

ДИНАМИКА ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА С 1950 ГОДА

В.И. Кравцова, Т.В. Тарасенко

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, географический ф-т,
199991, Москва, Ленинские горы, Россия, valentinamsu@yandex.ru, manunya_geo@mail.ru*

Выполнен анализ динамики термокарстовых озер Центральной Якутии с 1950-х гг. в период наблюдавшегося повышения температуры воздуха. Исследования проведены на двух эталонных участках (в междуречье Вилюя и Тюкяна и на правом берегу Лены в ее среднем течении) с привлечением аэрофотоснимков 1950-х гг., серий космических снимков 1970–1980-х и 2000-х гг. и данных наблюдений метеостанций. Проанализированы сезонные, межгодовые и многолетние изменения площади термокарстовых озер, рассмотрено влияние антропогенной деятельности и лесных пожаров на состояние термокарста в Центральной Якутии.

Космические снимки, термокарстовые озера, динамика, потепление климата, колебания сумм осадков

THE DYNAMICS OF THERMOKARST LAKES UNDER CLIMATE CHANGES SINCE 1950, CENTRAL YAKUTIA

V.I. Kravtsova, T.V. Tarasenko

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography,
119991, Moscow, Leninskie Gory, Russia, valentinamsu@yandex.ru, manunya_geo@mail.ru*

The analysis of the dynamics of thermokarst lakes in Central Yakutia has been fulfilled since 1950, during the period of air temperature increase. The research has been carried out for two test sites (between the rivers Vilyui and Tyukyan and on the right bank of the Lena River in its middle part) using aerial photographs of 1950ies, multitemporal satellite images of 1970–1980ies and 2000ies and data of meteorological observations. Seasonal, interannual and long-term changes of areas of thermokarst lakes have been analyzed. The influence of human activity and forest fires on the thermokarst state in Central Yakutia have been considered.

Satellite images, thermokarst lakes, dynamics, global warming, fluctuations of precipitation

ВВЕДЕНИЕ

В связи с проблемой глобального потепления климата и необходимостью мониторинга состояния многолетнемерзлых пород, контроля их возможной деградации, ведущей к развитию опасных геокриологических процессов, в лаборатории аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова проводятся исследования по применению аэрокосмических снимков для изучения динамики термокарстовых озер. Термокарстовые озера, представляющие результат развития термокарстовых процессов при таянии многолетнемерзлых пород (ММП), достаточно уверенно дешифрируются на аэроснимках и космических снимках. По снимкам, сделанным в разные годы, в камеральных условиях можно зафиксировать изменение площади озер, появление новых озер или исчезновение существовавших. Динамика термокарстовых озер может рассматриваться как возможный индикатор состояния криолитозоны.

Начиная исследование динамики термокарстовых озер, мы предварительно составили карту

распространения термокарстовых озер в пределах криолитозоны России, а затем в этих районах провели сравнение разновременных космических снимков, полученных в 1970–1980-х гг., с современными, что обеспечило изучение изменений за последний 30–40-летний период, когда потепление климата в большинстве районов было наиболее выражено. Эти предварительные исследования проведены более чем на 20 эталонных участках, расположенных в разных частях криолитозоны, районах с различными региональными изменениями климата и в разнообразных ландшафтных условиях. Результаты этого эксперимента, описанные в статье В.И. Кравцовой и А.Г. Быстровой [2009], показали, что изменения площади термокарстовых озер далеко не повсеместны, на 60 % рассмотренных эталонных участков они не были зарегистрированы. В тех случаях, когда такие изменения наблюдались, они носили разнонаправленный характер, т. е. в пределах эталонного участка отмечалось уменьшение площади одних и увеличение других озер. При анализе окружающей территории выявлено, что в большинстве слу-

чаев такие изменения были связаны с деятельностью временных водотоков, которые обуславливали спуск одних озер и наполнение других. Четкой связи динамики озер с геокриологическими условиями, с распространением в пределах определенной геокриологической зоны при этом обнаружено не было. Однако это противоречит выводам, приведенным в публикациях ряда исследователей США [Fitzgerald, Riordan, 2003; Smith et al., 2005] и томских ученых [Кирпотин и др., 2008], которые пришли к заключению о различной реакции на потепление термокарстовых озер в разных частях криолитозоны – о преимущественном уменьшении площади озер в южной геокриологической зоне и увеличении в северной. Повторный анализ разновременных снимков тех же участков в Западной Сибири, по которым были получены эти выводы, убедил нас в правильности наших заключений [Кравцова, Тарасенко, 2010].

Другая особенность, обнаруженная в процессе предварительного исследования [Кравцова, Быстрова, 2009] обширных и разных типов территорий, состоит в существенном увеличении площади термокарстовых озер в ряде районов: в Центральной Якутии, межгорных котловинах Забайкалья, на Дальнем Востоке. Все эти районы характеризуются существенным повышением температур воздуха (более 1 °С) в 2005 г. относительно нормы (1961–1990 гг.) [Павлов, 2008], и такое

увеличение площади озер на первый взгляд могло оказаться связанным с деградацией ММП. Поэтому в настоящем исследовании мы поставили цель проверить, являются ли изменения площади термокарстовых озер, фиксируемые разновременными космическими снимками на район Центрально-Якутской низменности, следствием потепления климата и могут ли термокарстовые озера служить индикаторами деградации вечной мерзлоты. Для этого были проведены дополнительные исследования с привлечением аэрофотоснимков для начального срока, когда недостаточное пространственное разрешение космических снимков 1970–1980-х гг. могло оказаться источником погрешности, и с учетом возможно большего числа временных срезов в пределах 30–40-летнего периода для прослеживания тенденций динамики термокарстовых озер, а также с более тщательным анализом ландшафтных, метеорологических, гидрологических условий для лучшего понимания причин выявленных изменений.

В настоящей работе приводятся материалы такого исследования для территории Центральной Якутии (рис. 1), где динамике озерной сети и в прошлые годы уделялось большое внимание якутскими учеными [Ефимов, 1950; Немчинов, 1958; Соловьев, 1961; Босиков, 1991], которые изучали периодичность в водном режиме озер на основе опросных методов, наблюдений гидрологических

