

Комплексный мониторинг озёр Центрального Ямала на основе использования многоспектральных данных

А. В. Пузанов¹, Г. И. Дрост², В. В. Кириллов¹, О. В. Ловцкая¹, Д. Н. Балыкин¹,
М. И. Ковешников¹, О. Б. Акулова¹, К. Тешебаева³, Л. А. Хворова⁴,
А. В. Кульшин⁴, А. В. Котовщиков¹, Н. М. Ковалевская¹

¹ *Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия*
E-mail: knm@iwer.ru

² *Национальный институт управления водными ресурсами*
Лолистад, 8224, Нидерланды

³ *Свободный университет Амстердама, Амстердам, 1081, Нидерланды*

⁴ *Алтайский государственный университет, Барнаул, 656049, Россия*

Работа посвящена мониторингу и картированию термокарстовых озёр на основе использования многоспектральной спутниковой информации. Описываются детали эволюции озёр Центрального Ямала, полученные с помощью классификации и учёта качественных изменений состояния озёр за последние десятилетия. Для анализа и интерпретации снимков в контексте качественных характеристик водных объектов и распознавания образов был использован временной ряд (1984–2018) многозональных космических снимков Landsat обучающего участка Центрального Ямала (район Бованенково). Оказалось, что для Ямала характерны как заиляющиеся озёра в пульсирующей форме (с циклами заиления или высокого заиления — прозрачные, умеренно заиленные, заиленные), так и постоянно заиленные озёра (умеренно заиленные, заиленные, высоко заиленные). Для получения параметров качества воды и первичных гидрооптических характеристик использовались полевые данные и снимки Sentinel-2 (2018–2019). Исследования показали, что определяющей характеристикой термокарстовых озёр Ямала является концентрация взвешенных веществ: классы озёр, различимые на многозональных снимках по яркостным признакам, также различаются по диапазонам концентрации взвешенных веществ. В качестве дополнительного результата было выявлено, что основными рассеивателями (источниками «белых частиц») термокарстовых озёр Центрального Ямала являются ил, глины и минералы, которые увеличивают отражательную способность воды из-за высокого уровня рассеяния и сравнительно низкого уровня поглощения. Для получения детальных результатов, включающих диапазоны изменений всех возможных водных параметров, потребуется создание специальной арктической биооптической базы данных.

Ключевые слова: термокарстовые озёра, Ямал, Landsat, анализ и интерпретация снимков, Sentinel-2, водные процессоры

Одобрена к печати: 02.02.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-308-322

Введение

Площадь низменностей арктического и субарктического пояса покрыта тысячами малых и больших озёр. Есть территории, где акватория озёр достигает 30–40 % площади суши. На Ямале озёра составляют свыше 20 % всей поверхности полуострова (Томирдиаро, 1965). В некоторых местах озёр так много, что оставшиеся между ними сухие перемычки и останцы древней поверхности выглядят как острова среди воды. Очевидно, что существование этих водоёмов, их быстрое развитие и даже миграция по тундре должны серьёзно отразиться на промышленном и хозяйственном освоении Крайнего Севера. Многочисленные озёра арктических низменностей, как отмечают все исследователи, в основном имеют термокарстовое происхождение, т. е. образуются за счёт вытаивания подземных льдов. Согласно работе (Соловьев, 1973), термокарст в Центральной Сибири развивается в соответствии с циклом талых озёр, описанным в литературе по Северной Америке (Cabot, 1947; Hopkins, 1949), и часто связан с экологическими изменениями.

Мониторинг и картирование арктических поверхностных вод важны для документирования и понимания термокарстовых процессов. Дистанционное зондирование (ДЗ) является наиболее распространённым инструментом, применяемым для этих целей. В ряде исследований для картирования протяжённости термокарстовых озёр и их изменений в различных регионах Арктики использовались аэрофотоснимки и/или космические снимки начиная с 1948 г. (Веремеева, 2017; Кирпотин и др., 2008; Andresen, Loughheed, 2015; Jones et al., 2011; Plug et al., 2008; Smith et al., 2005 и др.).

