период с 2000 по 2002 год и многоводный – с 2003 по 2008 год.



Рисунок 3.5.18. Нормированная разностная интегральная кривая годовых сумм осадков по станции Якутск

Несмотря на частое чередование маловодных и многоводных фаз, вполне вероятно, что наблюдаемое увеличение площади озер в пределах эталонного участка №2 с 1967 по 2007 год, аналогично эталонному участку №1, было обусловлено увеличением количества атмосферных осадков. Этому вполне мог благоприятствовать многоводный период 2002 – 2007 года.

Чтобы удостовериться в определяющей роли атмосферных осадков на территории эталонного участка №2 были дополнительно проанализированы годовые изменения площади озер за три временных интервала: с 1992 по 2000 гг., попадающего в период многоводной фазы, с 2000 по 2002 гг., попадающего в период маловодной фазы и с 2002 по 2007 гг., попадающего в период многоводной фазы (рисунок 3.5.18). Изменения были проанализированы по космическим снимкам со спутника Landsat (таблица 3.5.6). Важно отметить, что в отличие от многолетних изменений, проанализированных на территории двух фрагментов, годовые

изменения были проанализированы на территории всего эталонного участка. Лишь некоторые временные интервалы (в частности временной интервал 1992 – 2000 гг.) были рассмотрены на меньшей площади ввиду неполного покрытия участка требуемыми космическими снимками.

Таблица 3.5.6

Космические снимки, использованные для анализа годовых изменений площади озер

№ эталонного участка	Дата съемки	Съемочная система	Пространственное разрешение, м	Path/Row
2	24 08 1992	Landsat-5 TM	30	121/017
	23 08 2000	Landsat-5 TM	30	120/017
	13 08 2000	Landsat-7 ETM+	30	122/016
	12 08 2002	Landsat-7 ETM+	30	121/016; 121/017
	02 08 2007	Landsat-5 TM	30	121/016; 121/017

В результате анализа годовых изменений на территории эталонного участка №2 для каждого временного интервала, как и при анализе многолетних изменений, было определено количество озер, площадь которых уменьшилась, количество озер, площадь которых увеличилась, и изменение площади озер в км² (таблица 3.5.7). Все полученные показатели были подсчитаны также относительно рассматриваемой площади эталонного участка и приведены в виде графиков (рисунок 3.5.19, 3.5.20).

Таблица 3.5.7

Годовые изменения площади озер, выявленные в пределах эталонного участка №2

Рассматриваемый временной интервал	Площадь участка, км ²	Количество уменьшившихся озер	Изменение площади уменьшившихся озер, км ²	Количество увеличившихся озер	Изменение площади увеличившихся озер, км ²
1992 – 2000	6663	34	-0,6	1254	+37
2000 – 2002	13602	921	-27	45	+2,7
2002 – 2007	15306	24	-1,1	5297	+248

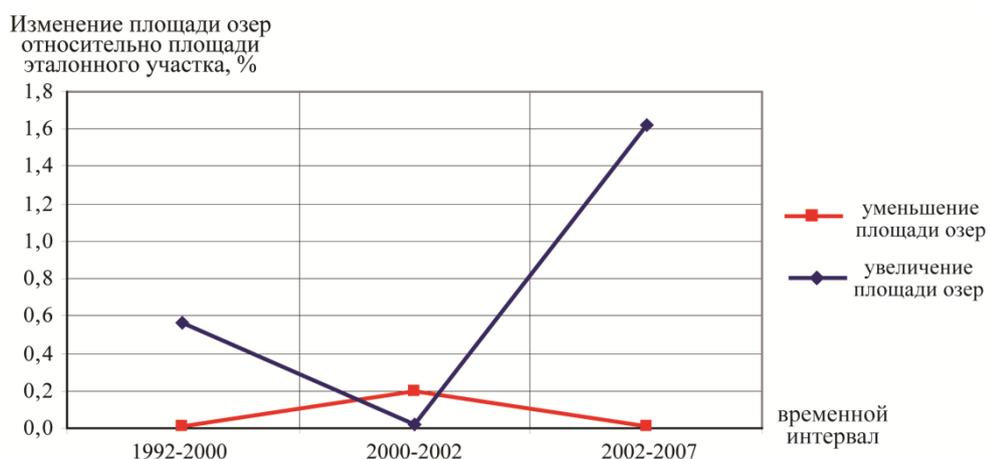


Рисунок 3.5.19. Изменение площади озер относительно проанализированной площади в фазы разной водности

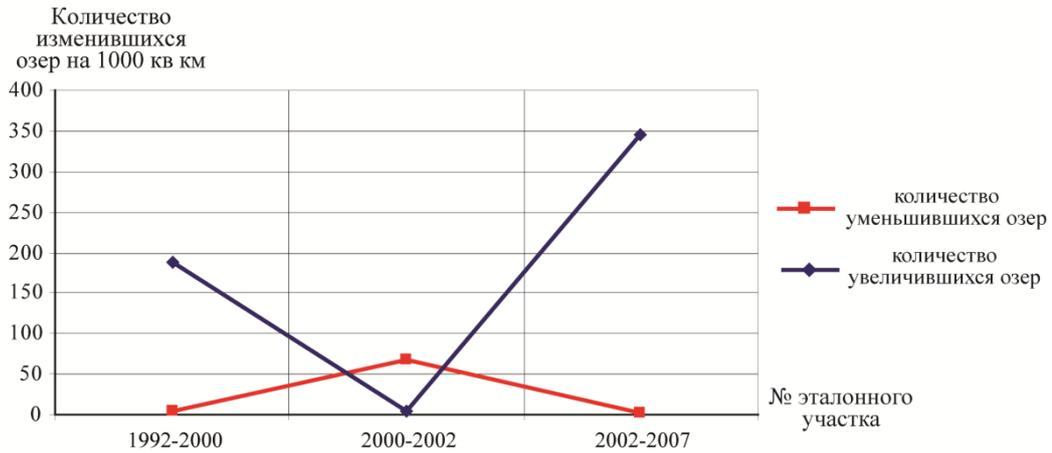


Рисунок 3.5.20. Количество изменившихся озер в пределах проанализированной площади в фазы разной водности

В результате, в период с 1992 по 2000 гг., попадающий в интервал многоводной фазы, было установлено увеличение площади озер, в период с 2000 по 2002 гг., попадающий в интервал маловодной фазы, – уменьшение площади озер, и в период с 2002 по 2007 гг., попадающий в интервал многоводной фазы, – увеличение площади озер (рисунок 3.5.21, стр. 103 – 112). Наблюдаемые изменения подтверждают и составленные графики (рисунок 3.5.19, 3.5.20).

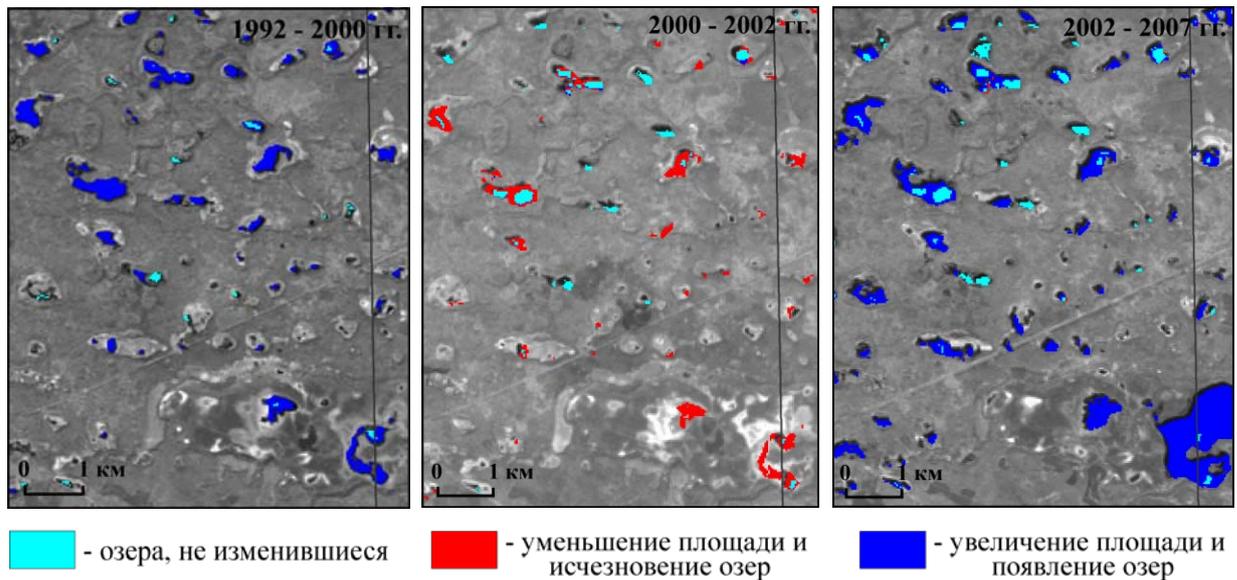


Рисунок 3.5.21. Годовые изменения площади озер, представленные на фрагмент эталонного участка №2

Анализ годовых изменений термокарстовых озер на территории эталонного участка №2, как и на территории эталонного участка №1, показал, что атмосферные осадки накладывают существенный отпечаток на изменения площади термокарстовых озер. Как правило, характер их изменений коррелирует с чередованием многоводных либо маловодных лет, повторяющихся 3 и более лет подряд.

3.6. Котловины Забайкалья

Природные особенности района. Забайкалье представляет собой горную страну сложного и неоднородного строения и состоит из системы параллельных друг другу поясов из высоких горных хребтов, часто альпийского типа, и узких глубоких впадин (Баргузинская, Верхнеангарская, Чарская и др.), простирающихся в северо-восточном направлении.

В геологическом строении котловин и их обрамлении участвует широкий комплекс метаморфических, осадочных и магматических образований протерозойского, палеозойского и кайнозойского возраста. Котловины заполнены толщей рыхлых, слабосцементированных отложений четвертичного возраста, которые представлены озерными, флювиогляциальными, ледниковыми, аллювиальными, пролювиальными, эоловыми образованиями (Гета, 1981).

В орографическом отношении котловины представляют собой тектонические впадины с долинами одноименных рек, обрамленные мощными горными поднятиями.

Климат региона определяется в первую очередь положением в центре огромного материка, господством Сибирского антициклона и значительной приподнятостью над уровнем моря. Климат резко континентальный, характеризующийся отрицательной средней годовой температурой воздуха, теплым летом, суровой зимой, малым количеством осадков с преобладанием их в летнее время, малой высотой снежного покрова и зимним безветрием. Для межгорных котловин характерен резко континентальный климат. Орографическая изолированность впадин обуславливает сильное зимнее выхолаживание и малое количество осадков (Региональная криолитология, 1989).

Среднегодовая температура воздуха закономерно понижается по мере удаления к востоку от Байкала. В Нижнеангарске она составляет $-3,2^{\circ}$, в Куморе – $-4,9^{\circ}$, а в Уояне – $-6,6^{\circ}$. Самый холодный месяц года – январь, средняя многолетняя температура $-22,8^{\circ}$ в Нижнеангарске и $-31,1^{\circ}$ в Уояне. Температура июля по территории бассейна изменяется в среднем от $15,1^{\circ}$ (Нижнеангарск) до $18,0^{\circ}$ (Ченча). Многолетние величины годовых сумм атмосферных осадков также уменьшаются по мере удаления от Байкала: 417 мм за год в Нижнеангарске и 352 мм в Уояне. Вероятнее всего, это связано с защищенностью территории горными поднятиями, что особенно сказывается на доле зимних осадков. В межгорных котловинах снежный покров чаще всего имеет мощность менее 20 см и из-за безветрия залегает достаточно равномерно (Гета, 1981).

Во впадинах (Верхнеангарской и Баргузинской) вечная мерзлота имеет прерывистое распространение. Мощность ее составляет от 30–80 до 300 м, а температура грунта от -2° – $+2^{\circ}$ до -6° – $+1,8^{\circ}$. Мощность мерзлоты в котловинах, как правило, возрастает от центра к периферии. Наибольшая мощность наблюдается вблизи горного обрамления. Сквозные талики

связаны здесь обычно с руслами крупных рек, зонами разлома и песчаными массивами (Региональная криолитология, 1989).

Особенностью гидрогеографической сети межгорных впадин является большое количество озер. В подавляющем большинстве это мелкие водоемы с площадью водного зеркала до 1 км². Берега большинства озер плавучие, обильно зарастающие водолюбивой растительностью. Нередко встречаются плавающие травянистые острова. По происхождению озера можно разделить на пять групп: озера-старицы, образовавшиеся в результате эрозионного перемещения русла реки; пойменные озера, возникшие в результате повышения уровня воды в реке и заполнения естественных понижений; термокарстовые озера, образовавшиеся вследствие протаивания льдистых грунтов; высокогорные озера, образовавшиеся в результате осыпно-оплывинных явлений; озера плоских водоразделов, существующие на водоупоре из многолетнемерзлых пород. Водное питание озер этих впадин тесно связано с водным режимом и водным балансом прилегающих крупных рек. Главнейшим элементом водного баланса озер, расположенных на низкой пойме и связанных с рекой протоками, являются речные воды. Амплитуда колебания уровня таких озер полностью определяется уровнем режимом рек. Озера, не имеющие постоянной прямой связи с рекой, заполняются речными водами во время весеннего половодья или паводочных разливов. После спада половодья эта временная связь прекращается. Бессточные озера, не имеющие прямой связи с рекой, питаются за счет талых и дождевых вод.

Растительность отличается большим разнообразием и высотной поясностью: развиты степи, леса, болотная, предгольцовая и гольцовая растительность. Большие площади в Забайкалье занимает горная тайга. Тайга начинается прямо от днищ межгорных впадин и поднимается до высоты 1200 м над уровнем моря. Общая залесенность Верхнеангарской котловины, в частности, около 40%. Господствующая древесная порода – лиственница даурская, занимающая около 73% всей лесной площади. Примерно 20% лесной площади занимает сосна и 4% береза. Другие древесные породы представлены слабо. По долинам рек развиты болота. Наибольшей заболоченностью отличается долина Верхней Ангары, особенно на участках ее нижнего и среднего течения. Относительная площадь болот в бассейне около 4%. От 1,5 до 2% территории занимают луга (Гета, 1981).