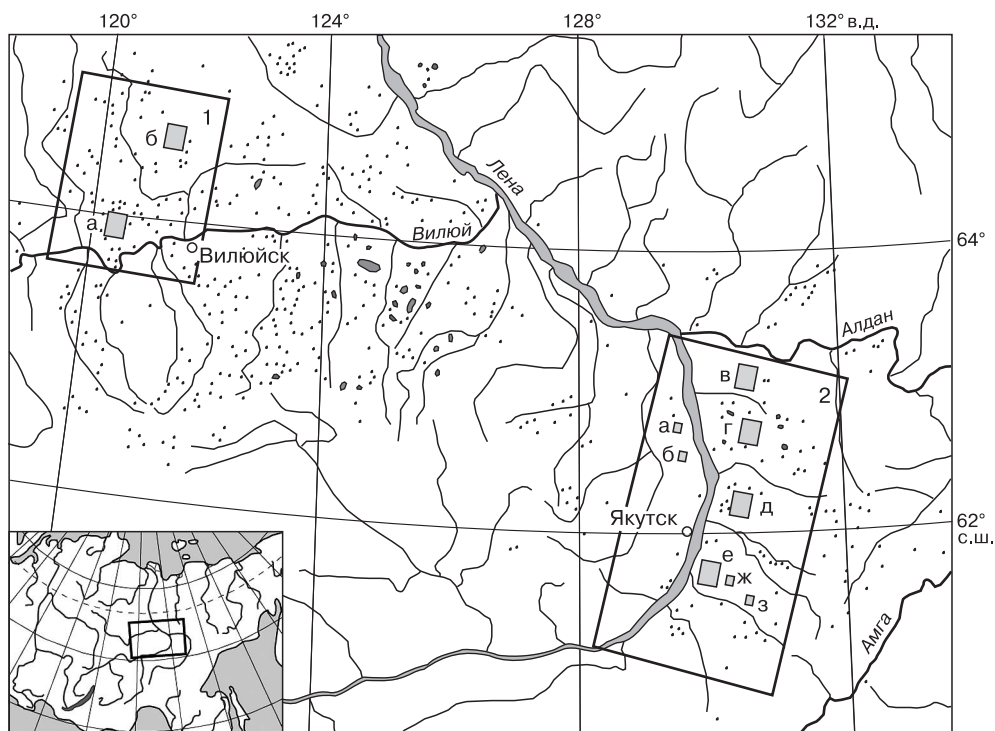


Рис. 1. Район исследований.

Расположение эталонных участков (1, 2) и фрагментов исследования (а–з) в их пределах.

постов на отдельных озерах и анализа данных метеостанций. Ими проанализирована повторяемость мало- и многоводных периодов с явлениями высыхания и восстановления озер, которые они связывали как с вытаиванием подземных льдов, так и с изменениями количества осадков и температуры воздуха.

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Термокарстовые озера особенно широко распространены в равнинной части Якутии, в пределах Центрально-Якутской низменности, охватывающей бассейн средней Лены, Лено-Амгинское междуречье, бассейн Нижнего Вилюя.

Рельеф, геосистемы. Начало формирования современного рельефа Центральной Якутии связывается с юрским периодом, когда Восточно-Сибирская платформенная равнина приобрела свои основные морфоструктурные черты. В настоящее время в основе рельефа выделяется озерно-аллювиальная аккумулятивная центрально-якутская низменная равнина, представляющая собой плоскую поверхность. Абсолютные высоты изменяются в пределах 150–250 м, относительные превышения – от 5 до 30 м. Окраинные участки равнины расположены несколько выше и местами достигают 300–400 м. В долине р. Вилюй сформировались семь террас, в пределах Лено-Амгинского междуречья выделяют восемь средневисотных аккумулятивно-эрозионных террас Лены.

Рельеф Центрально-Якутской низменности осложнен термокарстовыми котловинами – аласами, как слабо врезанными (0,5–1,0 м), так и доста-

точно глубокими (8–15 м). Они имеют массовое распространение и создают особый аласный ландшафт. Район относится к зоне северной тайги с преимущественно лиственничными и березово-лиственничными, а на песчаных грунтах также и сосновыми лесами; аласы заняты лугами, нередко солончаковыми или заболоченными, а также болотами.

Климат. Для рассматриваемого региона характерен резко континентальный климат. Средние температуры января изменяются от -40 до -44 °С, июля – от $+16$ до $+19$ °С [Гаврилова, 1973]; колебания температур составляют 80–100 °С. Зима продолжается более шести месяцев. Среднегодовые суммы осадков всего 250–300 мм, из них 75–80 % приходится на теплый период. Несмотря на то что осадки преимущественно летние, т. е. жидкие, климат характеризуется как засушливый.

При исследовании динамики термокарстовых озер важно учитывать не только общую тенденцию, но и колебания метеоэлементов, особенно атмосферных осадков, которые являются одним из важных источников питания озер, а также температуры воздуха, которая может косвенно указывать на величину испарения с поверхности озер. Данные метеонаблюдений метеостанций (м/с) Вилюйск и Якутск с 1948 по 2008 г. позволяют проследить эти изменения во второй половине XX и в начале XXI в.

Для обеих станций приведены графики годовых сумм атмосферных осадков и среднегодовой температуры воздуха, на основе которых по аналогии с исследованием Н.П. Босикова [1991] нами построены графики шестилетних скользящих этих величин (рис. 2). Полученные графики демон-

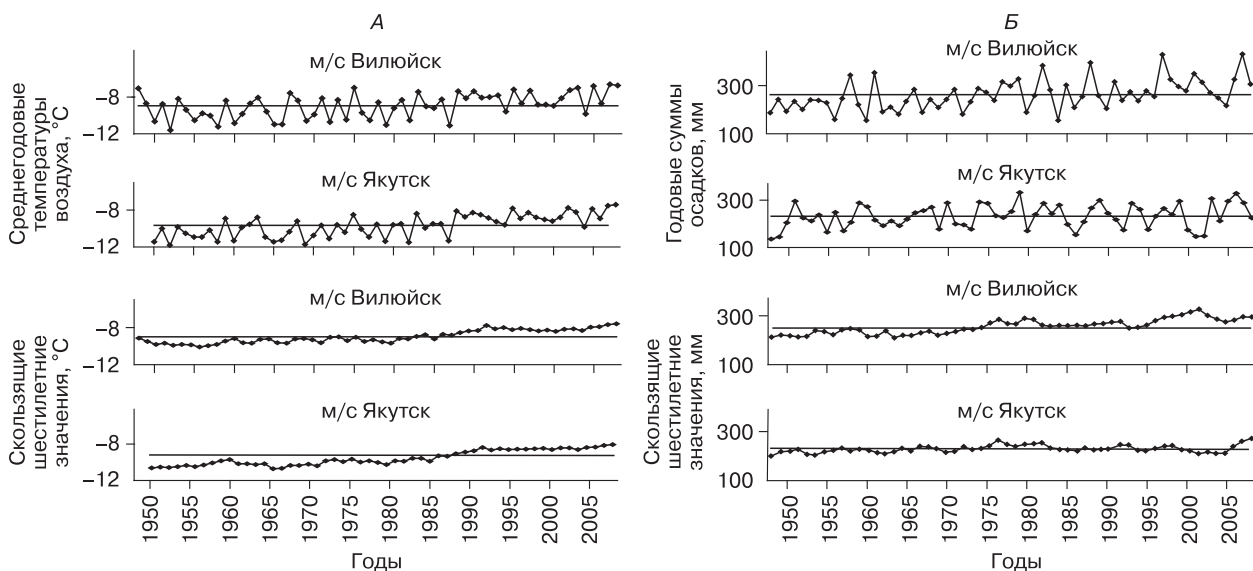


Рис. 2. Графики хода температуры воздуха (А) и осадков (Б) за период 1948–2008 гг.

Горизонтальная линия – среднее значение за рассматриваемый период.

стрируют увеличение температур воздуха за этот период при незначительных локальных колебаниях, особенно заметных в 1960–1986 гг. на фоне общего тренда потепления, которое наиболее четко проявляется с 1986 г., когда практически все значения среднегодовых температур воздуха стали на 1 °С выше средней многолетней (–8,9 °С для станции Вилюйск и –9,7 °С для станции Якутск).

Кривые скользящих шестилетних значений годовых сумм осадков показывают наличие ярко выраженных ритмических колебаний. Для Вилюйска выделяется маловодная фаза до 1975 г., увеличение осадков в 1975–1982 гг., относительная стабильность в 1982–1992 гг., значительное увеличение с 1993 г. по 2001 г., а затем резкое уменьшение к 2005 г. Для Якутска выделяется ряд периодов повышения и уменьшения сумм годовых осадков продолжительностью 5–6 лет, не всегда синхронно Вилюйску.