В предыдущих исследованиях отсутствуют как существенные доказательства того, что полные циклы оттаивания имели место в ландшафтах арктических тундр Ямала за последние десятилетия, так и описания особенностей эволюции озёр Ямала. В то же время многолетние архивы спутниковых изображений Landsat, открытые Геологической службой США (англ. United States Geological Survey — USGS) в 2008 г., дают возможность получения новых знаний о водных объектах.

Спутники Европейского космического агентства (ЕКА, англ. European Space Agency — ESA) Sentinel-2 обеспечивают наблюдения с высоким спектральным, пространственным и временным разрешением, что также может быть использовано для мониторинга внутренних вод. Внутренние воды представляются оптически сложными и разнообразными, цвет воды может меняться от совершенно прозрачного до тёмно-коричневого в зависимости от наличия и состояния оптически активных веществ — фитопланктона/хлорофилла (ХЛ), взвешенных веществ (ВВ) и окрашенных растворённых органических веществ (ОРОВ). Среди различных алгоритмов (эмпирических, полуэмпирических, полуаналитических) для получения параметров качества таких вод наиболее эффективными выступают многоспектральные многокомпонентные аналитические алгоритмы, в которых используются все имеющиеся спектральные диапазоны и спектр отражения инвертируется для одновременного получения нескольких параметров качества воды (Doeffler, Schiller, 2007; Schiller, Droeffler, 1999).

Поскольку на динамику термокарстовых озёр в большой степени влияют как взаимосвязанные термические и геоморфологические процессы внутри отдельных озёр, так и взаимодействие между озёрами, термокарстовые процессы в отдельных арктических регионах могут быть очень индивидуальными (Plug et al., 2008). Поэтому мониторинг арктических озёр требует комплексного и детального подхода.

Классификация озёр в соответствии с яркостными характеристиками и диапазонами параметров качества воды — концентрации ВВ и ХЛ, коэффициента поглощения ОРОВ — может быть ключевым решением для разработки функциональных алгоритмов ДЗ термокарстовых озёр.

Материалы и методы

Анализ и интерпретация на основе использования временного ряда данных

Большинство исследований, в которых изучается динамика термокарстовых озёр в зоне сплошной вечной мерзлоты на основе разновременного ДЗ, связаны с вычислением площади поверхности озёр. Эти исследования показывают, что площадь термокарстовых озёр может:

- увеличиваться (Кирпотин и др., 2008; Olthof et al., 2015; Smith et al., 2005);
- уменьшаться из-за осушения озёр (Веремеева, 2017; Кравцова, Быстрова, 2009; Andresen, Loughheed, 2015; Carroll et al., 2011; Jones et al., 2011);
- увеличиваться или уменьшаться (Plug et al., 2008);
- претерпевать незначительные изменения (Riordan et al., 2006).

Такую многозначность результатов можно объяснить, прежде всего, региональными климатическими и геоморфологическими различиями, а также различиями во временных и пространственных масштабах анализа спутниковых данных.

Большинство исследований региональных изменений термокарстовых озёр на основе анализа космических данных базировались на бинарных классификациях «суша — вода», что

позволяет получить информацию о наличии/отсутствии водных объектов на снимках и многолетней динамике площади озёр. Для исследования деталей эволюции термокарстовых озёр необходимо осуществлять классификацию и учитывать качественные изменения состояния водных объектов, для этого требуется анализ снимков в контексте гидрооптических характеристик водных объектов и распознавания образов.

С точки зрения статистической теории обучения эффективность распознавания образов и обработки космических снимков служит огромной платформой для использования экспертных знаний и априорных вероятностей, поэтому для решения проблемы понимания того, что представлено на снимках с точки зрения распознавания зрительных образов, требуются априорные знания экспертов в дополнение к самим снимкам (Marr, 1987; Baraldi, 2017). В частности, такие знания необходимы при интерпретации многоспектральных космических снимков, обычно основанной на базовых элементах распознавания (цветовая информация, тон, текстура, соотношение связанных признаков, форма, размер и т.д.). Результаты интерпретации снимков способствуют эффективному картированию многих областей за счёт добавления специфической информации, которую невозможно, сложно или экономически нецелесообразно получать обычными полевыми методами картирования (Ray, 1960).