Предшествующие исследования. Изменения площади озер на территории Верхнеангарской (1979 – 2002 гг.) и Баргузинской (1976 – 2000 гг.) котловин ранее были проанализированы в работе В.И. Кравцовой и А.Г. Быстровой (2009). В результате сравнения разновременных космических снимков со спутника Landsat было обнаружено частичное и полное осушение некоторых озер, отмечено их высыхание от центра к периферии и образование остаточных кольцевых структур. Наряду с этим отмечается повсеместное

увеличение площади остальных озер и появление множества мелких водоемов. В связи с тем, что в рассматриваемом районе исследования в 1950–2000 гг. отмечено сильное потепление на $1,5^{\circ}\text{C}$, эти изменения авторы связывали с возможной активизацией термокарстового процесса.

Эталонные участки. Для проверки возможных причин выявляемого увеличения площади и появления озер, среди которых можно предположить различие в разрешении сравниваемых снимков, межгодовые колебания осадков и др., на территории Верхнеангарской, Баргузинской котловины, а также на территории Чарской котловины в нашей работе были проанализированы многолетние изменения площади озер по разработанной методике, учитывающей различия в разрешении сравниваемых снимков (рисунок 3.6.1). Выбранные эталонные участки расположены в зоне сплошного (на территории Чарской котловины в пределах эталонного участка №1) и прерывистого (на территории Верхнеангарской и Баргузинской котловины в пределах эталонных участков №2 и №3) распространения мерзлоты (рисунок 3.6.2).

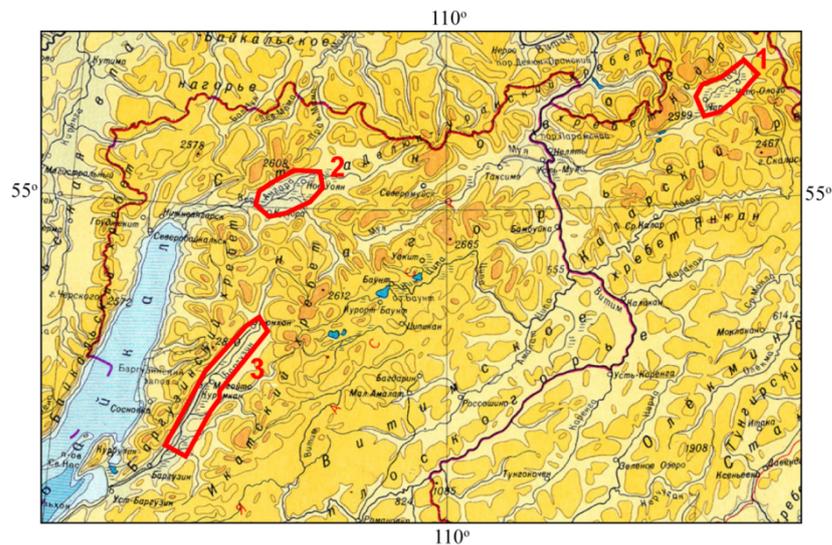


Рисунок 3.6.1. Расположение эталонных участков в Забайкалье: 1 – Чарская котловина, 2 – Верхнеангарская котловина, 3 – Баргузинская котловина

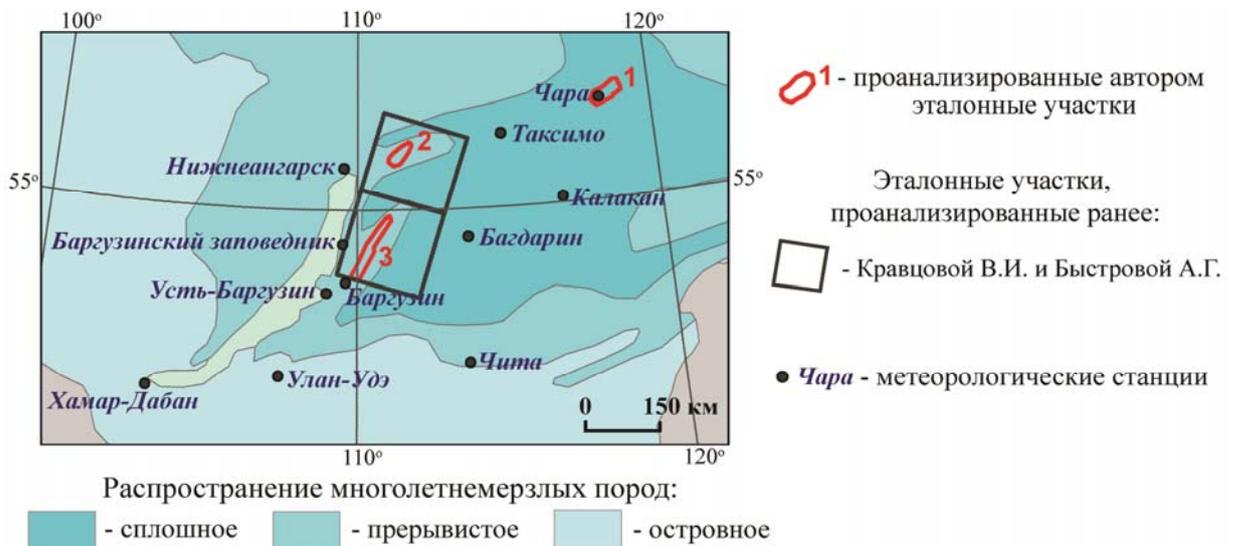


Рисунок 3.6.2. Расположение эталонных участков в котловинах Забайкалья

Характеристика сети озер рассматриваемых эталонных участков представлена в таблице 3.6.1. Наибольшее количество озер, приходящееся на 1 км², а также наибольшая озерность характерна для Верхнеангарской котловины – эталонного участка №2. Больше половины озер, распространенных на территории всех анализируемых участков – малые озера площадью менее 0,5 га. Больше всего малых и меньше всего крупных озер встречается в пределах Баргузинской котловины – эталонного участка №3, именно поэтому для этого участка характерна наименьшая озерность при относительно высоком количестве озер, приходящемся на 1 км².

Таблица 3.6.1

Характеристика сети озер эталонных участков
по современным космическим снимкам со спутника Landsat

№ эталонного участка	Площадь участка, км ²	Общее количество озер	Плотность озер*	Общая площадь озер, км ²	Озерность района**, %	Соотношение озер разного размера***
1	1773	1428	0,8	56	3	
2	1218	2894	2,4	70	6	
3	2489	2661	1,1	47	2	

* - количество озер на 1 км²

** - доля площади водной поверхности озер от общей площади участка

*** - голубой цвет – малые озера (до 0,5 га); синий – средние (от 0,5 га до 10 га); фиолетовый – крупные (более 10 га)

Материалы и методика исследования. При анализе многолетних изменений площади озер (таблица 3.6.2) в отличие от исследования В.И. Кравцовой и А.Г. Быстровой (2009) была учтена надежность дешифрирования озер по снимкам разного разрешения. Из исследования были исключены малые озера с полнотой дешифрирования менее 90%, то есть те озера, которые не дешифрируются совсем или дешифрируются в неполном объеме на снимке за первую дату ввиду низкого пространственного разрешения.

Таблица 3.6.2

Космические снимки, использованные для анализа многолетних изменений площади озер

№ эталонного участка	Дата съемки	Съемочная система	Пространственное разрешение, м	Path/Row
1	08_06_1986	Landsat-5 TM	30	126/020
	02_07_2004	Landsat-5 TM	30	127/020
2	04_07_1979	Landsat-2 MSS	80	141/021
	11_08_2002	Landsat-7 ETM+	30	130/021
3	01_07_1976	Landsat-2 MSS	80	141/022
	19_08_2011	Landsat-5 TM	30	131/022

В результате количество проанализированных озер и общая их площадь значительно сократились (таблица 3.6.3). Так по используемым космическим снимкам на территории Верхнеангарской котловины удастся надежно проанализировать изменения площади всего 11% озер от их общего количества. Остальные же 89% озер, преимущественно малого и среднего

размера должны быть исключены из анализа, поскольку они могут быть выделены на сравниваемых снимках неодинаково, что может привести к неправильным выводам относительно характера их изменений.

Таблица 3.6.3

Характеристика сети озер, проанализированных по современным космическим снимкам со спутника Landsat на эталонных участках

№ эталонного участка	Количество проанализированных озер	% проанализированных озер от их общего количества	Общая площадь проанализированных озер	% общей площади проанализированных озер от общей площади всех озер
1	857	60	56	99
2	331	11	55	79
3	186	7	36	75

Помимо этого в исследовании учитывалась величина среднеквадратической погрешности определения площади озер – проводился отбор озер с величиной изменения, превышающей величину погрешности, а для проверки изменений отобранных озер выполнялся визуальный контроль.

Результаты исследования. В результате исследования было определено количество озер, площадь которых уменьшилась, количество озер с увеличением площади и изменение площади озер в км² (таблица 3.6.4, рисунок 3.6.3). Все показатели были подсчитаны также относительно площади эталонных участков и приведены в виде графиков (рисунок 3.6.4, 3.6.5).

Таблица 3.6.4

Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков

№ эталонного участка	Площадь участка, км ²	Количество уменьшившихся озер	Изменение площади уменьшившихся озер, км ²	Количество увеличившихся озер	Изменение площади увеличившихся озер, км ²
1	1773	4	-0,2	14	+0,06
2	1218	13	-1,6	19	+3,2
3	2489	25	-2,5	18	+3,2

Согласно полученным результатам в котловинах Забайкалья наблюдаются разнонаправленные изменения с некоторым преобладанием увеличения площади озер. Распределены изменившиеся озера по эталонным участкам неравномерно (приложение: стр. 114, 116, 118), но главным образом в непосредственной близости от рек и водотоков.

Наименьшие изменения среди всех проанализированных эталонных участков, как в отношении изменения площади озер (рисунок 3.6.4), так и количеству изменившихся озер (рисунок 3.6.5) выявлены в пределах зоны сплошного распространения мерзлоты на территории Чарской котловины (Приложение: стр. 114, 115), наибольшие – на территории Верхнеангарской котловины в пределах эталонного участка №2 (рисунок 3.6.4, 3.6.5). На территории Верхнеангарской котловины выявлено также наибольшее увеличение площади озер;

увеличившиеся озера сконцентрированы главным образом в юго-западной части эталонного участка (Приложение: стр. 116, 117).



Рисунок 3.6.3. Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков

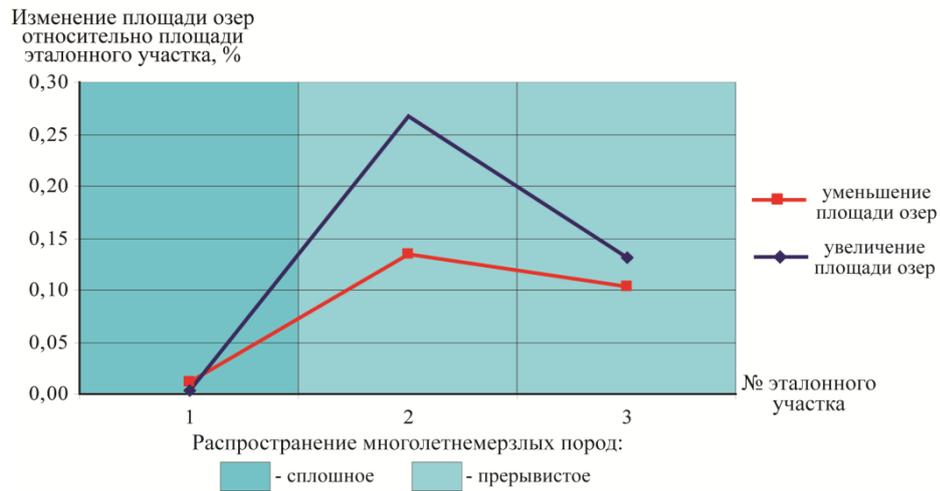


Рисунок 3.6.4. Изменение площади озер относительно площади эталонных участков

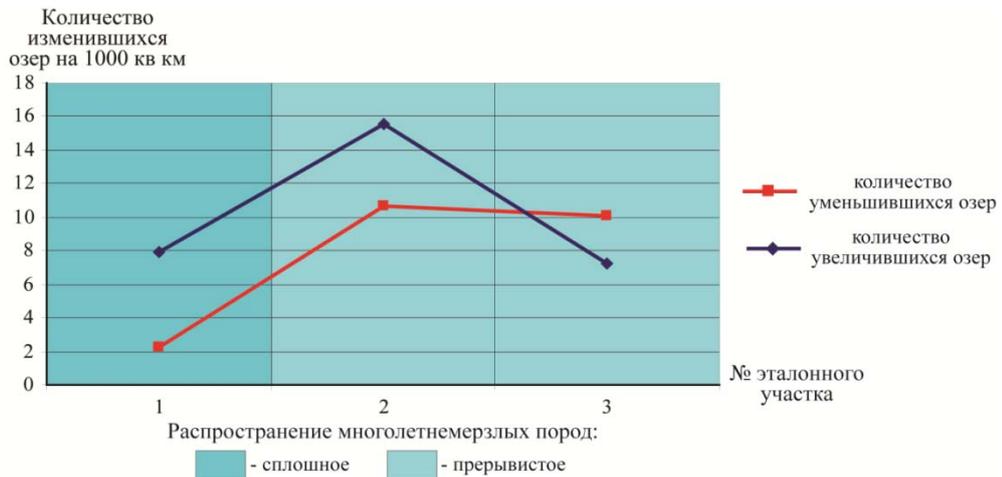


Рисунок 3.6.5. Количество изменившихся озер в пределах эталонных участков

Несмотря на некоторые различия между эталонными участками по величине изменения, на территории всех участков изменившиеся озера расположены в долинах рек, преимущественно на пойме в непосредственной близости от рек. Вполне вероятно, что питание этих озер тесным образом связано с водным режимом и водным балансом рек. Поэтому озера, вероятно, регулярно испытывают колебание уровня воды и соответственно изменение площади.

Для того чтобы проверить предположение о регулярном колебании уровня воды в озерах на фрагмент эталонного участка №2 (рисунок 3.6.6), рассмотренный в исследовании В.И. Кравцовой и А.Г. Быстровой (2009), были проанализированы межгодовые изменения площади озер. Исследование было основано на сравнении разновременных космических снимков, полученных преимущественно со спутника Landsat (таблица 3.6.5).