Геокриологические условия. Центральная Якутия находится в зоне сплошного распространения ММП. Характерной особенностью является высокая льдистость пород и наличие мощных повторно-жильных льдов – ледового комплекса [Геокриология СССР, 1989]. Мощность ММП увеличивается с юга на север. Наибольшие значения

(500 м) характерны для обоих берегов Вилюя в его нижнем течении, в районе Вилюйска мощность ММП достигает 600 м, на Лено-Амгинском междуречье составляет 300–400 м. В долинах рек наблюдается значительное снижение мощности ММП. Под крупными реками (Лена, Вилюй) и озерами сплошность ММП прерывается. Сквозные талики существуют под многими аласами с большими озерами (Мюрю, Тюнгиюлю, Сырдах, Балыктах) [Босиков, 1991].

Температура ММП изменяется в зависимости от ландшафтной и геологической ситуаций. На обширных межаласьях, покрытых лиственничным лесом, среднегодовая температура пород составляет от –2 до –6 °С, в заболоченных долинах рек – от –1 до –4 °С. В то же время на безлесных участках в аласных котловинах, а также на сухих дренированных участках, сложенных песчано-галечниковыми грунтами, она не ниже –1 °С [Иванов, 1984].

Поверхностные воды. Центральная Якутия находится в среднем течении Лены, которая вместе с ее притоками Алданом (с Амгой) и Вилюем (с Тунгом, Тюкяном) дренируют Центрально-Якутскую низменность. Между этими реками на Лено-Амгинском и Лено-Вилюйском междуречьях постоянных водотоков мало.

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. На междуречных пространствах, где низкая степень дренированности, распространены термокарстовые озера.

Районы распространения термокарстовых озер и их характерные размеры показаны на рис. 3. Здесь отражена ситуация на начало 2000-х гг. и представлен уточненный фрагмент карты распространения термокарстовых озер на территории криолитозоны России [Кравцова, 2009]. На террасах Вилюя и водораздельных пространствах его притоков развита густая сеть аласов со средними (1 км) и малыми (0,2–0,3 км) озерами, а на древнеаллювиальных песках тукуланов – сеть больших (2–3 км) и средних (0,3–0,5 км) озер при относительно небольшой ее густоте (30–40 озер на 100 км² площади). В междуречье Лены и Алдана распространены средние и большие озера, а на левобережье Лены в районе Якутска развита очень густая сеть аласов (100–150 форм на 100 км²) с очень мелкими остаточными озерами (диаметром 0,1–0,2 км).

Для озер Центральной Якутии характерно снеговое и дождевое питание [Босиков, 1991]. Водоупорным слоем этих озер служат многолетнемерзлые породы [Суходровский, 1979].

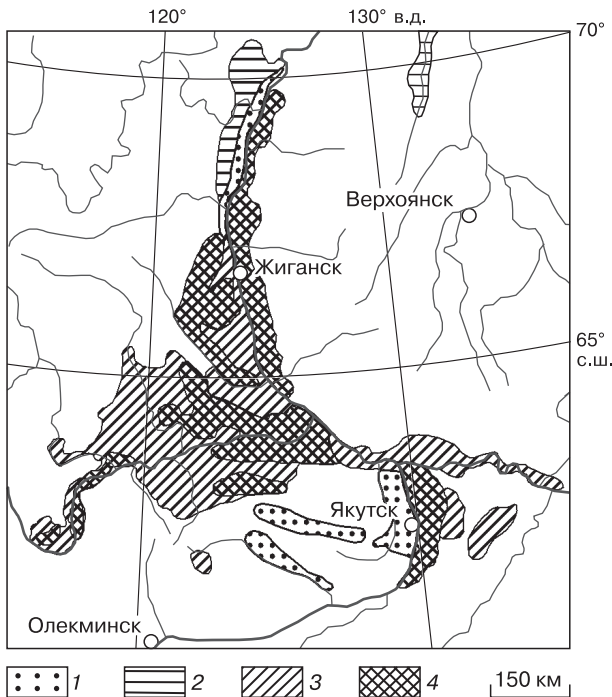


Рис. 3. Карта районов распространения термокарстовых озер в Центральной Якутии:

1 – малые озера (диаметр 0,1–0,5 км); 2 – средние озера (0,5–1,5 км); 3 – сочетание малых и средних озер; 4 – сочетание средних и больших озер (диаметр 1,5–3,0 км).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эталонные участки. Поскольку изучение динамики термокарстовых озер требует работы в достаточно крупном масштабе (не мельче 1:200 000), выявление изменений всех озер на обширных территориях слишком трудоемко, и работа выполняется на эталонных участках. В Центральной Якутии выбрано два эталонных участка (см. рис. 1). Первый – “Виллой” (размером 100 × 130 км), расположенный на равнинном залесенном междуречье Вилюя и его притока Тюнга, частично совпадает с участком, проанализированным нами ранее [Кравцова, Быстрова, 2009], на котором было обнаружено значительное увеличение площади термокарстовых озер в период с 1976 по 2000 г. Необходимо было дополнительно проверить этот факт и объяснить причины такого увеличения. Второй участок – “Лена” (размером 100 × 180 км) на правобережье Лены в ее среднем течении – охватывает частично залесенные высокие террасы на Лено-Амгинском междуречье. В этом районе многие годы вели изучение изменений отдельных озер якутские исследователи; сравнение их результатов с нашими представляло особый интерес. На обоих участках имелась возможность использовать детальные материалы аэрофотосъемки, получить метеорологические данные (со станций Вилюйск и Якутск). Сопоставление разновременных снимков, составление карт динамики и подсчет площадей озер выполнялось в пределах эталонных участков на фрагментах размерами 15 × 20 и 5 × 10 км, обозначенных на схемах и графиках буквами.

Использованные материалы. Основным материалом для изучения изменений термокарстовых озер служили снимки со спутника Landsat, свободно распространяемые через Интернет. Снимки за период от начала 1970-х гг. до настоящего времени обеспечивают временной интервал в 25–30 лет, охватывающий этап современного потепления. Помимо этого использовались аэрофотоснимки 1950-х гг., любезно предоставленные для работы ОАО ПНИИИС и позволившие проследить изменения площади озер с 1950 по 1973 г. Функционировавшая в 1970-е гг. на спутнике Landsat система MSS с пространственным разрешением 80 м могла оказаться недостаточной для фиксации мелких озер, и обращение к аэрофотоснимкам (с учетом метеоусловий в годы съемки) обеспечивало некоторый контроль. С 1982 г. на спутнике Landsat работали съемочные системы TM, ETM с разрешением 30 м, что достаточно для выделения термокарстовых озер, размеры которых обычно составляют от нескольких десятков до сотен метров. Наличие среди съемочных зон спутника Landsat ближней инфракрасной зоны обеспечивает уверенное выделение озер.

Для изучения многолетней динамики подбирались снимки за различные годы, но с близкими

датами, с тем, чтобы исключить возможность принять сезонные изменения за многолетние. Предпочтение отдавалось снимкам, полученным в конце лета после полного стаивания льда на термокарстовых озерах, поскольку наличие льда на озерах обуславливает ограничения при автоматизированном дешифрировании. Использовались снимки без облачности, так как тени от облаков при автоматизированном дешифрировании могут быть приняты за озера. При дешифрировании учитывалось также развитие водной растительности и появление гарей, которые при классификации могут смешиваться с водными объектами.