Основная задача интерпретации многозональных снимков как инструмента рекогносцировочной водно-ресурсной картографии заключается в получении новых знаний о водных объектах.

Использование космических снимков Sentinel-2 и водных процессоров

Классификационные подходы широко используются в дистанционном зондировании природных вод, и их популярность в последние годы возросла. В течение нескольких десятилетий система классов case1 и case2 была наиболее широко используемой оптической классификацией для водных объектов (Kratzer et al., 2020; Morel, Prieur, 1977). Ранние протоколы NASA (NASA — National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — НАСА) различали классы case1 и case2 по соответствующим значениям параметров: в водах класса case2 концентрация $BB \geq 0,5 \text{ гм}^{-3}$ и коэффициент поглощения ОРОВ при длине волны 380 нм $\geq 0,1 \text{ м}^{-1}$ (Mueller, Austin, 1995).

Для извлечения параметров качества воды на основе использования спутниковых данных требуется биооптическая модель, которая включает в себя описание соответствующих оптических свойств (коэффициенты поглощения и рассеяния), а также процедуру инверсии спектра отражательных способностей воды (Brockmann et al., 2016). В программном комплексе ЕКА SNAP (*англ.* Sentinel Application Platform) (<https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>) реализованы водные процессоры C2RCC (*англ.* Case-2 Regional CoastColour) и C2X (*англ.* Case-2 eXtreme) для расчёта пяти основных биооптических компонент поглощения и рассеяния света частицами в водной среде, определяемых для длины волны 443 нм:

- общее поглощение (iop_{atot}) состоит из поглощения пигментами фитопланктона (iop_{apig}), детритом (iop_{adet}) и ОРОВ (жёлтым веществом, гельбстоффом, iop_{agelb});
- общее рассеяние (iop_{btot}) состоит из рассеяния ВВ (iop_{btsm}) и рассеяния белыми, более крупными частицами (iop_{bwhit}).

Процессор C2RCC представляет собой программное обеспечение для обработки данных, полученных, в частности, с помощью мультиспектральной камеры MSI (*англ.* Multispectral Instrument). Процессор (как программный продукт) становится дальнейшим развитием регионального процессора C2R, изменённого в проекте CoastColour (www.coastcolour.org) (Brockmann et al., 2016; Doeffler, Schiller, 2007).

В случае C2RCC диапазон обучения нейронных сетей включает многие ситуации, характерные для внутренних вод, в том числе умеренно мутных и умеренно поглощающих вод. В C2X были включены экстремальные ситуации, при этом эффективность вычисления первичных гидрооптических характеристик (ПГХ) в более чистой воде несколько снижается.

Поскольку MSI не предназначен специально для ДЗ арктической водной среды, в настоящее время нет демонстрации того, что снимки Sentinel-2 MSI могут быть использованы для картирования внутренних вод Арктики. Также качество нейросетевых алгоритмов MSI_{C2RCC} и MSI_{C2X} может быть разным в разных регионах, поэтому для сравнения результатов с реальной ситуацией необходимо использовать данные *in situ*.

Качественная оценка изменений термокарстовых озёр на основе анализа и интерпретации данных Landsat

Циклы развития термокарстовых озёр

Термокарст образуется в связи с вытаиванием подземных льдов. Это явление сопровождается проседанием поверхности земли и возникновением отрицательных форм рельефа. Вода, образовавшаяся в результате вытаивания льдов, выходит на поверхность и, заполняя возникшие местные понижения, образует термокарстовое озеро, если из него не происходит стока воды. В противном случае вода стекает, возникает сухое термокарстовое понижение (заболоченная впадина, хасырей, алас) (Кудрявцев, 1958). В результате формируется обычный термокарстовый ландшафт; озёра возникают в старых котловинах после их промерзания и льдонасыщения по многу раз, поэтому их называют повторно-термокарстовыми озёрами (Томирдиаро, 1969).