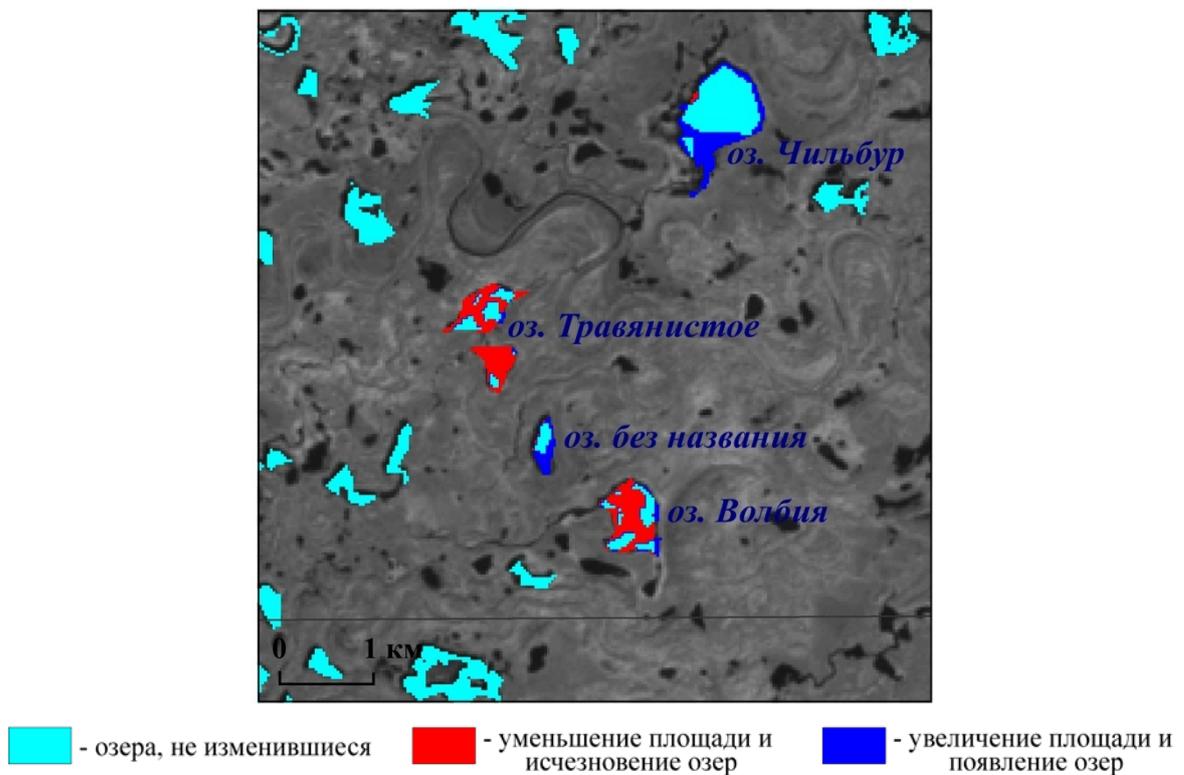


Рисунок 3.6.6. Фрагмент эталонного участка №2 (1979 – 2002 гг.)

Таблица 3.6.5

Космические снимки, использованные для анализа межгодовых изменений площади озер на территории Верхнеангарской котловины

Дата съемки	Съемочная система	Пространственное разрешение, м	Path/Row
20.09.1999	Landsat ETM+	30	130/21
08.08.2001	Landsat ETM+	30	130/21
11.08.2002	Landsat ETM+	30	130/21
25.08.2007	SPOT-4	20	257/236
29.08.2009	Landsat TM	30	131/21

В результате анализа межгодовых изменений на фрагмент эталонного участка были составлены схемы динамики озер (рисунок 3.6.7) и график изменения площади отдельных озер (рисунок 3.6.8), у которых в результате анализа многолетних изменений было выявлено уменьшение или увеличение площади (рисунок 3.6.6).

Анализ межгодовых изменений показал, что в исследуемом районе наблюдается чередование периодов уменьшения и увеличения площади озер с интервалом в несколько лет (рисунок 3.6.7). При этом площади разных озер, находящихся в непосредственной близости друг от друга, могут изменяться по-разному: у одних озер площадь может увеличиваться, у других – уменьшаться. Общее увеличение площади всех озер в пределах рассматриваемого фрагмента отмечается с 2002 по 2009 год (рисунок 3.6.7, 3.6.8). Такое увеличение площади озер может быть обусловлено непрерывным увеличением количества атмосферных осадков начиная с 2005 года (рисунок 3.6.9), зарегистрированным метеонаблюдениями.

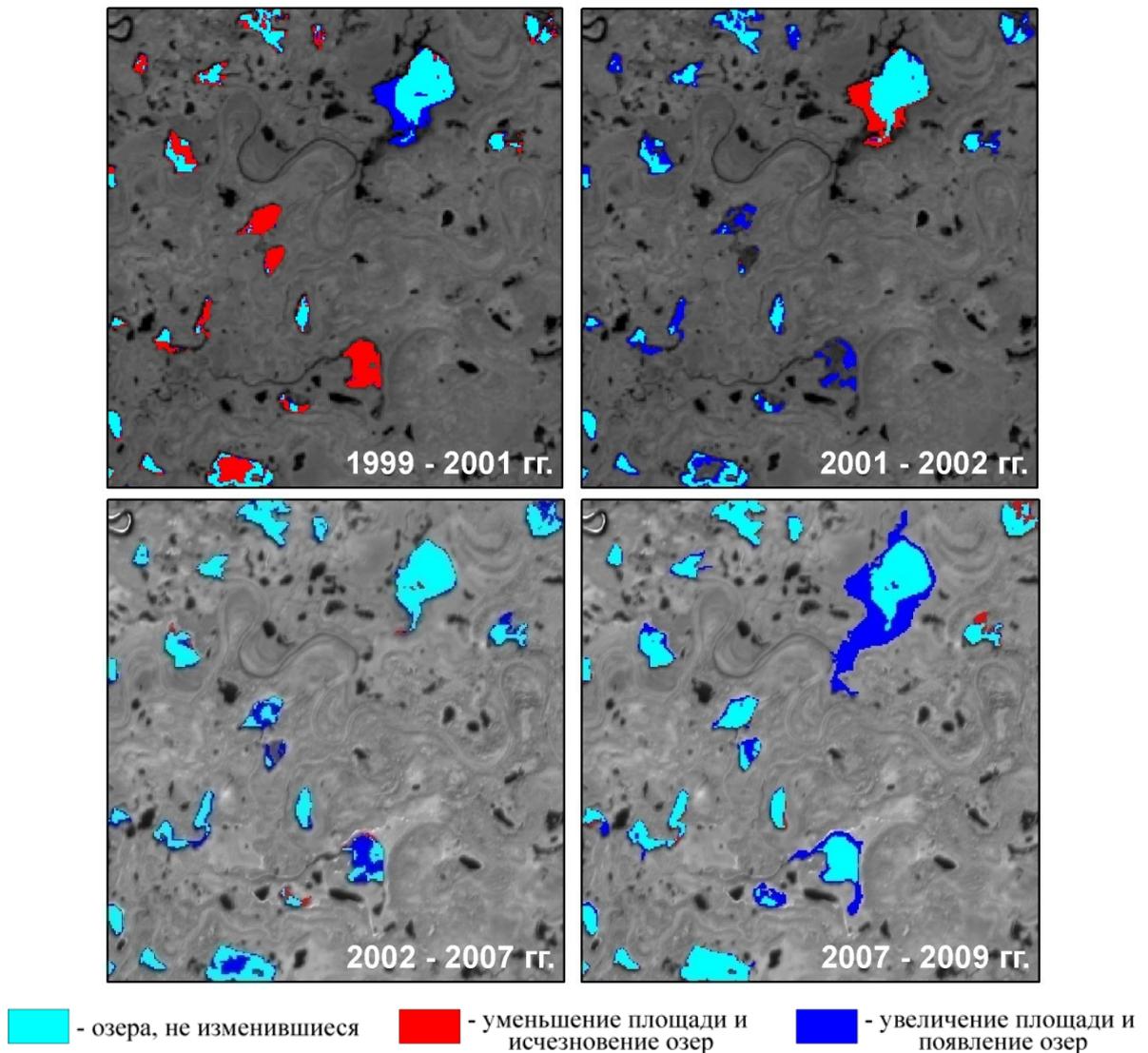


Рисунок 3.6.7. Межгодовые изменения площади озер на фрагменте эталонного участка №2

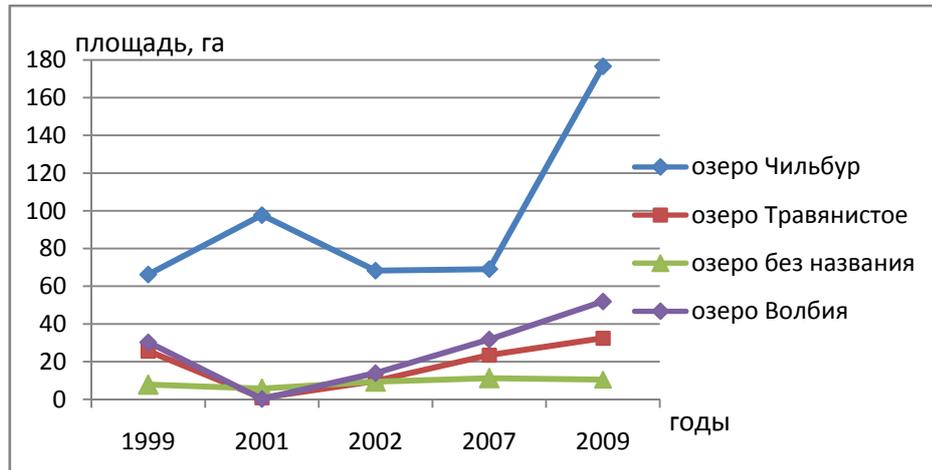


Рисунок 3.6.8. Межгодовые изменения площади отдельных озер

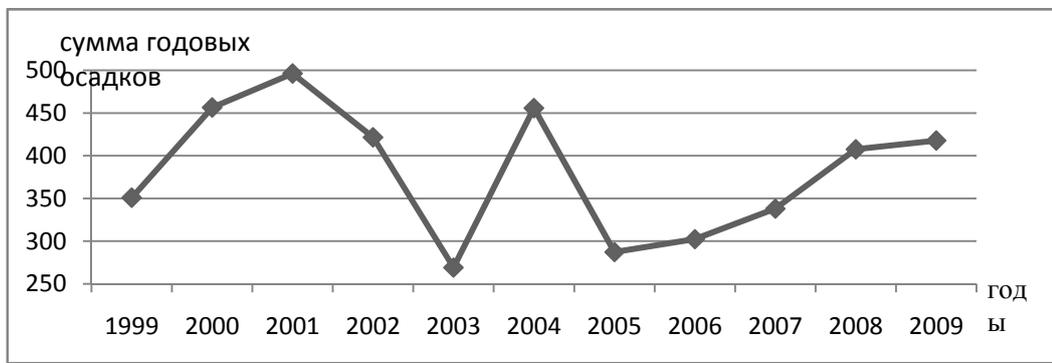


Рисунок 3.6.9. График годовых сумм осадков по станции Нижнеангарск

Довольно четко проявляется взаимосвязь изменения площади озера Чильбур и годовых сумм осадков. Увеличение площади этого озера с 1999 по 2001 год соответствует периоду увеличения годовых сумм осадков, уменьшение площади с 2001 по 2002 год – уменьшению количества осадков. Дополнительный визуальный анализ космических снимков со спутника Landsat-7, имеющих пропуски в изображении из-за сбоя корректора линий сканирования, за 20 июля 2003, 8 сентября 2004 и 20 сентября 2005 гг. показал, что с 2002 по 2003 год площадь озера уменьшилась, с 2003 по 2004 – увеличилась и с 2004 по 2005 – вновь уменьшилась, что также коррелирует с ходом годовых сумм осадков (рисунок 3.6.9). Таким образом, количество атмосферных осадков в данном регионе может оказывать влияние на изменение площади озер. Однако такое соответствие проявляется не всегда – из рисунка 3.6.8 следует, что у озер Травянистое и Волбия, несмотря на увеличение количества осадков в 1999–2001 гг., площадь водного зеркала уменьшилась. Такое уменьшение площади мелких озер, с одной стороны может быть обусловлено развитием водной растительности, с другой – влиянием эрозийной деятельности постоянных или временных водотоков.

Таким образом, в качестве возможных причин высокой изменчивости площади озер в котловинах Забайкалья может быть расположение озер в долинах рек, влияние атмосферных

осадков, влияние эрозионной деятельности постоянных и временных водотоков, активно развивающихся в период половодья. Данное предположение подтверждают отмечаемые Р.И. Гета (1981) физико-географические особенности региона, согласно которым водное питание озер Верхнеангарской впадины тесно связано с водным режимом и водным балансом Верхней Ангары. Для Верхней Ангары характерно хорошо выраженное весенне-летнее половодье (май - июнь). Подъемы уровня воды при дождевых паводках (июль - сентябрь) меньше. Главнейшим элементом водного баланса озер, расположенных на низкой пойме и связанных с рекой протоками, являются речные воды, а амплитуда колебания уровня таких озер полностью определяется уровнем режимом реки. Озера, не имеющие прямой связи с рекой, заполняются речными водами во время весеннего половодья или паводочных разливов. После спада половодья эта временная связь прекращается. Бессточные озера, как правило, питаются за счет талых и дождевых вод. Определенную роль в питании озер играют и грунтовые воды, включающиеся в водообмен по мере протаивания слоя сезонной мерзлоты (Гета, 1981).

Проведенный анализ показывает, что изменчивость площади озер в котловинах Забайкалья обусловлена разнообразными факторами – влиянием колебаний атмосферных осадков, изменчивостью водного режима и водного баланса рек котловин, а также их эрозионной деятельностью. Говорить об активизации термокарстового процесса в результате протаивания мерзлоты в данном регионе следует с осторожностью. Эти выводы получены для Ангарской котловины. Очевидно, что таким же процессам подвержены озера, расположенные в других рассмотренных котловинах: Чарской и Баргузинской, в пределах которых также выявлены разнонаправленные изменения площади озер (рисунок 3.6.4, 3.6.5), расположенных на пологих участках долин рек в непосредственной близости от рек или временных водотоков (Приложение: стр. 114, 115, 118, 119).

Таким образом, в результате повторных исследований динамики термокарстовых озер в котловинах Забайкалья с использованием методики, обеспечивающей учет различного пространственного разрешения сравниваемых разновременных космических снимков, уточнен характер изменений озер и их многофакторная природа, не позволяющая достоверно судить об активизации термокарстового процесса при потеплении климата.