Методика определения изменений термокарстовых озер. После проведения предварительной обработки – географической привязки и трансформирования снимков в единую картографическую проекцию – осуществлялось автоматизированное выделение всех озер на исследуемом участке, а для выборочных озер, изученных ранее якутскими учеными [Ефимов, 1950; Немчинов, 1958; Соловьев, 1961; Босиков, 1991], – визуальное дешифрирование с цифрованием контура береговой линии. Автоматизированное дешифрирование проводилось в программе ERDAS Imagine на основе классификации с обучением, в результате которой выделялся один класс – озера. Обработанные таким образом снимки за разные годы совмещались в программном пакете ArcGIS для выявления изменений. На результирующей карте разным цветом показывали части озер с неизменной площадью, участки сокращения и увеличения площади озер. Такие карты были составлены в масштабе 1:100 000 для наиболее характерных фрагментов эталонных участков (см. рис. 1). По ним подсчитаны площади термокарстовых озер, значения их увеличения или уменьшения за исследуемый период, а также относительные показатели увеличения или уменьшения в процентах от общей площади озер.

РЕЗУЛЬТАТЫ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР

Сезонные изменения площади термокарстовых озер. Поскольку при изучении долговременной динамики природных объектов всегда есть опасность принять за многолетнюю динамику сезонные изменения, на первом этапе была поставлена цель – проследить сезонную динамику термокарстовых озер и на основе такого анализа выявить сроки съемки, оптимальные для изучения многолетних изменений. Нас интересовали изменения площади водного зеркала, были проанализированы снимки, полученные после вскрытия ледового покрова и до его установления, т. е. в начале, середине и конце летнего периода. Для определения характера сезонных изменений площади озер на эталонном участке № 1 “Виллой” использо-

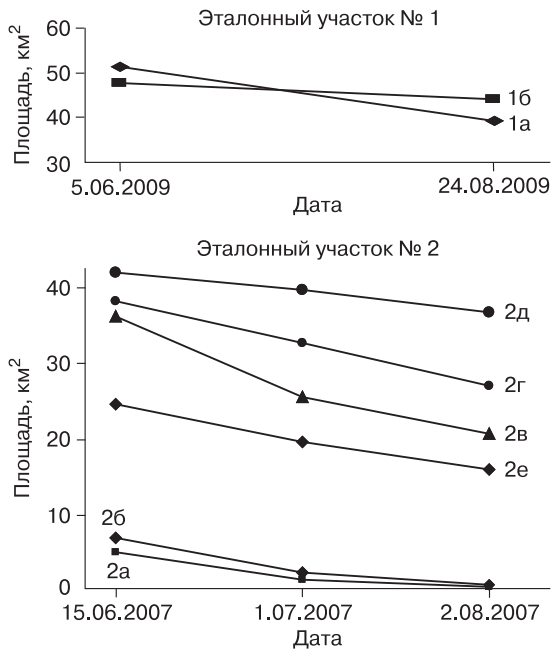


Рис. 4. Графики сезонных изменений суммарных площадей озёр на фрагментах а–е эталонных участков № 1 и 2 (см. рис. 1).

вались снимки ЕТМ/Landsat за 5 июня и 24 августа 2009 г., а для эталонного участка № 2 “Лена” – за 15 июня, 1 июля, 2 августа 2007 г. Для всех снимков выполнено автоматизированное дешифрирование с выделением водной поверхности озёр. В результате для двух фрагментов эталонного участка № 1 и шести фрагментов эталонного участка № 2 были составлены карты сезонной динамики озёр, определены суммарные площади озёр и построены графики их изменений (рис. 4).

Как следует из рис. 4, на всех фрагментах наблюдается уменьшение площади озёр от июня к августу, колеблющееся от относительно небольшой величины (8 %) на участке “Виллой” до значительного (почти двукратного) сокращения на фрагментах участка “Лена”. В среднем сокращение площади озёр составляет около 30 %. В районах, расположенных главным образом на междуречных водораздельных пространствах, это уменьшение сказывается слабее, а в речных долинах, особенно на поймах и низких террасах, – существенно. Сезонная изменчивость по-разному проявляется и в различных ландшафтных условиях. Она больше в районах с густой сетью аласов, где преобладают озера с уплощенной котловиной и где увеличение водности в начале лета (после снеготаяния) приводит к кратковременному затоплению плоских аласных котловин, которые к концу лета высыхают. Временные “озера” в них либо исчезают бесследно, либо остаются небольшие остаточные во-

доемы. Такая существенная сезонная изменчивость особенно характерна для менее облесенных районов, где луговые и болотные комплексы аласов преобладают по площади над залесенными межаласьями. На участках, где озерные котловины более глубоко врезаны и преобладают термокарстовые озера с узкой аласной каймой или вообще без нее, сезонные изменения уровня воды меньше сказываются на площади озёр. Примеры сезонных колебаний площади термокарстовых озёр в разных ландшафтных условиях приведены на рис. 5. Помимо сезонных изменений, связанных с весенним снеготаянием, на определяемой по снимкам площади озёр сказывается развитие водной растительности, которая может появиться на мелководье в течение вегетационного периода; фиксированная площадь открытой водной поверхности таких озёр изменяется, уменьшаясь в разгар вегетации и восстанавливаясь к сентябрю. Сравнение пары таких разновременных снимков за разные годы с различным развитием водной растительности может привести к неправильным выводам об изменении площади озёр.

Из проведенного анализа сезонных изменений площадей термокарстовых озёр следует вывод о необходимости при изучении годовых и многолетних изменений использовать снимки, полученные в конце летнего периода – начале осеннего, так как иначе есть вероятность принять сезонные изменения за многолетние.

Годовые изменения площади термокарстовых озёр. Анализ изменений площади термокарстовых озёр за близкие годы показал, что межгодовая изменчивость определяется метеорологическими условиями в рассматриваемые годы. Получение снимков за последовательный ряд лет с годичным интервалом стало возможным в 2000-х гг., когда работал спутник Landsat-7. Их анализ показал, что рост количества осадков только в год съемки еще не ведет к изменению площади озёр. Так, на участке “Виллой” изменения площади озёр за 2000–2002 гг. невелики, составляют всего 5–7 % от суммарной площади озёр. В то же время, как следует из рис. 2, 2001 год характеризовался в этом районе (м/с Виллюйск) существенным увеличением осадков, а на графике скользящих шестилетних значений этот год выделяется наибольшей суммой осадков за полувекковой период. Однако в 2002 г. их сумма сильно уменьшилась, и в итоге кратковременное увеличение осадков только за один год не сказалось существенно на площади озёр. Такой же вывод можно сделать по участку “Лена”, хотя там наблюдается другая ситуация. Так, на фрагменте 2е зафиксировано уменьшение площади озёр за период 2000–2002 гг., хотя в 2001 и 2002 гг. суммы осадков (м/с Якутск) были одинаковыми. Сокращение озёр объясняется сильным предшествующим уменьшением осадков с 1999 по 2000 г.