Модель цикла термокарстового озера была инициирована в работе (Cabot, 1947), затем сформулирована в публикации (Hopkins, 1949) и более подробно исследована в работах (Кудрявцев, 1958; Томирдиаро, 1965, 1969; Томирдиаро, Рябчун, 1973; Billings, Peterson, 1980; Hinkel et al., 2003). Данная модель определяет небольшие водоёмы как ключевые элементы начала развития термокарстовых озёр. Цикл начинается с развития водоёмов на пересечении впадин ледяных клиньев. Эти скопления воды в конечном итоге объединяются и расширяются, образуя небольшие озёра. Термическая эрозия вдоль окраин озёр в сочетании с таянием вечной мерзлоты под стоячей водой со временем увеличивает их размеры. По мере того как озеро расширяется, оно может объединяться с близлежащими небольшими водоёмами и озёрами. В конце концов озеро истощается, и может произойти его полный дренаж. Но большинство озёр истощаются частично, оставляя остаточное озеро или несколько прудов, гнездящихся в более старом бассейне. После осушения озера рост ледяного клина обычно возобновляется, начиная новую фазу цикла оттаивания озера (Hinkel et al., 2003).

Осушенные озёра являются заметной и устойчивой особенностью ландшафта озёрной тундры. Недавно осушенные озёра состоят из пологих участков оголённой глины. Однако вскоре осушенное озеро превращается в плоское болото. На его дне снова образуется многолетняя мерзлота (Hopkins, 1949). Отметим, что на севере Канады скорость осушения термокарстовых озёр в равнинах ускорилась за последние 50 лет по причине климатических изменений (Roy-Léveillé, 2014).

Исследованиями в работе (Кудрявцев, 1958) было впервые доказано, что образование термокарстовых озёр не является только признаком общей деградации вечной мерзлоты и потепления климата, они могут активно развиваться даже в самых холодных арктических тундрах. Для этого необходимо широкое распространение подземных льдов и увеличение глубины сезонного протаивания в условиях сохранения возникшего озера от высыхания.

Закономерности озёрного термокарста могут быть подразделены на общие и региональные (Томирдиаро, Рябчун, 1973). Общие — это закономерности накопления тепла в первичных и растущих водоёмах, развития подозёрных таликов и термического разрушения берегов. Региональные же обусловлены предысторией развития отдельного региона.

Предполагается, что термокарстовые озёра развиваются циклически, движимые процессами, которые запускаются климатом и поддерживаются «внутренними обратными связями, которые могут вызвать осушение озера; при этом продолжительность этих циклов остаётся неясной» (Pestryakova et al., 2012).

Поскольку цикл таяния озёр предполагает, что после осушения водоёмы будут реформироваться в результате прогрессивного развития прудов, небольшие водоёмы представляют собой фундаментальный аспект эволюции термокарстовых озёр.

Интерпретация многозональных архивных снимков Landsat позволила получить детали цикла термокарстовых озёр Центрального Ямала. Оказалось, что в 1984–2018 гг. около 10 больших озёр стали полностью осушенными. На *рис. 1* представлены расположение (сервис Google Планета Земля (*англ.* Google Earth)) и фрагменты цикла (Landsat) для одного из таких озёр: бессточное озеро (2003, 2006); осушенное озеро (2009, 2013); осушенное озеро, покрытое растительностью (2018).