3.7. Сопоставление результатов региональных исследований

В результате исследования динамики термокарстовых озер за период с 1970-х – 1980-х по 2000-е годы по разработанной методике были проанализированы изменения площади 300 000 озер в пределах 39 эталонных участков, расположенных в различных районах криолитозоны России: на Севере Европейской части России, в Западной Сибири, на Севере Восточной Сибири и Дальнего Востока, в Центральной Якутии и в котловинах Забайкалья.

Для каждого эталонного участка было определено количество озер, площадь которых уменьшилась, количество озер, площадь которых увеличилась, и изменение площади озер в км². Для удобства сопоставления полученных результатов по регионам все показатели были подсчитаны относительно площади эталонных участков и приведены в виде обобщенных графиков (рисунок 3.7.1, 3.7.2).



Рисунок 3.7.1. Количество изменившихся озер в пределах эталонных участков

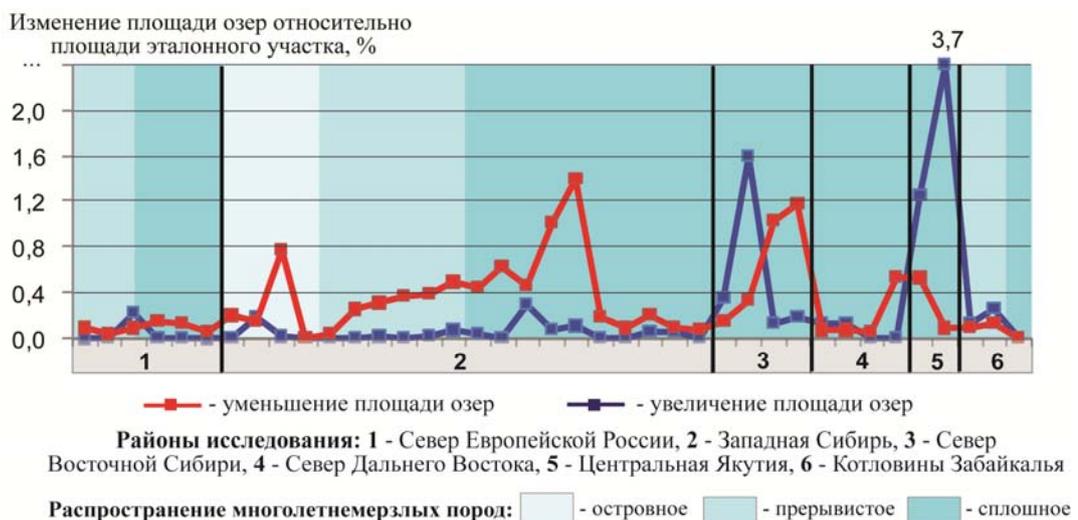


Рисунок 3.7.2. Изменение площади озер относительно площади эталонных участков

На основе полученных результатов по каждому району исследования дополнительно и для России в целом было определено суммарное изменение площади (таблица 3.7.1) и суммарное изменение количества термокарстовых озер (таблица 3.7.2).

Таблица 3.7.1

Изменение площади термокарстовых озер в различных районах криолитозоны

Район исследования	Суммарная площадь проанализированных озер по состоянию на первую дату, км ²	Изменение площади термокарстовых озер			
		УМЕНЬШЕНИЕ		УВЕЛИЧЕНИЕ	
		в км ²	в % от площади озер за первую дату	в км ²	в % от площади озер за первую дату
Север Европейской части России	3536	69,3	-1,9 %	29,1	+0,8 %
Западная Сибирь	27623	918,1	-3,2 %	101,0	+0,3 %
Север Восточной Сибири и Дальнего Востока	18779	416	-2,2 %	173,5	+0,9 %
Центральная Якутия	1209	120,6	-11,8 %	309,0	+30 %
Котловины Забайкалья	147	4,3	-3 %	6,5	+4,5 %
Россия в целом	51294	1528	-2,9 %	619	+1,2 %

Таблица 3.7.2

Изменение количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны

Район исследования	Суммарное количество проанализированных озер по состоянию на первую дату	Изменение количества термокарстовых озер			
		УМЕНЬШЕНИЕ		УВЕЛИЧЕНИЕ	
		Количество исчезнувших озер	в % от площади озер за первую дату	количество появившихся озер	в % от площади озер за первую дату
Север Европейской части России	42 173	341	-0,8 %	20	+0,05 %
Западная Сибирь	230 162	870	-0,4 %	114	+0,05 %
Север Восточной Сибири и Дальнего Востока	22 789	173	-0,8 %	44	+0,2 %
Центральная Якутия	5 058	60	-1,2 %	768	+15 %
Котловины Забайкалья	1 345	12	-0,9 %	31	+2,3 %
Россия в целом	303 500	1456	-0,5 %	977	+0,3 %

Согласно полученным графикам (рисунок 3.7.1, 3.7.2) и таблицам (таблица 3.7.1, 3.7.2), в различных районах криолитозоны России с 1970-х – 1980-х по 2000-е годы наблюдаются

разнонаправленные изменения площади озер. Во всех районах встречаются озера, площадь которых уменьшилась, и озера, площадь которых увеличилась. Однако в целом по всей территории России сокращение площади и количества термокарстовых озер преобладает над их увеличением. В пределах территории России в целом выявлено сокращение площади озер на 1,7% и сокращение количества озер на 0,2%.

Наибольшее сокращение площади озер (рисунок 3.7.2) отмечается на территории Западной Сибири (на эталонном участке №15 на севере Тазовского полуострова до 1,4% относительно его площади), на Севере Восточной Сибири в пределах Колымской низменности (до 1,2% относительно площади эталонного участка) и на Севере Дальнего Востока в пределах Анадырской низменности (до 0,5% относительно площади эталонного участка). Сокращение площади озер на территории России обусловлено, главным образом, деятельностью водотоков, по которым осуществляется спуск озер, и зарастанием водоемов растительностью. Прямого влияния потепления климата на эти процессы не выявлено, можно судить лишь о возможном его косвенном влиянии на активизацию эрозионных и термоэрозионных процессов.

Увеличение озер, как по количеству увеличившихся озер, так и по приращению площади (рисунок 3.7.1, 3.7.2) существенно меньше сокращения и значительно преобладает над уменьшением лишь на территории Центральной Якутии (до 3,7% относительно площади эталонного участка), а также на Севере Восточной Сибири в пределах Яно-Индигирской низменности (до 1,6% относительно площади эталонного участка), и незначительно – на отдельных участках в зоне островного распространения мерзлоты на территории Западной Сибири (до 0,2% относительно площади эталонного участка №2 в пределах Среднеобской низменности) и в котловинах Забайкалья (до 0,3% относительно площади эталонного участка №2 в Верхнеангарской котловине). Локальное увеличение площади озер, однако меньшее, чем их уменьшение также отмечается в зоне сплошного распространения мерзлоты на территории Западной Сибири – на полуостровах Ямал и Гыдан (до 0,4% относительно площади эталонного участка). Наблюдаемое в разных регионах увеличение площади озер объясняется целым рядом факторов, и далеко не всегда связано с повышением температуры воздуха.

Во многих исследованных районах: *на севере Европейской России в дельте реки Печоры, на территории Яно-Индигирской низменности в дельте реки Яны, на территории Колымской низменности в верховьях реки Алазея, а также в котловинах Забайкалья* отмечается увеличение площади озер, обусловленное гидрологическими причинами – деятельностью соединяющих озера водотоков, по которым происходит наполнение озерных котловин. Увеличение площади озер в этих регионах, как правило, обусловлено изменчивостью водного режима и водного баланса рек и водотоков.

На территории Центральной Якутии, где отмечено наибольшее увеличение площади озер (до 30% согласно таблица 3.7.1), оно четко связано с колебаниями количества осадков, имеющими циклический характер с чередованием многоводных и маловодных периодов. Вслед за циклическостью многоводных и маловодных периодов выявлены соответствующие циклические межгодовые изменения (увеличение и уменьшение) площади озер.

На территории Яно-Индибирской и частично на территории Колымской низменности, а также на севере Западной Сибири (в отдельных районах полуострова Ямал и Гыдан) отмечается увеличение площади озер в виде узкой каймы по краю озерной котловины. Такое увеличение площади озер в районах сплошного распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород может быть обусловлено развитием процессов термокарста и термоабразии в результате волновой деятельности. Это единственные районы, в которых можно предположить активизацию термокарстовых процессов с некоторым увеличением площади озер.

В районах разработки нефтегазовых месторождений – *на юге Западной Сибири* отмечается также влияние антропогенной деятельности на увеличение площади озер; она проявляется в искусственном изменении гидрографической сети (при изъятии грунта, возведении насыпных площадок), изменении уровня грунтовых вод при закачке технологических растворов, непосредственном тепловом воздействии технических сооружений.

Детальное исследование динамики термокарстовых озер на севере Яно-Индибирской низменности помимо всего прочего выявило роль неотектоники в развитии термокарста, проявляющуюся через влияние на водный режим территории. Тектонические поднятия способствуют дренированности территории и не способствуют образованию новых озер, а тектонические опускания, напротив, сопровождаются обводнением поверхности и увеличением размеров озер. Наибольшее увеличение площади озер в виде узкой каймы по краю озерной котловины в этом районе как раз отмечается в областях тектонических опусканий.

Таким образом, на территории криолитозоны России преобладает сокращение площади термокарстовых озер, обусловленное преимущественно эрозионной деятельностью рек и зарастанием водоемов. Увеличение площади озер, преобладающее лишь в ряде районов (в Центральной Якутии и в котловинах Забайкалья) и локально встречающееся практически во всех рассмотренных районах, обусловлено, как правило, рядом факторов: деятельностью водотоков, количеством атмосферных осадков, возможной активизацией процессов термокарста в районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород, а также влиянием техногенных процессов.

3.8. Выводы

1. Термокарстовые озера, распространенные на территории криолитозоны России, характеризуются изменчивостью, выраженной как в уменьшении, так и в увеличении их площади и количества.

2. За период с 1970-х – 1980-х по 2000-е годы в целом по всей территории криолитозоны России сокращение площади озер и их количества преобладает над их увеличением. Сокращение площади озер в среднем для проанализированных в 6 районах 39 эталонных участков составляет $-2,9\%$, а увеличение – $+1,2\%$. Уменьшение количества озер составляет $-0,5\%$, а увеличение – $+0,3\%$. В различных районах криолитозоны эта картина дифференцируется.

3. Наибольшее сокращение площади озер отмечается на территории Западной Сибири (до $1,4\%$ относительно площади эталонного участка), в пределах Колымской низменности на Севере Восточной Сибири (до $1,2\%$ относительно площади эталонного участка), в пределах Анадырской низменности на Севере Дальнего Востока (до $0,5\%$ относительно площади эталонного участка).

4. Наибольшее увеличение площади озер отмечается на территории Центральной Якутии (до $3,7\%$ относительно площади эталонного участка), в пределах Яно-Индибирской низменности на Севере Восточной Сибири (до $1,6\%$ относительно площади эталонного участка).

5. Изменчивость термокарстовых озер определяется целым рядом сложно взаимодействующих факторов. Помимо повышения температуры воздуха, которое могло бы вызывать протаивание мерзлых пород и *активизацию термокарстового процесса*, действуют следующие факторы:

- *гидрологические* – деятельность соединяющих озера водотоков, по которым осуществляется спуск озер или наполнение озерных котловин, эрозионная деятельность рек вблизи озерных котловин, вызывающая прорывы озер или их наполнение. Гидрологические факторы вызывают как уменьшение, так и увеличение площади озер. В результате их деятельности могут наблюдаться циклические изменения площади озер от года к году.

- *метеорологические* – колебания количества атмосферных осадков, имеющие в отдельных районах циклический характер с чередованием многоводных и маловодных периодов. В таких случаях фиксируются преимущественно однонаправленные изменения площади озер в пределах целого района, которые могут менять характер изменения от года к году в зависимости от продолжительности многоводных и маловодных периодов.

- *антропогенная деятельность*, особенно в районах разработки нефтегазовых месторождений и строительства нефтегазопроводов, проявляющаяся в искусственном изменении гидрологической сети и в непосредственном тепловом воздействии технических

сооружений. Эта деятельность может вызывать как увеличение площади, так и сокращение площади озер, однако в большинстве случаев отмечается увеличение площади озер.

Помимо вышеперечисленных факторов выявлена также роль *неотектоники* в развитии термокарста, проявляющейся в однонаправленных медленных движениях земной коры и оказывающей влияние на водный режим территории. Тектонические поднятия способствуют дренированности территории и спуску озер, а тектонические опускания, напротив, сопровождаются обводнением территории и увеличением размеров озер.

6. Наблюдаемое на территории криолитозоны массовое сокращение площади озер обусловлено, главным образом, *гидрологическими факторами и зарастанием водоемов растительностью*. В отдельных случаях отмечается влияние антропогенной деятельности.

Выявленное на территории криолитозоны России увеличение площади озер обусловлено целым рядом факторов: *возможной активизацией термокарстового процесса* в районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород, сопровождающейся незначительным увеличением площади озер по краю озерной котловины (на Яно-Индибирской низменности, на побережье Северного Ледовитого Океана, на полуострове Ямал и Гыдан); *гидрологическими факторами*, действующими повсеместно, но особенно сильно проявляющимися в речных долинах на территории Колымской низменности, в дельтах рек Печора и Яна, в котловинах Забайкалья; *циклическим изменением количества атмосферных осадков*, в частности, на территории Центральной Якутии, которое приводит как к увеличению площади озер, так и к их уменьшению в зависимости от наступления многоводного или маловодного периода; *антропогенной деятельностью*, особенно в районах активной нефтедобычи на территории Среднеобской низменности на юге Западной Сибири;

7. В нашем исследовании, как и в работах американских и западносибирских исследователей в зоне сплошного распространения мерзлоты в Западной Сибири выявлено некоторое увеличение площади озер, однако процесс сокращения водоемов здесь протекает значительно интенсивнее (количество озер с уменьшением площади в 4,5 раза больше, чем с увеличением; уменьшение площади озер в 3,5 раза больше, чем ее увеличение), что в очередной раз подтвердило расхождение с их выводами относительно преобладающего увеличения площади озер в этом районе под влиянием современного потепления климата. И хотя наблюдаемое нами увеличение по краям озерных котловин может быть связано с активизацией термокарста и термоабразией, преобладающее сокращение озер почти повсеместно обусловлено гидрологическими причинами, спуском озер и их зарастанием.