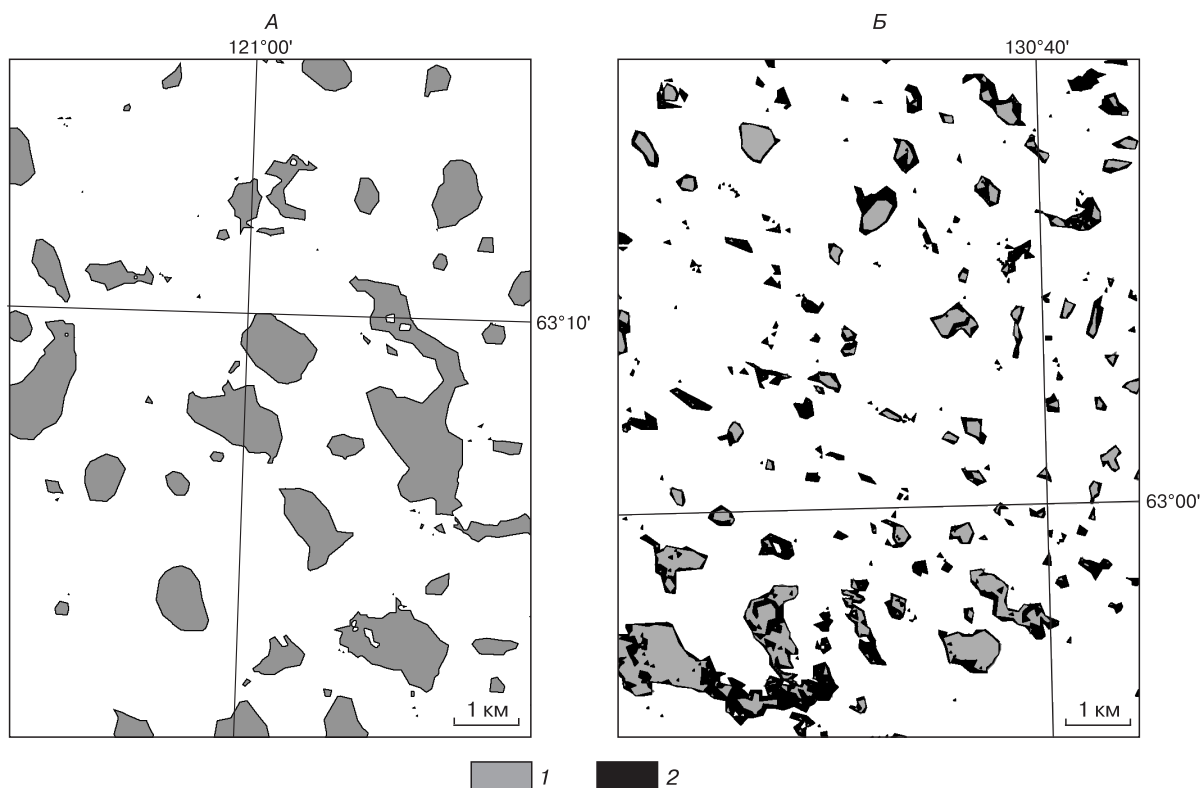


Рис. 5. Сезонные изменения площади термокарстовых озер в различных ландшафтных условиях:

А – минимальные в районе с глубоко врезанными аласными котловинами на территории фрагмента 16, 2009 г.; Б – значительные в районе с уплощенными аласными котловинами на территории фрагмента 2в, 2007 г.; 1 – не изменившаяся площадь водной поверхности озер; 2 – уменьшение площади водной поверхности и исчезновение озер.

Для отдельных крупных озер, которые в предшествующий период были детально изучены якутскими исследователями, представилась возможность выполнить непрерывный ряд ежегодных измерений их площади по космическим снимкам с

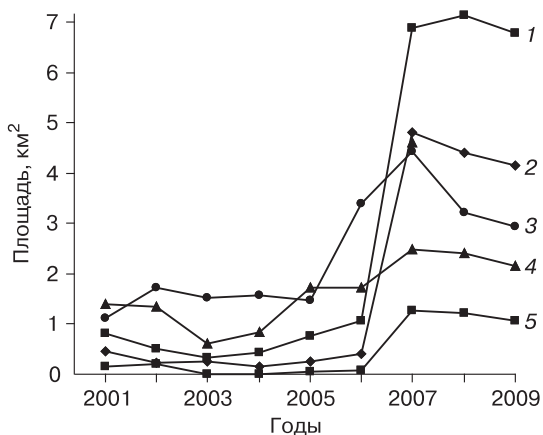


Рис. 6. Графики годовых изменений площади отдельных крупных озер:

1 – Тюнгюлю; 2 – Сегелей; 3 – Нал-Тюнгюлю; 4 – Абалах; 5 – Майя.

2000 по 2009 г. (рис. 6). Для этих озер характерно относительно стабильное состояние в 2001–2006 гг. (за исключением озер Абалах и Майя) и резкое увеличение площади всех озер в 2007 г., сменившееся вновь снижением площади в 2008–2009 гг. Причина в том, что за многоводный 2006 год выпало 326 мм осадков, что на 95 мм больше среднемноголетнего значения, превышенного на 30 %. Причем, как показывает рис. 7, ос-

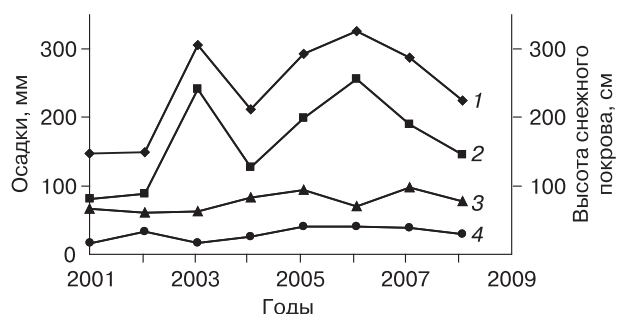


Рис. 7. Ход метеорологических характеристик:

1 – среднегодовые осадки; 2 – летние осадки; 3 – зимние осадки; 4 – высота снежного покрова.

новную роль играют летние осадки, а для зимних, как и для высоты снежного покрова, существенных колебаний в эти годы не наблюдалось.

Таким образом, анализ ряда ежегодных наблюдений за изменениями площади термокарстовых озер приводит к важным выводам. На всех рассмотренных фрагментах и графиках на рис. 6, 7 существенное изменение площади озер следовало за изменением сумм осадков, по крайней мере, за два года. Так было, например, при увеличении осадков в 2005 и 2006 гг., сопровождавшемся резким понижением температур воздуха, и при уменьшении осадков в 2007 и 2008 гг. В то же время уменьшение сумм осадков всего за один год при достаточно многоводном предшествующем годе (например, в 2004 г.) не сказывается на изменении площади озер.

Многолетние изменения термокарстовых озер. При изучении многолетних изменений учитывался опыт анализа сезонных и годовых изменений: использовались снимки, полученные в конце летнего сезона; для выбранных дат съемки по метеоданным проверялось, чтобы эти годы не были экстремальными по суммам осадков и чтобы им не предшествовали годы с однонаправленным трендом осадков.

На эталонном участке «Виллюй» многолетние изменения выявлены по аэрофотоснимкам 1950 г. и космическим снимкам MSS/Landsat 1973 г. и TM/Landsat 2009 г. Схемы изменений для фрагментов 1а, 1б приведены на рис. 8.