8. В сложном комплексе факторов, влияющих на изменение размеров озер, выделить влияние современного потепления климата практически не представляется возможным. Динамику термокарстовых озер нельзя рассматривать лишь с точки зрения влияния одного фактора – потепления климата, необходимо учитывать целый ряд перечисленных выше факторов.

Заключение

В ходе диссертационного исследования последовательно выполнены следующие этапы: проанализировано состояние имеющихся исследований динамики термокарстовых озер, выявлены их особенности и недостатки; оценена надежность дешифрирования термокарстовых озер по космическим снимкам со спутника Landsat; разработана методика исследований динамики термокарстовых озер, обеспечивающая достоверное сопоставление разновременных снимков, надежность их дешифрирования и учет погрешности определения площади озер по ним; выполнены исследования динамики термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России и выявлены основные особенности и факторы, определяющие ее. Получены следующие результаты:

1. Динамика термокарстовых озер привлекает внимание ученых и практиков как возможный показатель состояния криолитозоны при потеплении климата. В связи с этим, начиная с 2000-х годов, выполнены многочисленные исследования динамики термокарстовых озер, охватывающие области как сплошного, так и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород в пределах полуострова Аляска и криолитозоны Евразии.

В ряде исследований выявлены существенные и разнонаправленные изменения термокарстовых озер, которые авторы связывали с активизацией термокарстового процесса под влиянием потепления климата: сокращение количества и площади озер на Аляске, где в зоне прерывистой мерзлоты наблюдается уменьшение площади озер до 50%, а в зоне сплошной мерзлоты до 6% (Fitzgerald, Riordan, 2003; Riordan et al, 2006); увеличение количества и площади озер до 12% в зоне сплошной мерзлоты в Западной Сибири (Smith et al, 2005; Кирпотин с соавт., 2008; Брыксина с соавт., 2009), двукратное увеличение площади озер в Центральной Якутии (Кравцова, Быстрова, 2009). При этом по одним и тем же территориям, особенно по Западной Сибири результаты имели сильные расхождения (Кирпотин с соавт., 2008; Кравцова, Тарасенко, 2010), что связано с различными методическими подходами.

Это обусловило необходимость разработки методики аэрокосмических исследований динамики термокарстовых озер, обеспечивающей достоверные результаты, и выполнения исследований на основе единой методики в различных районах криолитозоны с учетом их географической специфики, факторов, влияющих на процессы термокарста и в итоге определения возможности использования динамики термокарстовых озер в качестве индикатора состояния криолитозоны при потеплении климата.

2. Космические снимки со спутника Landsat, используемые в качестве основных материалов при изучении динамики термокарстовых озер, как имеющие ряд преимуществ по сравнению с другими космическими снимками, имеют существенные недостатки, в связи с невысоким пространственным разрешением, к тому же неодинаковым (80 и 30 м) у снимков, полученных в разные периоды.

Оценка надежности дешифрирования термокарстовых озер по космическим снимкам со спутника Landsat, выполненная с использованием снимков сверхвысокого разрешения со спутников WorldView-1, IRS-P5 (Cartosat) и SPOT-5 с разрешением 0,5–2,5 м, показала, что на снимке ETM+(TM)/Landsat полнота дешифрирования более 90% обеспечивается лишь для озер площадью более 0,5 га, а на снимке MSS/Landsat – для озер площадью более 3 га. На снимке ETM+(TM)/Landsat определение значений площади озер с погрешностью менее 10% возможно лишь для крупных озер площадью более 10 га, а на снимке MSS/Landsat – для озер площадью более 40 га. В связи с этим использование космических снимков со спутника Landsat должно учитывать ряд ограничений: исключение из рассмотрения малых озер с полнотой дешифрирования менее 90% и учет погрешности определения площади озер.

3. Сравнение разновременных снимков со спутника Landsat разного разрешения требует приведения их к одинаковой детальности путем исключения озер, не отображающихся на менее детальном снимке. Сравнение разновременных снимков одинакового разрешения также требует исключения из анализа малых озер, по-разному изображающихся на этих снимках из-за различий в их положении относительно сетки пикселей. Величины пороговых значений, обеспечивающих правомерность такого сравнения, определенные в результате сопоставления между собой единовременных космических снимков со спутника Landsat, составили: 0,4 га для снимков ETM+(TM)/Landsat и 2 га для снимков MSS/Landsat. Исключение из анализа малых озер такой величины обеспечивает сопоставимость количества озер на сравниваемых снимках.

Из-за больших значений погрешности определения площади малых озер, по количеству преобладающих в большинстве районов, нецелесообразно определять изменение суммарной площади всех озер. Рекомендуется оценивать изменения площади отдельных озер с учетом среднеквадратической погрешности их определения (изменения площади, превышающие значения $1,64\sigma$).

Количественную оценку изменений площади озер необходимо сочетать с составлением картографических материалов – схем динамики термокарстовых озер, обеспечивающих проверку выявленных изменений и визуальный пространственный анализ изменений.

4. На основе разработанной методики исследована динамика 300 000 термокарстовых озер на 39 эталонных участках в районах Севера Европейской части России, Западной Сибири, Севера Восточной Сибири и Дальнего Востока, Центральной Якутии, котловинах Забайкалья.

Согласно полученным результатам термокарстовые озера, распространенные на территории криолитозоны России, характеризуются небольшой изменчивостью, и разнонаправленной динамикой как в сторону уменьшения, так и увеличения их площади и количества. За период с 1970-х – 1980-х по 2000-е годы в целом по всей территории криолитозоны России сокращение площади озер и их количества преобладает над их увеличением. Сокращение площади озер составляет $-2,9\%$, а увеличение – $+1,2\%$. Уменьшение количества озер составляет $-0,5\%$, а увеличение – $+0,3\%$.

Изменчивость термокарстовых озер определяется целым рядом сложно взаимодействующих факторов. Помимо повышения температуры воздуха, которое могло бы вызывать протаивание мерзлых пород и активизацию термокарстового процесса, действуют гидрологические и метеорологические факторы, антропогенная деятельность.

Наблюдаемое на территории криолитозоны массовое сокращение площади озер обусловлено, главным образом, гидрологическими факторами и зарастанием водоемов растительностью. В отдельных случаях отмечается влияние антропогенной деятельности.

Выявленное на территории криолитозоны России увеличение площади озер обусловлено различными факторами: *возможной активизацией термокарстового процесса* в районах распространения высокольдистых многолетнемерзлых пород, сопровождающейся незначительным увеличением площади озер по краям озерных котловин (на Яно-Индигирской низменности, на побережье Северного Ледовитого Океана, на полуострове Ямал и Гыдан); *гидрологическими факторами*, действующими повсеместно, но особенно сильно проявляющимися в речных долинах на территории Колымской низменности, в дельтах рек Печора и Яна, в котловинах Забайкалья; *циклическим изменением количества атмосферных осадков*, в частности, на территории Центральной Якутии, которое приводит как к увеличению площади озер, так и к их уменьшению в зависимости от многоводности периода; *антропогенной деятельностью*, особенно в районах активной нефтедобычи на территории Среднеобской низменности на юге Западной Сибири.

Помимо вышеперечисленных факторов отмечается также роль *неотектоники* в развитии термокарста, которая проявляется в однонаправленных медленных движениях земной коры и оказывает влияние на водный режим территории. Тектонические поднятия способствуют дренированности территории и спуску озер, а тектонические опускания, напротив, сопровождаются обводнением территории и увеличением размеров озер.

В сложном комплексе факторов, влияющих на изменение размеров озер, выделить влияние современного потепления климата практически не представляется возможным.

Таким образом, для надежного выявления изменений площади озер по аэрокосмическим снимкам исследования динамики озер должны учитывать ряд ограничений, обусловленных пространственным разрешением используемых снимков, особенно при использовании разновременных снимков разного разрешения, и принимать во внимание ряд факторов, влияющих на динамику термокарстовых озер. Для надежного выявления причин наблюдаемых изменений рекомендуется проводить более детальные исследования с анализом межгодовых и сезонных изменений и с привлечением аэрокосмических снимков сверхвысокого и очень высокого пространственного разрешения.

Список литературы

1. **Батталов Ф.З.** Многолетние колебания атмосферных осадков и вычисление норм осадков [Текст] / Батталов Ф.З. – Л: Гидрометеоиздат, 1968. – 183 с.
2. **Берлянт А.М.** Картографический метод исследования: учебное пособие [Текст] / Берлянт А.М. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 251 с.
3. **Босиков Н.П.** Эволюция аласов Центральной Якутии [Текст] / Босиков Н.П. – Якутск, 1991. – 127 с.
4. **Брыксина Н.А.** Изучение взаимосвязи изменений климатических и термокарстовых процессов в зонах сплошной и прерывистой мерзлоты Западной Сибири [Текст] / Брыксина Н.А., Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. // Вестник Югорского государственного университета. – 2009. – №3. – С. 3–12
5. **Величко А.А.** Соотношение изменений климата в высоких и низких широтах Земли в позднем плейстоцене и голоцене [Текст] / Величко А.А. // Палеоклиматы и оледенения в плейстоцене. – М.: Наука, 1989. – С. 110
6. **Веремеева А.А.** Закономерности организации современного рельефа приморских низменностей севера Якутии на основе использования ГИС-технологий [Текст] / Веремеева А.А. // Материалы четвертой конференции геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 7-9 июня 2011 г. Т. 2. Часть 5. Региональная и историческая геокриология. Часть 6. Динамическая геокриология. – М: Университетская книга, 2011. – С. 29–35
7. **Верещака Т.В.** Топографические карты: Научные основы содержания [Текст] / Верещака Т.В. – М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2002. – 319 с.
8. **Викторов А.С.** Модели математической морфологии ландшафта при исследовании криолитозоны [Текст] / Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В. // Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению ТАСОР. Салехард. 25–29 июня 2012 г. – Тюмень: ООО “Печатник”, 2012. – т. 3 (статьи на русском языке). – С. 85–90
9. **Викторов А.С.** Основные проблемы математической морфологии ландшафта [Текст] / Викторов А.С. – М.: Наука, 2006. – 252 с.
10. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://meteo.ru>
11. **Гаврилов А.В.** Экологические неблагоприятные природные процессы приморской аккумулятивной равнины Северной Якутии [Текст] / Гаврилов А.В., Пижанкова Е.И., Деревягин А.Ю., Чижов А.Б. // Труды Десятой Международной конференции по

- мерзлотоведению ТАСОР. Салехард. 25–29 июня 2012 г. – Тюмень: ООО “Печатник”, 2012. – т. 3 (статьи на русском языке). – С. 97–100
12. **Гаврилова М.К.** Климат Центральной Якутии [Текст] / Гаврилова М.К. – Якутск: Кн. изд-во, 1973. – 119 с.
 13. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток [Текст] / под редакцией Ершова Э.Д. – М.: Недра, 1989. – 515 с.
 14. Геокриология СССР. Западная Сибирь [Текст] / под редакцией Ершова Э.Д. – М.: Недра, 1989. – 454 с.
 15. Геокриология СССР. Средняя Сибирь [Текст] / под редакцией Ершова Э.Д. – М.: Недра, 1989. – 413 с.
 16. **Гета Р.И.** Краткий физико-географический очерк озер Верхнеангарской впадины [Текст] / Гета Р.И. // Озера Прибайкальского участка зоны БАН. – Новосибирск: Наука, 1981. – С. 5–17
 17. **Гравис Г.Ф.** Цикличность термокарста на Приморской низменности в верхнем плейстоцене и голоцене [Текст] / Гравис Г.Ф. // III Междунар. конф. по мерзлотоведению: Доклады и сообщения. – Оттава, 1978. – С. 282–127
 18. **Гюнтер Ф.** Анализ развития термокарстового рельефа в южной части дельты Лены с помощью повторных спутниковых снимков и топографических съемок [Текст] / Гюнтер Ф., Моргенстерн А., Ульрих М., Ширрмейстер Л. // Геоморфологические процессы и их прикладные аспекты (труды VI Щукинских чтений). – Москва, 2010. – С. 524
 19. Дешифрирование многозональных аэрокосмических снимков. Методика и результаты [Атлас]. – М: Изд-во Наука, Берлин: Академи-Ферлаг, 1982. – 83 листа
 20. **Днепровская В.П.** Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков [Текст] / Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М. // Исследование земли из космоса. – 2009. – №4. – С. 1–9
 21. **Днепровская В.П.** Геоинформационный анализ геокриологических изменений в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири с использованием космических снимков [Текст] / Днепровская В.П., Полищук Ю.М. // Геоинформатика. – 2008. – №2. – С. 9–14
 22. **Егоров А.Д.** Воды и озера якутских аласов [Текст] / Егоров А.Д. – Якутск: Якуткнигоиздат, 1942. – 32 с.
 23. **Елсаков В.В.** Межгодовые изменения термокарстовых озер северо-востока Европейской России [Текст] / Елсаков В.В., Марущак И.О. // Исследование земли из космоса. – 2011. – №4. – С. 1–13

24. **Ершов Э.Д.** Общая геокриология [Текст] / Ершов Э.Д. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2002. – 682 с.
25. **Ефимов А.И.** К вопросу о развитии термокарстовых озер в Центральной Якутии [Текст] / Ефимов А.И. // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике, выпуск 2. – Изд-во АН СССР, 1950. – С. 98–114
26. **Земцов А.А.** Геоморфология Западно-Сибирской равнины (северная и центральная части) [Текст] / Земцов А.А. . – Томск: Изд-во Томск. Ун-та, 1976. – 342 с.
27. **Иванова В.М.** Математическая статистика: учебное пособие [Текст] / Иванова В.М., Калинина В.Н. и др. – М.: Высш. школа, 1981. – 371 с.
28. **Иванов М.С.** Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины [Текст] / Иванов М.С. – Новосибирск: Наука, 1984. – 125 с.
29. **Исаченко А.Г.** Ландшафты СССР [Текст] / Исаченко А.Г. – Л: Изд-во Ленингр. Ун-та, 1985. – 320 с.
30. **Каплина Т.Н.** Аласные комплексы Северной Якутии [Текст] / Каплина Т.Н. // Криосфера Земли. – 2009. – т. XIII. – №4. – С. 3–17
31. **Каплина Т.Н.** Древние аласные комплексы Северной Якутии [Текст] / Каплина Т.Н. // Криосфера Земли. – 2011. – т. XV. – №2. – С. 3–13
32. **Капралова В.Н.** Применение методов математической морфологии ландшафта для оценки риска поражения линейных инженерных сооружений термокарстовыми процессами [Текст] / Капралова В.Н., Викторов А.С. // Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению ТИСОП. Салехард. 25–29 июня 2012 г. – Тюмень: ООО “Печатник”, 2012. – т. 3 (статьи на русском языке). – С. 217–221
33. **Катасонов Е.М.** Аласные отложения и таберальные образования Якутии [Текст] / Катасонов Е.М. // Геология кайнозоя Якутии. – Якутск: Якутский филиал СО АН СССР, 1982. – С. 110–121
34. **Катасонов Е.М.** Строение и абсолютная геохронология аласных отложений Центральной Якутии [Текст] / Катасонов Е.М. – Новосибирск: Наука, 1979. – 95 с.
35. **Качурин С.П.** Термокарст на территории СССР [Текст] / Качурин С.П. – Изд-во Академии Наук СССР, 1961. – 289 с.
36. **Кирпотин С.Н.** Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления [Текст] / Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. // Вест. Томск. Госуд. Ун-та. – 2008. – № 311. – С. 185–189
37. **Книжников Ю.Ф.** Аэрокосмические исследования динамики географических явлений [Текст] / Книжников Ю.Ф. Кравцова В.И. – М.: Изд-во Моск. ун-та. – 1991. – 205 с.

38. **Книжников Ю.Ф.** Аэрокосмические методы географических исследований: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования [Текст] / Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. – М.: Издательский центр “Академия”, 2011. – 416 с.
39. **Конищев В.Н.** Реакция вечной мерзлоты на потепление климата [Текст] / Конищев В.Н. // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. География. – 2009. – №4. – С. 10–20
40. **Конищев В.Н.** Реакция вечной мерзлоты на потепление климата [Текст] / Конищев В.Н. // Криосфера Земли. – 2011. – т. XV. – №4. – с. 15–18
41. **Корниенко С.Г.** Использование данных космической съемки для картографирования и мониторинга природных ландшафтов криолитозоны в районах освоения нефтегазовых месторождений [Электронный ресурс] / Корниенко С.Г. // Тезисы конференции “Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы”. Москва. 5–6 июня 2013 г. (электронное издание на CD-R). – номер государственной регистрации обязательного электронного издания – 0321302405
42. **Корниенко С.Г.** Космический мониторинг водных объектов и растительных покровов в районе Бованенковского газоконденсатного месторождения (Западный Ямал) [Электронный ресурс] / Корниенко С.Г., Якубсон К.И. // Десятая всероссийская открытая ежегодная конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. Москва. ИКИ РАН. 12-16 ноября 2012 г.
43. Космические методы геоэкологии [Атлас]. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 104 с.
44. **Кравцова В.И.** Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет [Текст] / Кравцова В.И., Быстрова А.Г. // Криосфера Земли. – 2009. – т. 13. – №2. – С. 16–26
45. **Кравцова В.И.** Генерализация аэрокосмических изображений: континуальные и дискретные снимки [Текст] / Кравцова В.И. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. – 256 с.
46. **Кравцова В.И.** Космические методы исследования почв [Текст] / Кравцова В.И. – М.: АСПЕКТ ПРЕСС, 2005. – 190 с.
47. **Кравцова В.И.** Распространение термокарстовых озер в России [Текст] / Кравцова В.И. // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. География. – 2009. – №3. – С. 33–42
48. **Кравцова В.И.** Изучение и картографирование динамики термокарстовых озер на территории Западной Сибири по разновременным космическим снимкам [Текст] / Кравцова В.И., Тарасенко Т.В. // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. – 2010. – №1. – С. 82–87
49. **Кравцова В.И.** Компьютерные стереонаблюдения при географическом дешифрировании аэрокосмических снимков [Текст] / Кравцова В.И., Тюкавина А.Ю. // Геодезия и картография. – 2010. – № 3. – С. 34–39.

50. **Крицук Л.Н.** Процессы новообразования многолетнемерзлых пород на полуострове Ямал и их инженерно-геологическое значение [Текст] / Крицук Л.Н., Ястреба Н.В., Корниенко С.Г. // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы Восьмой Общероссийской конференции изыскательских организаций. – М.: ООО «Геомаркетинг» 2012. – С. 85–89
51. **Лабутина И.А.** Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ [Текст] / Лабутина И.А., Балдина Е.А. – М.: WWF России, 2011. – 88 с.
52. **Лабутина И.А.** Дешифрирование аэрокосмических снимков: Учебное пособие для студентов вузов [Текст] / Лабутина И.А. – М.: Аспект Пресс, 2004. – 184 с.
53. **Лурье И.К.** Геоинформационное картографирование: учебное пособие [Текст] / Лурье И.К. – М.: КДУ, 2008. – 424 с.
54. **Макунина А.А.** Физическая география СССР [Текст] /Макунина А.А. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1985. – 296 с.
55. **Малкова Г.В.** Геоинформационное картографирование современных изменений климата и криолитозоны на севере России [Текст] / Малкова Г.В. Павлов А.В. // Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению ТАСОР. Салехард. 25–29 июня 2012 г. – Тюмень: ООО “Печатник”, 2012. – т. 3 (статьи на русском языке). – С. 313–318
56. Материалы по физико-географическому районированию СССР (Сибирь и Дальний Восток) [Текст] / под редакцией Гвоздецкого Н.А. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1964. – 232с.
57. **Мир.** Атлас снежно-ледовых ресурсов Мира [Карты]. – М.: РАН, 1997. – 392 с.
58. **Мухин Н.И.** Особенности возникновения и развития термокарстовых озер на территории Яно-Индибирской низменности [Текст] / Мухин Н.И. // Озера криолитозоны Сибири. – Новосибирск: Наука, 1974. – С. 18–26
59. Национальный атлас России в четырех томах. Том 2. Природа. Экология [Карты]. – Москва, 2007. – 495 с.
60. **Немчинов А.Г.** О периодических колебаниях уровня озер Центральной Якутии [Текст] / Немчинов А.Г. // Научные сообщения Якутского филиала АН СССР, выпуск 1. – Якутск, 1958. – С. 30–37
61. **Николаев В.А.** Космическое ландшафтоведение [Текст] / Николаев В.А. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1993. – 81 с.
62. Общее мерзлотоведение [Текст] / под редакцией Кудрявцева В.А. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1978. – 463 с.
63. Общее мерзлотоведение [Текст] / под редакцией Мельникова П.И. и Толстихина Н.И. – Новосибирск: Наука, 1974. – 289 с.

64. Озера Баргузинской долины [Текст]. – Новосибирск: Наука, 1986. – 165 с.
65. Озера криолитозоны Сибири [Текст]. – Новосибирск: “Наука” Сибирское отделение, 1974. – 126 с.
66. **Орел Г.Ф.** Термокарстовые озера Чарской впадины [Текст] / Орел Г.Ф. // Геокриологические условия зоны Байкало-Амурской магистрали. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО АН СССР, 1980. – С. 63–68
67. **Орел Г.Ф.** Многолетняя изменчивость уровней озер Кодаро-Удоканского района [Текст] / Орел Г.Ф. // Проблемы рационального природопользования в Восточной Сибири. Тезисы докладов к научно-практической конференции. – Иркутск, 1984. – С. 114–116
68. Основы геокриологии. Часть 3. Региональная и историческая геокриология Мира [Текст] / под ред. Ершова Э.Д. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 575 с.
69. **Павлов А.В.** Оценка современных изменений температуры воздуха на территории криолитозоны России [Текст] / Павлов А.В., Ананьева Г.В. // Криосфера Земли. – 2004. – т. VIII. – №2. – с. 3–9
70. **Павлов А.В.** Современные изменения климата на севере России: Альбом мелкомасштабных карт [Текст] / Павлов А.В., Малкова Г.В. – Новосибирск: Академическое издательство “Гео”, 2005. – 54 с.
71. **Павлов А.В.** Мониторинг криолитозоны [Текст] / Павлов А.В. – Новосибирск: Гео, 2008. – 213 с.
72. **Пижанкова Е.И.** Термоденудация в береговой зоне Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков) [Текст] / Пижанкова Е.И. // Криосфера Земли. – 2011. – т. XV. – №3. – С. 61–70
73. **Полищук В.Ю.** Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты [Текст] / Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. – Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. – 129 с.
74. **Попов А.И.** Криолитология: учебное пособие [Текст] / Попов А.И., Розенбаум Г.Э., Тумель Н.В. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 239 с.
75. Региональная криолитология: учебное пособие [Текст] / под ред. А.И. Попова. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1989. – 256 с.
76. Рельеф Западно-Сибирской равнины [Текст]. – Новосибирск: “Наука” Сибирское отделение, 1988. – 189 с.
77. **Романовский Н.Н.** Основы криогенеза литосферы [Текст] / Романовский Н.Н. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1993. – 336 с.

78. **Салищев К.А.** Идеи и теоретические проблемы в картографии 80-х годов [Текст] / Салищев К.А. // Итоги науки и техники. Картография. Том 10. – М.: ВИНТИ, 1982. – 156 с.
79. **Санников Г.С.** Картометрические исследования термокарстовых озер на территории Бованенковского меторождения, полуостров Ямал [Текст] / Санников Г.С. // Криосфера Земли. – 2012. – т. XVI. – №2. – С. 30–37
80. **Серапинас Б.Б.** Качество и надежность геоинформационного картографирования // География, общество, окружающая среда. Том VII: Картография, геоинформатика и аэрокосмическое зондирование [Текст] / Серапинас Б.Б. / под ред. проф. А.М. Берлянта и проф. Ю.Ф. Книжникова. – М.: Издательский дом “Городец”, 2004. – С. 150–183
81. **Серапинас Б.Б.** Проблемы надежности в картографическом методе познания [Текст] / Серапинас Б.Б. // Университетская школа географической картографии. К 100-летию профессора К.А. Салищева / под ред. А.М. Берлянта – М.: Аспект Пресс, 2005. – с. 217–224
82. **Смирнова И.О.** Изучение динамики термокарстовых озер и береговой линии моря на северо-востоке Европейской части России по материалам разновременных космических съемок [Электронный ресурс] / Смирнова И.О., Сухачева Л.Л., Русанова А.А. // Тезисы конференции “Геокриологическое картографирование: проблемы и перспективы”. Москва. 5–6 июня 2013 г. (электронное издание на CD-R). – номер государственной регистрации обязательного электронного издания – 0321302405
83. **Смирнов Л.Е.** Надежность аэрокосмического картографирования [Текст] / Смирнов Л.Е. // Вестн. Ленинград. Ун-та. География и геология. – 1985. – выпуск 3. – №21. – С. 54–62
84. **Соловьев П.А.** Булгунняхы Центральной Якутии [Текст] / Соловьев П.А. // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике, выпуск 3. – Изд-во АН СССР, 1952. – С. 226–258
85. **Соловьев П.А.** Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья [Текст] / Соловьев П.А. – М: Изд-во АН СССР, 1959. – 144 с.
86. **Соловьев П.А.** Циклические изменения водообильности аласных озер Центральной Якутии в связи с колебаниями элементов климата [Текст] / Соловьев П.А. // Вопросы географии Якутии, выпуск 1. – Якутск, 1961. – с. 48–54
87. **СССР.** Геокриологическая карта СССР масштаба 1: 2500 000 [Карты]. – Винница: Винницкая картографическая фабрика, 1991
88. **Суходровский В.Л.** Экзогенное рельефообразование в криолитозоне [Текст] / Суходровский В.Л. – Изд-во “Наука”, 1979. – 277 с.

89. **Суходровский В.Л.** Годы странствий и наблюдений. Записки географа – геоморфолога [Текст] / Суходровский В.Л. – М.: Экон-информ, 2012. – 253 с.
90. **Томирдиаро С.В.** Природные процессы и освоение территорий зоны Вечной мерзлоты [Текст] / Томирдиаро С.В. – М.: “Недра”. – 145 с.
91. **Томирдиаро С.В.** Эволюция озерно-термокарстовых ландшафтов на равнинах Восточной Сибири и динамика подземного оледенения [Текст] / Томирдиаро С.В. // Палеогеографические аспекты изменения природных условий Сибири и Дальнего Востока. IV Научное совещание географов Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск, 1969. – С. 65–67
92. **Тюкавина А.** Изучение динамики термокарстовых озер правобережья нижней Яны по разновременным дистанционным данным [Текст] / Тюкавина А. // Исследования молодых географов: сборник статей победителей секции «География» XVI Международной молодежной научной конференции “Ломоносов”. – М: Географический факультет МГУ, 2009. – С. 109–112
93. **Тюменская область.** Атлас Тюменской области (выпуск 1) [Карты]. – Москва - Тюмень: ГУГК при совете министров СССР, 1971. – 27 листов
94. Физико-географическое районирование СССР. Характеристика региональных единиц [Текст] / под редакцией Гвоздецкого Н.А – Изд-во Моск. Ун-та, 1968. – 575 с.
95. **Шнитников А.В.** Внутривековые колебания уровня степных озер Западной Сибири и Северного Казахстана и их зависимость от климата [Текст] / Шнитников А.В. // Труды лаборатории озероведения, том 1. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – С. 28–129
96. **Шполянская Н.А.** Вечная мерзлота и глобальные изменения климата [Текст] / Шполянская Н.А. – М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2010. – 200 с.
97. **Шполянская Н.А.** Особенности плейстоцен-голоценовой истории криолитозоны западного и восточного секторов Российской Арктики и Субарктики [Текст] / Шполянская Н.А. // Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению ТИСОП. Салехард. 25–29 июня 2012 г. – Тюмень: ООО “Печатник”, 2012. – т. 3 (статьи на русском языке). – С. 591–596
98. **Шур Ю.Л.** Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст [Текст] / Шур Ю.Л. – Новосибирск: Наука, 1988. – 212 с.
99. **Шур Ю.Л.** О причинах возникновения термокарста [Текст] / Шур Ю.Л. // Физико-геологические процессы в промерзающих и протаивающих породах, выпуск 70. – М., 1974. – С. 31–47