Два охваченных исследованиями периода 1950–1973 и 1973–2009 гг., как показывает график шестилетних скользящих значений годовых сумм осадков (см. рис. 2), существенно различаются по водности. В первый период суммы осадков были ниже средних многолетних значений за все годы наблюдений, а во второй (после 1975 г.) почти всегда превышали норму. Что же касается среднегодовых температур воздуха, то после 1986 г. четко выражен тренд их повышения, которое может способствовать увеличению испарения с водной поверхности озер и понижению их уровня. Однако в сочетании с увеличением осадков это действует, скорее, как смягчающий фактор, несколько сдерживающий рост уровня озер. Другое возможное последствие повышения температур – деградация ММП, которая может вызвать активизацию термокарстовых процессов, что и предстояло проверить.

Из рис. 8, А следует, что на территории фрагмента 1а, значительная часть площади которого занята аласами (26 %), с 1950 по 1973 г. наблюдалось, с одной стороны, уменьшение площади и исчезновение крупных термокарстовых озер, а с другой – появление небольших озер в существовавших ранее аласных котловинах. Возможно, что некоторое повышение температуры к концу этого периода по сравнению с холодными 1952–1956 го-

дами (в 1973 г. она почти достигла нормы) обусловило таяние подземных льдов в небольших аласных котловинах, под которыми еще не сформировались талики, в то время как в более крупных котловинах, где подземные льды вытаяли раньше, в этот маловодный период происходило уменьшение площади озер, естественное для маловодной фазы и усиленное испарением при повышении температур воздуха.

С 1973 по 2009 г. на территории фрагмента 1а наблюдалось повсеместное увеличение площади озер, которое составило 80 % от площади озер в 1973 г. (см. рис. 8, Б). Оно было отмечено и в наших предыдущих исследованиях по близкой территории для периода 1976–2000 гг. [Кравцова, Быстрова, 2009]. Возможными причинами такого сильного, почти двукратного увеличения площади термокарстовых озер могло быть либо влияние современного потепления климата и активизация термокарста, либо обилие осадков в рассматриваемый период. Анализ кривых изменения температур воздуха и осадков по м/с Виллюйск (см. рис. 2) показывает, что действовали обе эти причины. Температуры воздуха после 1982 г. превышали среднее многолетнее значение ($-8,9^{\circ}\text{C}$) на 1°C и имели устойчивую тенденцию к повышению. В то же время весь период после 1973 г. осадки превышали норму, причем особенно многоводными были два последних десятилетия, а в 2000–2002 гг. шестилетние скользящие значения годовых сумм осадков были наибольшими за весь период наблюдений. Именно атмосферные осадки в первую очередь обусловили увеличение площади термокарстовых озер, не давая возможности оценить влияние повышения температур воздуха на этот процесс.

Территория фрагмента 1б обеспечена космическими снимками только за 1973–2009 гг. На этом участке (см. рис. 8, В) наблюдается увеличение площади одних и уменьшение других крупных озер. Суммарное увеличение площади озер составило 10 %, т. е. существенно меньше, чем на предыдущем участке. Общие ландшафтные условия и характер озер здесь иной: преобладают озера, имеющие достаточно врезанные озерные котловины и не имеющие четко выраженной аласной каймы. Увеличение осадков и повышение уровня воды в этих озерах почти не сказалось на расширении их пределов; изменение границ этих озер было не повсеместным. В то же время для этого участка характерны значительные разнонаправленные изменения крупных озер, расположенных в восточной части района, вдоль водотоков, в общую проточную систему которых входят эти озера. Здесь уменьшение площади озер произошло вследствие их спуска дренажной сетью, а увеличение – за счет пополнения из расположенных гипсометрически выше озер. Группы таких озер чередуются, сменяя

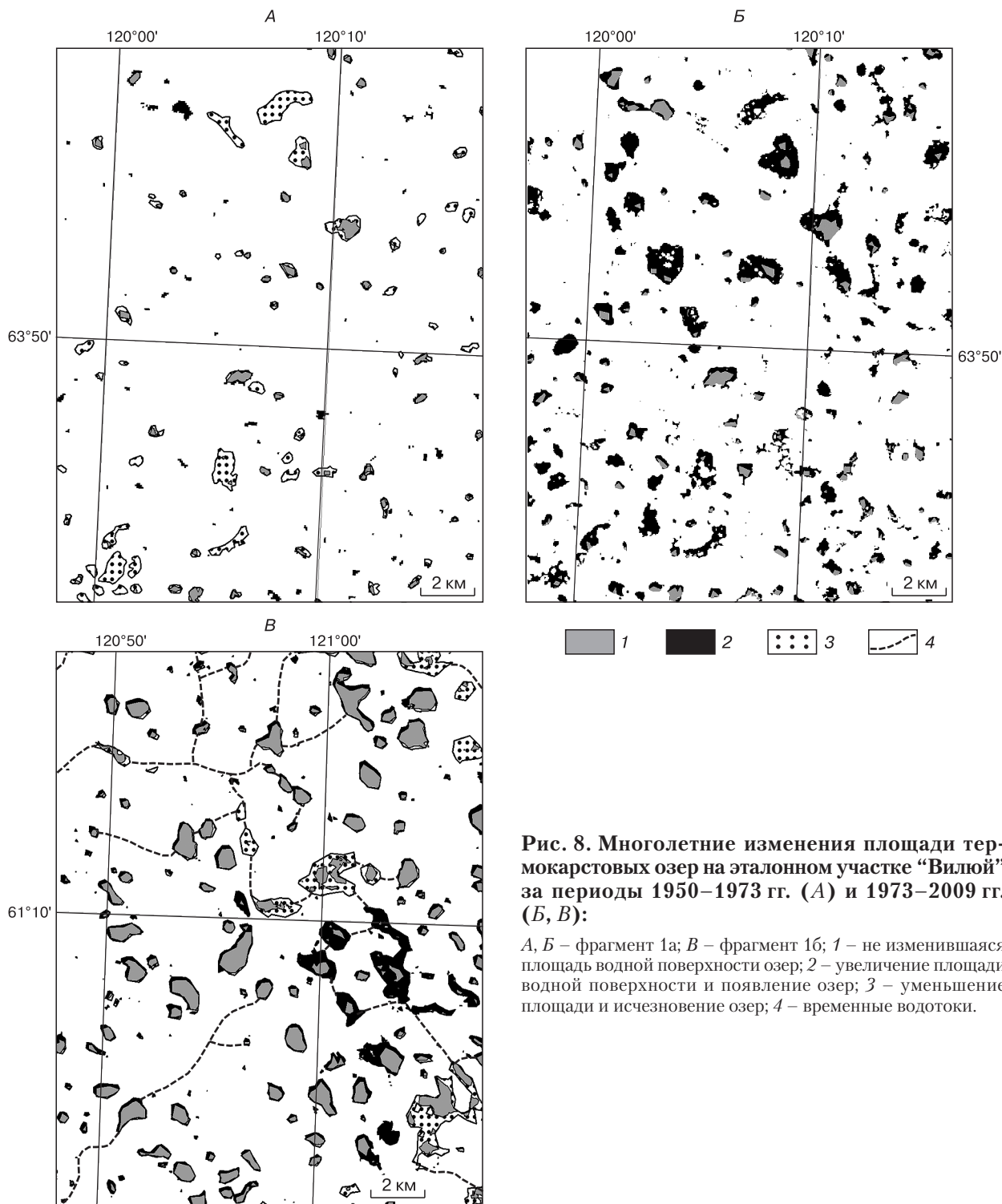


Рис. 8. Многолетние изменения площади термокарстовых озер на эталонном участке “Вилуй” за периоды 1950–1973 гг. (А) и 1973–2009 гг. (Б, В):

А, Б – фрагмент 1а; В – фрагмент 1б; 1 – не изменившаяся площадь водной поверхности озер; 2 – увеличение площади водной поверхности и появление озер; 3 – уменьшение площади и исчезновение озер; 4 – временные водотоки.