100. **Eisner W.** Advancing landscape change research through the incorporation of Inupiaq knowledge [Текст] / Eisner W., Cuomo C., Hinkel K., Jones B., Brower R. // Arctic. – 2009. – vol. 62. – № 4. – P. 429–442
101. **Eisner W.** Using indigenous knowledge to assess environmental impact of overland travel routes, Arctic Coastal Plain of Alaska [Текст] / Eisner W., Hinkel K., Jones B., Cuomo C. // Ninth International Conference on Permafrost, Kane DL & Hinkel KM (eds). – Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008. – vol. 1. – P. 415–420
102. **Fitzgerald D.** Permafrost and ponds. Remote sensing and GIS used to monitor Alaska wetlands at the landscape level [Текст] / Fitzgerald D., Riordan B.A. // Agroborealis. – 2003. – 35. – №1. – P.30–35
103. **Fortier D.** Observation of rapid drainage system development by thermal erosion of ice wedges on Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago [Текст] / Fortier D., M. Allard, Y. Shur. // Permafrost and periglacial processes. – 2007. – 18. – P. 229–243
104. **Frohn, R.** Remote sensing of thaw lake basins on the North Slope of Alaska [Электронный ресурс] / Frohn, R., Eisner, W. R., Hinkel, K. M., & Arellano-Neri, O. – Proceedings American society of photogrammetry and remote sensing on CD-ROM, 2001
105. **Frohn R.** Satellite remote sensing classification of thaw lakes and drained thaw lake basins on the North Slope of Alaska [Текст] / Frohn R., Hinkel K., Eisner W. // Remote Sensing of Environment. – 2005. – 97. – P. 116–126
106. **Grosse G.** The use of CORONA images in remote sensing of periglacial geomorphology: an illustration from the NE Siberian coast [Текст] / Grosse G., Schirrmeyer L., Kunitsky V., Hubberten H. W. // Permafrost and periglacial processes. – 2005. – 16. – P. 163–172
107. **Grosse G.** Application of Landsat-7 satellite data and a DEM for the quantification of thermokarst-affected terrain types in the periglacial Lena-Anabar coastal lowland [Текст] / Grosse G., Schirrmeyer L., Malthus T. // Polar Research. – 2006. – 25 (1). – P. 51–67
108. **Grosse G.** Distribution of Thermokarst Lakes and Ponds at Three Yedoma Sites in Siberia [Текст] / Grosse G, Romanovsky V, Walter K, Morgenstern A, Lantuit H, Zimov S. // Ninth International Conference on Permafrost, Kane DL & Hinkel KM (eds). – Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008a. – vol. 1. – P. 551–556
109. **Grosse G.** Monitoring thaw lake dynamics using high-resolution remote sensing [Электронный ресурс] / Grosse G., Walter K., Romanovsky V. – 2008b. – режим доступа: http://instaar.colorado.edu/QGISL/ARCN/high_res_workshop/presentations/Grosse_High_Res_2008.pdf

110. **Hese S.** Object based thermokarst lake change mapping as part of the ESA "Data User Element permafrost" [Текст] / Hese S., Grosse G., Pocking S. // Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2010. – Vol. XXXVIII-4/C7
111. **Hinkel K.** Spatial extent, age, and carbon stocks in drained thaw lake basins on the Barrow Peninsula, Alaska [Текст] / Hinkel K., Eisner W., Bockheim J., Nelson F., Peterson K., Dai X. // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. – 2003. – vol. 35. – № 3. – P. 291–300
112. **Hinkel K.** Morphometric and spatial analysis of thaw lakes and drained thaw lake basin in the Western Arctic Coastal Plain, Alaska [Текст] / Hinkel K., Frohn., Nelson F., Eisner W., Beck R. // Permafrost and periglacial processes. – 2005. – 16. – P. 327–341
113. **Hinkel K.** Methods to natural and anthropogenic thaw lake drainage on the western Arctic coastal plain of northern Alaska [Текст] / Hinkel K., Jones B., Eisner W., Cuomo C., Beck R., Frohn R. // Journal of geophysical research. – 2007. – vol.112. – F02S16. – doi:10.1029/2006JF000584
114. **Kirpotin S.** One of possible mechanisms of thermokarst lakes drainage in West-Siberian North [Текст] / Kirpotin S., Polishchuk Yu., Zakharova E., Shirokova L., Pokrovsky O., Kolmakova M., Dupre B. // International Journal of Environmental Studies. – 2008. – vol. 65. – № 56. – P. 631–635
115. **Klein E.** Wetland drying and succession across the Kenai Peninsula Lowland, south-central Alaska [Текст] / Klein E., Berg E., Dial R. // Canadian journal of forest research. – 2005. – 35. – P. 1931–1941
116. **Kokelj S.V.** The influence of thermokarst disturbance on the water quality of small upland lakes, Mackenzie Delta Region, Northwest Territories, Canada [Текст] / Kokelj S.V. // Permafrost and periglacial processes. – 2005. – 16. – P. 343–353
117. **Lantz T.C.** Increasing rates of retrogressive thaw slump activity in the Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada [Текст] / Lantz T.C., Kokelj S.V. // Geophysical Research Letters. – 35. – L06502
118. **Lehner B.** Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands [Текст] / Lehner B., Doll P. // Journal of hydrology. – 2004. – 296. – P. 1–22
119. **Luoto M.** Thermokarst ponds as indicator of the former distribution of palsas in Finnish Lapland [Текст] / Luoto M., Seppala M. // Permafrost and periglacial processes. – 2003. – 14. – P. 19–27
120. **Morgenstern A.** Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta [Текст] / Morgenstern A., Grosse G., Gunther F., Fedorova I., Schirrmeister L. // The Cryosphere. – 2011. – 5. – P. 849–867. – doi:10.5194/tc-5-849-2011

121. **Morgenatern A.** Genetic, morphological and statistical characterization of lakes in the permafrost-dominated Lena Delta [Текст] / Morgenatern A., Grosse G., Schirrmeister L. // Ninth International Conference on Permafrost, Kane DL & Hinkel KM (eds). – Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008. – vol. 2. – P. 1239–1244
122. **Shah C.** Automated image registration based on pseudoinvariant metrics of dynamic land-surface features [Текст] / Shah C., Sheng Y., Smith L. // Transactions on geoscience and remote sensing. – November 2008. – vol. 46. – № 11. – P. 3908–3916
123. **Sheng Y.** Automated image registration for hydrologic change detection in the lake-rich arctic [Текст] / Sheng Y., Shah C., Smith L. // Geoscience and remote sensing letters. – July 2008. – vol. 5. – № 3. – P. 414–418
124. **Smith L.C.** Disappearing Arctic Lakes [Текст] / Smith L.C., Sheng Y., Macdonald G.M., Hinzman L.D. // Science. – 2005. – v. 308. – №5727. – P. 1429
125. **Riordan B.** Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950-2002 remotely sensed images [Текст] / Riordan B., Verbyla D., David McGuire A. // Journal of geophysical research. – 2006. – vol. 111. – G04002. – doi:10.1029/2005JG000150
126. United States Geological Survey (USGS) [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://glovis.usgs.gov>
127. **Yoshikawa K.** Shrinking thermokarst pond and groundwater dynamics in discontinuous permafrost near council, Alaska [Текст] / Yoshikawa K., Hinzman L. // Permafrost and periglacial processes. – 2003. – 14. – P. 151–160
128. **Zuidhoff F.S.** Changes in palsa distribution in relation to climate change in Laivadalen, Northern Sweden, especially 1960 – 1997 [Текст] / Zuidhoff F.S., Kolstrup E. // Permafrost and periglacial processes. – 2000. – 11. – P. 55–69

Список иллюстративного материала

Рисунок 1.1. Уменьшенная копия карты вечной мерзлоты 1:15 000 000 (Национальный атлас России, 2007).....	8
Таблица 1.1 Причины возникновения термокарста (обобщение имеющихся представлений).....	11
Рисунок 1.2. Возможные границы распространения криолитозоны в кайнозое (по В.В. Баулину, Н.С. Даниловой, К.А. Кондратьевой): 1 – в неогене - раннем плейстоцене; 2 – в позднем плейстоцене; 3 – в климатическом оптимуме голоцена; 4 – в климатическом оптимуме голоцена и позднем голоцене на глубине 70 – 200 м от поверхности; 5 – в настоящее время.....	16
Рисунок 1.3. Исследования динамики термокарстовых озер на территории России.....	19
Таблица 1.2 Исследования динамики термокарстовых озер.....	19
Рисунок 1.4. Расположение эталонных участков на территории Аляски, исследованных в работах Fitzgerald D., Riordan B.A., 2003 (А) и Riordan B., Verbyla D., David McGuire A., 2006 (Б).....	23
Рисунок 1.5. Возможные механизмы исчезновения термокарстовых озер при потеплении климата.....	24
Рисунок 1.6. Район исследования К. Hinkel с соавторами (слева); озера, площадь которых сократилась с 1970-х по 2000 г. с выявленными причинами изменений (справа).....	25
Рисунок 1.7. Размещение эталонных участков (Кравцова, Быстрова, 2009).....	26
Рисунок 1.8. Карта повышений температуры воздуха в 2000 году (определенных по средним десятилетним скользящим значениям) относительно 1950-х годов с наложенными на нее эталонными участками с различными изменениями термокарстовых озер. <i>Приращения температуры воздуха: 1 – слабые, 2 – умеренные, 3 – сильные. Эталонные участки: 4 – не обнаружено изменений площади озер, 5 – обнаружено уменьшение площади озер, 6 – обнаружено уменьшение и увеличение площади озер, 7 – обнаружено увеличение площади озер</i> (составлена автором по материалам Павлов, Ананьева, 2004; Кравцова, Быстрова, 2009).....	27
Рисунок 1.9. Эталонные участки, проанализированные в пределах Европейской территории России (Елсаков, Марущак, 2011).....	28
Рисунок 1.10. Результаты исследования L.C. Smith с соавторами, 2005.....	29
Рисунок 1.11. Расположение тестовых участков на территории Западной Сибири, проанализированных Кирпотиным С.Н., Полищуком Ю.М., Брыксиной Н.А., 2008 (слева) и Брыксиной Н.А., Полищуком В.Ю., Полищуком Ю.М., 2009 (справа).....	29
Рисунок 1.12. Расположение эталонных участков (Кравцова, Тарасенко, 2010).....	30
Рисунок 2.1. Методическая схема исследования динамики термокарстовых озер.....	35
Рисунок 2.2. Наличие пропусков в регистрации изображения ЕТМ+.....	37

Рисунок 2.3. Соответствие изображения термокарстовых озер на космическом снимке со спутника Landsat 1973 г. (а) и топографической карте масштаба 1:200 000 1973-1974 гг. (б)....	38
Рисунок 2.4. Эталонные участки, проанализированные в диссертационном исследовании (в качестве основы использована карта “Подземные льды” из Атласа снежно-ледовых ресурсов Мира, 1997).....	40
Рисунок 2.5. Изображение теней от облаков на снимках: а – в комбинации каналов RGB 321, б – в ближней инфракрасной зоне.....	40
Рисунок 2.6. Лед на озерах в начале летнего сезона.....	41
Рисунок 2.7. Изменение площади озер от начала к концу лета.....	41
Рисунок 2.8. Изменение водной растительности в течение сезона вегетации в разные годы....	41
Рисунок 2.9. Изображение водных объектов на снимках в ближней инфракрасной зоне со спутников Landsat.....	44
Рисунок 2.10. Кривые спектральных образов различных объектов.....	45
Рисунок 2.11. Двумерный график пространства спектральных признаков.....	45
Рисунок 2.12. Изображение гарей на снимках в разных зонах и вариантах синтеза: а – комбинация каналов RGB 742, б – снимок в ближней инфракрасной зоне, в – снимок в средней инфракрасной зоне.....	45
Рисунок 2.13. Результат автоматизированного дешифрирования водных объектов по снимкам со спутника Landsat на основе кластеризации ISODATA.....	47
Рисунок 2.14. Расположение эталонных участков: А – на территории Западной Сибири, Б – на территории Центральной Якутии.....	50
Таблица 2.1. Космические снимки, использованные для оценки надежности дешифрирования термокарстовых озер.....	50
Таблица 2.2. Характеристика сети озер эталонных участков по снимкам сверхвысокого разрешения.....	51
Рисунок 2.15. Фрагменты космических снимков на территорию эталонного участка №1, Ямал.....	52
Рисунок 2.16. Фрагменты космических снимков на территорию эталонного участка №2, Вилюй.....	52
Рисунок 2.17. Фрагменты космических снимков на территорию эталонного участка №3, Амга.....	53
Рисунок 2.18. Средняя квадратическая погрешность определения площади озер по снимку ETM+(TM)/Landsat, вычисленная с использованием разных методов векторизации: со сглаживанием очертаний полигонов и без сглаживания очертаний полигонов.....	54

Рисунок 2.19. Полнота дешифрирования термокарстовых озер разной площади по снимку ETM+(TM)/Landsat относительно снимков сверхвысокого разрешения.....	56
Рисунок 2.20. Полнота дешифрирования термокарстовых озер разной площади по снимку MSS/Landsat относительно снимков сверхвысокого разрешения.....	56
Таблица 2.3. Показатели надежности дешифрирования термокарстовых озер по космическим снимкам ETM+(TM)/Landsat.....	57
Таблица 2.4. Показатели надежности дешифрирования термокарстовых озер по космическим снимкам MSS/Landsat.....	57
Рисунок 2.21. Изменение относительной погрешности определения площадей озер по снимку ETM+(TM)/Landsat в зависимости от площади озер.....	59
Рисунок 2.22. Изменение относительной погрешности определения площадей озер по снимку MSS/Landsat в зависимости от площади озер.....	59
Рисунок 2.23. Средняя квадратическая погрешность определения площади озер по снимку ETM+(TM)/Landsat.....	60
Рисунок 2.24. Средняя квадратическая погрешность определения площади озер по снимку MSS/Landsat.....	60
Рисунок 2.25. Примеры термокарстовых озер с разными значениями относительной погрешности определения площади озер по снимку TM/Landsat (подписана площадь озер и относительная погрешность ее определения).....	61
Рисунок 2.26. Примеры термокарстовых озер с разными значениями относительной погрешности определения площади озер по смоделированному снимку MSS/Landsat (подписана площадь озер и относительная погрешность ее определения).....	61
Рисунок 2.27. Схемы сопоставления снимков разного разрешения: А – для всех выделенных озер, Б – для озер с полнотой дешифрирования более 90% (для озер площадью более 0,5 га), В – для озер, погрешность определения площади которых составляет менее 10% (для озер площадью более 10 га).....	63
Рисунок 2.28. Расположение участков исследования: А – на территории Западной Сибири, Б – на территории Центральной Якутии.....	65
Таблица 2.5. Космические снимки, использованные для оценки среднеквадратических отклонений площадей озер, определяемых по снимкам Landsat.....	65
Рисунок 2.29. Полнота дешифрирования термокарстовых озер разной площади по снимкам ETM+(TM)/Landsat относительно снимков ETM+(TM)/Landsat за близкие даты.....	66
Рисунок 2.30. Полнота дешифрирования термокарстовых озер разной площади по снимкам MSS/Landsat относительно снимков ETM+(TM)/Landsat.....	66