одна другую вниз по течению водотока. На этом фрагменте четко проявляется влияние на динамику термокарстовых озер конкретных ландшафтных условий – залесенности, глубины термокарстовых котловин, существования их связи с гидрографической сетью.

Для второго эталонного участка “Лена” анализ многолетних изменений выполнен также для двух периодов: 1950–1980 и 1980–2009 гг. на нескольких фрагментах (отличие от предыдущих периодов связано с наличием материалов съемки).

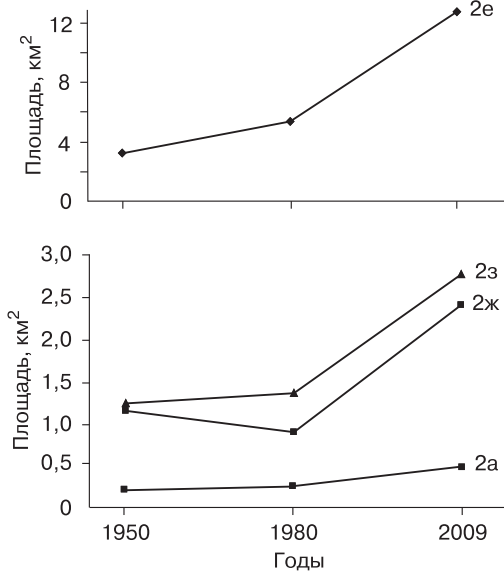


Рис. 9. График многолетних изменений площади озер на фрагментах (2а, 2е, 2ж, 2з) эталонного участка “Лена”.

По метеорологическим условиям участок “Лена” отличается от предыдущего тем, что наряду с общей тенденцией увеличения после 1973 г. и осадков, и температуры воздуха (после 1986 г. превысивших норму) для него характерны также циклические, более короткопериодные колебания осадков: ритмично сменяются 3–5-летние периоды увеличения и уменьшения сумм осадков (обычно с амплитудой от 180 до 300 мм в год). Поэтому при сравнении снимков за длительный период необходимо учитывать, какая именно фаза короткопериодных колебаний осадков соответствует выбраным годам для сравнения площадей озер.

В целом на большинстве фрагментов эталонного участка “Лена” для периода 1950–1980 гг., характеризующегося относительно небольшой водностью и отсутствием потепления (температуры воздуха при слабом тренде повышения оставались до 1986 г. ниже среднегогодового значения, осадки были ниже нормы до 1975 г.), наблюдается в целом стабильное состояние обводненности термокарстовых котловин или относительно небольшие их изменения. Площади озер на фрагментах 2а, 2з не изменились, на фрагменте 2ж уменьшились на 40 %, на фрагменте 2е увеличились на 20 %. В пределах этого длительного интервала, возможно, происходили более значительные, но кратковременные изменения. Второй период 1980–2009 гг. характеризуется повсеместным увеличением площадей термокарстовых озер, составившим для разных фрагментов от двух- до трехкратного (рис. 9). Однако обращение к рис. 2 (м/с Якутск) показывает, что 1980 и 2009 гг. находятся в разных фазах цикла короткопериодных (3–5-летних) колебаний осадков, и аналогичное сравнение за другой период (1980–2002 гг.) дает совершенно иную картину – уменьшение площадей термокарстовых озер. Дело в том, что 2002 год отличался повышенной сухостью для Якутска, перед ним были засушливые 2000 и 2001 годы, причем в условиях продолжающегося повышения температур воздуха и, следовательно, увеличения испарения с поверхности озер. Таким образом, влияние фазы короткопериодных колебаний осадков на изменение площади термокарстовых озер оказывается преобладающим и затушевывающим возможное влияние роста температуры воздуха на активизацию термокарстовых процессов.

На ряде фрагментов прослеживается влияние на динамику озер, наряду с осадками, наличия или отсутствия талика под озером. Так, на фрагменте 2д, охватившем несколько крупных озер (рис. 10),

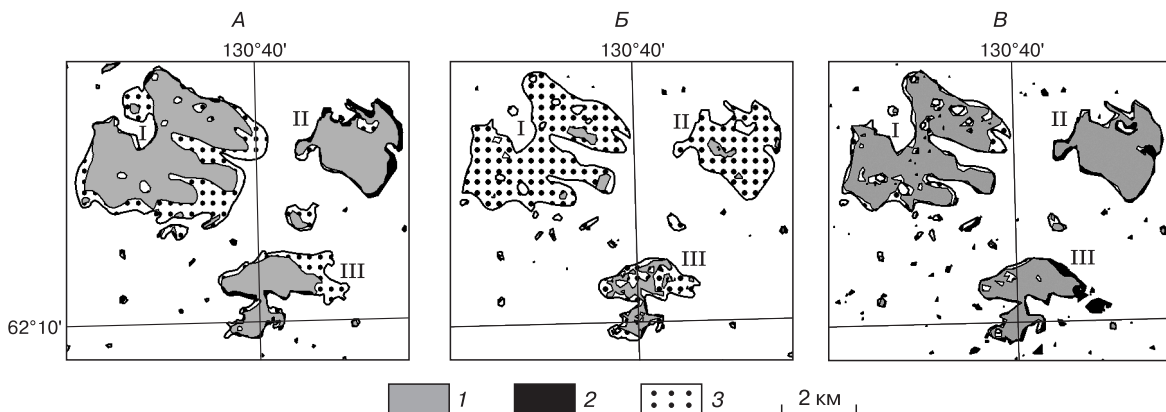


Рис. 10. Изменение площади группы озер Тюнгюлю (I)–Сегелей (II)–Нал-Тюнгюлю (III) за разные периоды:

А – 1950–1980 гг.; Б – 1980–2002 гг.; В – 1980–2009 гг.; 1 – не изменившаяся площадь водной поверхности озер; 2 – увеличение площади водной поверхности и появление озер; 3 – уменьшение площади и исчезновение озер.

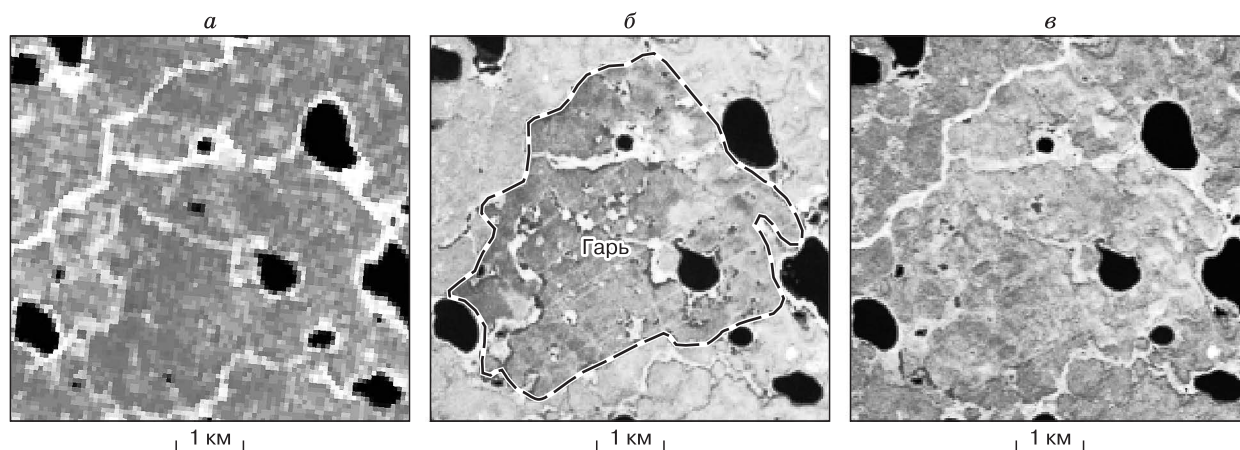


Рис. 11. Термокарстовые озера на эталонном участке “Вилуй” в условиях отсутствия (а), появления (б) и зарастания гари (в):

а – 1973 г.; б – 2000 г.; в – 2009 г.

весьма изменчива площадь большого оз. Тюнгиюлю, которое вместе с оз. Сегелей занимает обширную аласную котловину, отделенную перемычкой от соседней котловины оз. Нал-Тюнгиюлю. Под ними, как выявлено бурением, находится большой сквозной талик [Босиков, 1991]. По-видимому, талик действует как буфер, обуславливая просачивание воды в грунт, что вызывает изменчивость таких озер не синхронно с малыми озерами, не имеющими глубоких таликов и лежащими на водоупорном слое ММП. Уровень воды в таких малых озерах в большей степени зависит от осадков.

Из вышеизложенного следует вывод о решающей роли атмосферных осадков в изменении площади термокарстовых озер, динамику которых лишь в отдельных случаях можно объяснить возможной активизацией процессов термокарста в связи с увеличением температур воздуха.

Нередко высказывается мнение о влиянии на активизацию термокарстовых процессов также антропогенной деятельности. Среди рассмотренных в настоящей работе эталонных участков был ряд фрагментов, где эта деятельность достаточно активна. Так, территорию фрагмента 2е на правом берегу Лены напротив Якутска пересекает автомобильная трасса, соединяющая населенные пункты Нижний Бестях и Амга, проходит несколько линий электропередач, расположено много молочно-товарных ферм, полей кормовых культур. Однако этот район проявления антропогенной деятельности не выделяется среди других фрагментов активизацией термокарстовых процессов. В отдельных случаях отмечено влияние хозяйственной деятельности на изменение площадей термокарстовых озер, а именно преднамеренное целенаправленное перераспределение воды между озерами. Так, в группе озер Тюнгиюлю–Нал-Тюнгиюлю–Се-

гелей, где в 2007 г. вода подошла к строениям населенного пункта Тумул, на снимке зафиксирована, очевидно, переброска воды из оз. Нал-Тюнгиюлю в оз. Тюнгиюлю, в результате чего площадь последнего к концу лета увеличилась, в отличие от характерного для остальных озер предосеннего сокращения.

Другой вопрос, возникающий при изучении динамики термокарстовых озер: оказывают ли влияние лесные пожары, охватившие в 2000-х гг. в Якутии огромные площади, на состояние криолитозоны и соответственно на активизацию термокарстовых процессов? На рис. 11 приведен фрагмент эталонного участка “Вилуй”, где в 2000 г. появилась гарь на площади 20 км². Этот пожар никак не изменил ситуацию с аласами и термокарстовыми озерами: все озера, присутствующие на снимке 1973 г., видны и на снимках 2000 и 2009 гг., размеры их также не изменились; в 2009 г. наблюдается восстановление растительного покрова на площади гари. Аналогичная ситуация с гарями зафиксирована на участке “Лена”, фрагмент 2е. Таким образом, снимки разных лет не подтвердили активизации термокарстовых процессов на участках гарей.

ВЫВОДЫ

При изучении динамики термокарстовых озер за период с 1950 по 2009 г. на территории Центральной Якутии было установлено следующее.

1. Сезонные изменения площади термокарстовых озер, связанные с таянием снежного покрова, относительно невелики и в среднем составляют около 10 %. Наиболее значительное уменьшение площади озер (до 30 %) от начала к концу летнего периода наблюдается в речных долинах, на поймах и низких террасах.

2. Атмосферные осадки оказывают существенное влияние на межгодовое изменение площадей термокарстовых озер. Увеличение осадков на протяжении двух лет подряд и более (в год съемки и предшествующий) вызывает повсеместное увеличение площади термокарстовых озер.

3. Для изучения многолетних изменений площади термокарстовых озер под влиянием повышения температуры воздуха необходимо учитывать изменение атмосферных осадков от года к году. Для проанализированных эталонных участков “Вилуй” и “Лена” в период 1950–2009 гг. четко выражен тренд повышения среднегодовой температуры воздуха. На участке “Вилуй” в период 1950–1973 гг., когда суммы осадков были ниже средних многолетних значений за все годы, было установлено уменьшение площади крупных озер и появление небольших озер на месте сухих аласов, что может объясняться активизацией термокарстового процесса. В период 1973–2009 гг. атмосферные осадки практически всегда превышали норму, что способствовало росту площади озер. Для участка “Лена” характерны циклические ритмично сменяющие друг друга 3–5-летние периоды увеличения и уменьшения сумм осадков, которым соответствует увеличение и уменьшение площади озер, что не позволяет проследить влияние потепления климата.

4. Влияния хозяйственной деятельности и лесных пожаров на активизацию термокарста в рассматриваемом районе не выявлено.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 10-05-00267), Программы ведущих научных школ (проект НШ-3405.2010.5) и госконтракта НОЦ (14.740.11.0200).

Литература

- Босиков Н.П.** Эволюция аласов Центральной Якутии. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1991, 127 с.
- Гаврилова М.К.** Климат Центральной Якутии. Якутск, Кн. изд-во, 1973, 119 с.

Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 414 с.

Ефимов А.И. К вопросу о развитии термокарстовых озер в Центральной Якутии // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике / Под ред. П.И. Мельникова. М., Изд-во АН СССР, 1950, вып. 2, с. 98–114.

Иванов М.С. Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск, Наука, 1984, 125 с.

Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестн. Том. ун-та, 2008, № 311, с. 185–189.

Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2009, № 3, с. 33–42.

Кравцова В.И., Быстрова А.Г. Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 2, с. 16–26.

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. Томск, Изд-во Том. ун-та, 2010, т. 1, с. 88–93.

Немчинов А.Г. О периодических колебаниях уровня озер Центральной Якутии // Научные сообщения Якутского филиала АН СССР. Якутск, 1958, вып. 1, с. 30–37.

Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2008, 213 с.

Соловьев П.А. Циклические изменения водообильности аласных озер Центральной Якутии в связи с колебаниями элементов климата // Вопросы географии Якутии. Якутск, Кн. изд-во, 1961, вып. 1, с. 48–54.

Суходровский В.Л. Экзогенное рельефообразование в криолитозоне. М., Наука, 1979, 277 с.

Fitzgerald D., Riordan B.A. Permafrost and ponds. Remote sensing and GIS used to monitor Alaska wetlands at the landscape level // Agroborealis, 2003, vol. 35, No. 1, p. 30–35.

Smith L.C., Sheng Y., Macdonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes // Science, 2005, vol. 308, No. 5727, p. 1429.

*Поступила в редакцию
11 ноября 2010 г.*