Рисунок 2.31. Среднеквадратические погрешности определения площади озер по снимку ETM+(TM)/Landsat относительно снимка ETM+(TM)/Landsat за близкие даты.....	67
Рисунок 2.32. Среднеквадратические погрешности определения площади озер по снимку MSS/Landsat относительно снимка ETM+(TM)/Landsat.....	67
Рисунок 2.33. График плотности вероятности нормального распределения и процент попадания случайной величины на отрезки, равные среднеквадратическому отклонению (http://ru.wikipedia.org).....	68
Рисунок 2.34. Результат векторизации растровой модели представления данных.....	70
Рисунок 2.35. Озера, состоящие из нескольких частей, имеющих общие точки: А – до операции объединения, Б – после операции объединения.....	70
Рисунок 3.1.1. Обобщенная схема распространения термокарстовых озер на территории России (Кравцова, 2009) 1 – районы локального распространения преимущественно малых озер; 2 – районы повсеместного распространения преимущественно малых и средних озер; 3 – районы повсеместного распространения преимущественно средних и крупных озер.....	79
Рисунок 3.1.2. Тренды увеличения среднегодовой температуры воздуха и температуры мерзлых толщ (Малкова, Павлов, 2012).....	80
Рисунок 3.1.3. Карта метеогеокриологического риска криолитозоны России: (1-8) – баллы риска; 9- южная граница криолитозоны, 10 – граница сплошного распространения мерзлоты; 11 – метеостанции (Малкова, Павлов, 2012).....	81
Рисунок 3.1.4. Районы исследования динамики термокарстовых озер.....	82
Рисунок 3.2.1. Расположение эталонных участков в Европейской части России: 1 – о. Вайгач; 2 – бассейн р. Коротаиха; 3 – побережье Хайпудырской губы; 4 – низовья р. Печоры; 5 – долина р. Печоры (Малоземельская тундра); 6 – южная часть п-ова Канин.....	87
Рисунок 3.2.2. Расположение эталонных участков в Европейской части России.....	87
Таблица 3.2.1. Характеристика сети озер эталонных участков по современным космическим снимкам со спутника Landsat.....	87
Таблица 3.2.2. Космические снимки, использованные для анализа многолетних изменений площади озер.....	88
Таблица 3.2.3. Характеристика сети озер, проанализированных по современным космическим снимкам со спутника Landsat на эталонных участках.....	89
Таблица 3.2.4. Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков.....	90
Рисунок 3.2.3. Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков.....	90
Рисунок 3.2.4. Изменение площади озер относительно площади эталонных участков.....	90
Рисунок 3.2.5. Количество изменившихся озер в пределах эталонных участков.....	91

Рисунок 3.2.6. Фрагменты эталонных участков: А - №2 (1986 – 2009 гг.), Б - №3 (1985 – 2010 гг.).....	91
Рисунок 3.2.7. Фрагменты эталонного участка №4 (1973 – 2007 гг.).....	92
Рисунок 3.3.1. Распространение многолетнемерзлых пород на территории Западной Сибири (фрагмент карты “Подземные льды” из Атласа снежно-ледовых ресурсов Мира, 1997).....	94
Рисунок 3.3.2. Расположение месторождений и трубопроводов нефти и газа.....	99
Рисунок 3.3.3. Расположение эталонных участков на территории Западной Сибири.....	100
Рисунок 3.3.4. Расположение эталонных участков на территории Западной Сибири.....	100
Таблица 3.3.1. Характеристика сети озер эталонных участков по современным космическим снимкам со спутника Landsat.....	101
Таблица 3.3.2. Космические снимки, использованные для анализа многолетних изменений площади озер.....	102
Таблица 3.3.3. Характеристика сети озер, проанализированных по современным космическим снимкам со спутника Landsat на эталонных участках.....	103
Таблица 3.3.4. Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков.....	104
Рисунок 3.3.5. Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков.....	105
Рисунок 3.3.6. Изменение площади озер относительно площади эталонных участков.....	105
Рисунок 3.3.7. Количество изменившихся озер в пределах эталонных участков.....	106
Рисунок 3.3.8. Фрагмент эталонного участка №4 (1973 – 2007 гг.).....	106
Рисунок 3.3.9. А - фрагмент эталонного участка №3 (1973 – 2011 гг.), Б – фотография озера Сигтын-Эмтор.....	107
Рисунок 3.3.10. Фрагмент эталонного участка №2 (1973 – 2007 гг.).....	107
Рисунок 3.3.11. Появление и увеличение площади озер в пределах эталонного участка №2... ..	108
Рисунок 3.3.12. Уменьшение площади озера рядом с объектами инфраструктуры.....	108
Рисунок 3.3.13. Фрагмент эталонного участка №7 (1973 – 2009 гг.).....	109
Рисунок 3.3.14. Частичный спуск озера рекой.....	110
Рисунок 3.3.15. Полный спуск озер рекой.....	110
Рисунок 3.3.16. Фрагмент эталонного участка №8 (1973 – 2007 гг.).....	110
Рисунок 3.3.17. Фрагменты эталонных участков: А - №12 (1994 – 2009 гг.), Б - №14 (1988 – 2011 гг.).....	111
Рисунок 3.3.18. Фрагменты эталонных участков: А - №13 (1973 – 2010 гг.), Б - №19 (1988 – 2006 гг.).....	113
Рисунок 3.3.19. Увеличение площади озера по краю. Синим цветом показана береговая линия озера в 2010 г.....	113

Рисунок 3.4.1. Расположение эталонных участков на Севере Восточной Сибири и Дальнего Востока; <i>В пределах Яно-Индигирской низменности</i> : 1 – на территории п-ова Широкостан и южнее, 2 – в дельте р. Яны; <i>В пределах Колымской низменности</i> : 3 – в бассейне р. Рассоха, 4 – в верховьях р. Алазея; <i>На побережье Северного Ледовитого Океана</i> : 5 – на территории о. Айон и южнее, 6 – на побережье Чукотского моря; <i>На побережье Анадырского залива</i> : 7 – на побережье залива Креста, 8 – на территории Анадырской низменности.....	119
Рисунок 3.4.2. Расположение эталонных участков на Севере Восточной Сибири и Дальнего Востока.....	120
Таблица 3.4.1. Характеристика сети озер эталонных участков по современным космическим снимкам со спутника Landsat.....	120
Таблица 3.4.2. Космические снимки, использованные для анализа многолетних изменений площади озер.....	121
Таблица 3.4.3. Характеристика сети озер, проанализированных по современным космическим снимкам со спутника Landsat на эталонных участках.....	122
Таблица 3.4.4. Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков.....	122
Рисунок 3.4.3 Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков.....	123
Рисунок 3.4.4. Изменение площади озер относительно площади эталонных участков.....	123
Рисунок 3.4.5. Количество изменившихся озер в пределах эталонных участков.....	124
Рисунок 3.4.6. Фрагменты эталонных участков: А - №1 (1972 – 2011 гг.), Б - №2 (1972 – 2011 гг.).....	124
Рисунок 3.4.7. Фрагменты эталонного участка №3 (1974 – 2001 гг.).....	125
Рисунок 3.4.8. Фрагменты эталонного участка №4 (1973 – 2001 гг.).....	126
Рисунок 3.4.9. Фрагмент эталонного участка №4 (1973 – 2001 гг.).....	126
Рисунок 3.4.10. Фрагмент эталонного участка №5 (1974 – 2002 гг.).....	127
Рисунок 3.4.11. Фрагмент эталонного участка №8 (1974 – 2001 гг.).....	128
Рисунок 3.4.12. Расположение ключевого участка “Широкостан”.....	129
Рисунок 3.4.13. Рельеф поверхности ключевого участка “Широкостан”.....	130
Таблица 3.4.5 Распределение озер на территории ключевого участка “Широкостан”.....	131
Таблица 3.4.6 Распределение озер на территории ключевого участка “Широкостан”.....	132
Таблица 3.4.7 Космические снимки, использованные для проверки изменений площади озер.....	133
Рисунок 3.4.14. Изменения площади озер с 1951 по 2009 гг. в пределах ключевого участка “Широкостан”.....	134
Таблица 3.4.8. Многолетние изменения площади озер с 1951 по 2009 гг.....	134
Таблица 3.4.9. Многолетние изменения площади озер с 1951 по 2009 гг.....	135

Таблица 3.4.10. Соотношение размеров озер, изменившихся с 1951 по 2009 гг.....	135
Рисунок 3.4.15. Дренирование озер образовавшимся водотоком.....	136
Рисунок 3.4.16. Изменение поверхности озерной котловины после спуска. Полигональный микрорельеф в термокарстовой котловине по периферии остаточного водоема свидетельствует о промерзании бывшего подоозерного талика с морозобойным растрескиванием и формированием повторно-жильных льдов.....	137
Рисунок 3.4.17. Частичный спуск озера по небольшому каналу.....	138
Рисунок 3.4.18. Фрагмент ключевого участка “Широкостан” (1951 – 2009 гг.).....	138
Рисунок 3.4.19. Увеличение площади озера за счет вытаивания полигонально-жильных льдов.....	139
Рисунок 3.4.20. Спущенное озеро в пределах ледового комплекса.....	140
Рисунок 3.4.21. Озеро, спущенное в море в результате образования оврага по повторно-жильным льдам.....	140
Рисунок 3.4.22. Озеро, спущенное в море в результате отступления берега моря.....	140
Рисунок 3.4.23. Сокращение площади малых озер в пределах ледового комплекса.....	141
Таблица 3.5.1. Фазы обводнения озер Центральной Якутии, выделенные разными исследователями.....	145
Рисунок 3.5.1. Расположение эталонных участков на территории Центральной Якутии: 1 – на левобережье Вилюя, 2 – на территории Лено-Амгинского междуречья.....	146
Рисунок 3.5.2. Расположение эталонных участков на территории Центральной Якутии.....	146
Таблица 3.5.2. Характеристика сети озер эталонных участков по современным космическим снимкам со спутника Landsat.....	146
Таблица 3.5.3. Космические снимки, использованные для анализа многолетних изменений площади озер.....	147
Рисунок 3.5.3. Расположение проанализированных фрагментов в пределах эталонного участка №2.....	147
Таблица 3.5.4. Характеристика сети озер, проанализированных по современным космическим снимкам со спутника Landsat на эталонных участках.....	147
Таблица 3.5.5. Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков.....	148
Рисунок 3.5.4. Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков.....	148
Рисунок 3.5.5. Изменение площади озер относительно площади эталонных участков.....	149
Рисунок 3.5.6. Количество изменившихся озер в пределах эталонных участков.....	149
Рисунок 3.5.7. Фрагменты эталонных участков: А - №2 (1967 – 2007 гг.), Б - №1 (1973–2009 гг.).....	150
Рисунок 3.5.8. График годовых сумм осадков по станции Вилюйск.....	150

Рисунок 3.5.9. График годовых сумм осадков по станции Якутск.....	151
Рисунок 3.5.10. График скользящих 6-летних значений годовых сумм осадков по станции Вилюйск.....	151
Рисунок 3.5.11. График скользящих 6-летних значений годовых сумм осадков по станции Якутск.....	151
Рисунок 3.5.12. График среднегодовой температуры воздуха по станции Вилюйск.....	151
Рисунок 3.5.13. График среднегодовой температуры воздуха по станции Якутск.....	151
Рисунок 3.5.14. График скользящих 6-летних значений температуры воздуха по станции Вилюйск.....	151
Рисунок 3.5.15. График скользящих 6-летних значений температуры воздуха по станции Якутск.....	152
Рисунок 3.5.16. Нормированная разностная интегральная кривая годовых сумм осадков по станции Вилюйск.....	153
Рисунок 3.5.17. Изменение площади озер, представленное на фрагмент эталонного участка №1.....	154
Рисунок 3.5.18. Нормированная разностная интегральная кривая годовых сумм осадков по станции Якутск.....	155
Таблица 3.5.6. Космические снимки, использованные для анализа годовых изменений площади озер.....	156
Таблица 3.5.7. Годовые изменения площади озер, выявленные в пределах эталонного участка №2.....	156
Рисунок 3.5.19. Изменение площади озер относительно проанализированной площади в фазы разной водности.....	156
Рисунок 3.5.20. Количество изменившихся озер в пределах проанализированной площади в фазы разной водности.....	157
Рисунок 3.5.21. Годовые изменения площади озер, представленные на фрагмент эталонного участка №2.....	157
Рисунок 3.6.1. Расположение эталонных участков в Забайкалье: 1 – Чарская котловина, 2 – Верхнеангарская котловина, 3 – Баргузинская котловина.....	160
Рисунок 3.6.2. Расположение эталонных участков в котловинах Забайкалья.....	160
Таблица 3.6.1. Характеристика сети озер эталонных участков по современным космическим снимкам со спутника Landsat.....	161
Таблица 3.6.2. Космические снимки, использованные для анализа многолетних изменений площади озер.....	161

Таблица 3.6.3. Характеристика сети озер, проанализированных по современным космическим снимкам со спутника Landsat на эталонных участках.....	162
Таблица 3.6.4. Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков.....	162
Рисунок 3.6.3. Изменения площади озер, выявленные в пределах эталонных участков.....	163
Рисунок 3.6.4. Изменение площади озер относительно площади эталонных участков.....	163
Рисунок 3.6.5. Количество изменившихся озер в пределах эталонных участков.....	163
Рисунок 3.6.6. Фрагмент эталонного участка №2 (1979 – 2002 гг.).....	164
Таблица 3.6.5. Космические снимки, использованные для анализа межгодовых изменений площади озер на территории Верхнеангарской котловины.....	164
Рисунок 3.6.7. Межгодовые изменения площади озер на фрагменте эталонного участка №2..	165
Рисунок 3.6.8. Межгодовые изменения площади отдельных озер.....	166
Рисунок 3.6.9. График годовых сумм осадков по станции Нижнеангарск.....	166
Рисунок 3.7.1. Количество изменившихся озер в пределах эталонных участков.....	168
Рисунок 3.7.2. Изменение площади озер относительно площади эталонных участков.....	168
Таблица 3.7.1. Изменение площади термокарстовых озер в различных районах криолитозоны.....	169
Таблица 3.7.2. Изменение количества термокарстовых озер в различных районах криолитозоны.....	169