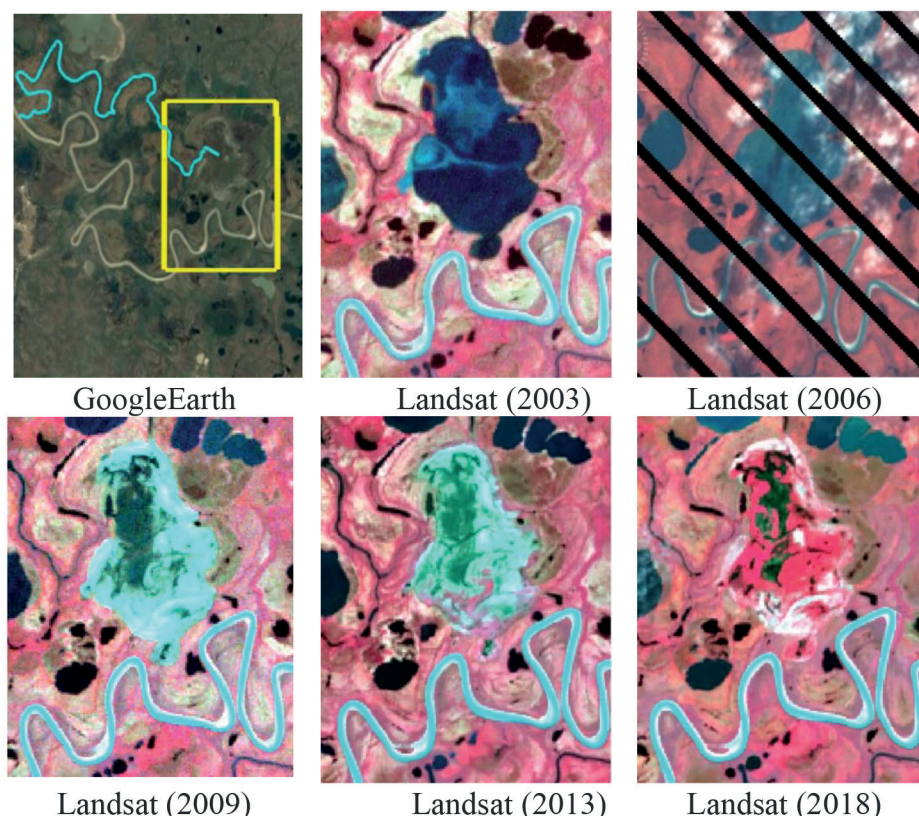


Рис. 1. Фрагменты цикла термокарстового озера по снимкам Landsat: жёлтый контур — расположение озера, высохшего в 2006–2019 гг.; голубая линия — дренажный выход

Концентрация минеральных ВВ как признак классификации озёр на основе использования многоспектральных данных

Одной из характеристик внутренних вод может быть большая концентрация неорганических рассеивателей в воде, в частности ВВ. Частицы во взвешенном состоянии состоят из неорганической и органической фракций. Основным рассеивающим веществом является неорганическое ВВ, которое состоит в основном из минеральных частиц, таких как ил, глина или песок, при этом рассеяние частиц определяется их типом, размером и внутренним коэффициентом преломления (Kratzer et al., 2020). Поскольку неорганическое ВВ имеет большой коэффициент преломления и относительно высокое обратное рассеяние (*iop_bpart*), то, следовательно, даёт спектры отражения на несколько порядков больше по величине, чем воды, богатые ОРОВ или только содержащие фитопланктон (Kratzer et al., 2020). Таким образом, наличие неорганического ВВ можно проследить со спутника из-за его сильных рассеивающих свойств, поэтому для качественных оценок состояния соответствующей водной среды может быть использован цветовой анализ многозональных снимков (Kondratyev et al., 1998).

Ещё одной характеристикой качества воды, которую можно получить на основе анализа и интерпретации многозональных космических снимков, становится мутность (или мера светорассеивающих свойств воды), которая обусловлена наличием ВВ (Kratzer et al., 2020). Проведённые ранее исследования показывают следующее:

- имеется сильная линейная зависимость между мутностью и концентрацией ВВ (Xing et al., 2013);
- существуют значительные взаимосвязи между мутностью и яркостью (отражательной способностью) спектральных каналов Landsat (Chebud et al., 2012);
- в высокомутных водах соответствующие отражения в разных диапазонах спектра незначительно зависят от типа осадков и сильно коррелируют с концентрацией ВВ (Doxaran et al., 2003).

«Илистость» («заиленность») определялась как состояние воды, в котором ил и/или глины находятся во взвешенном состоянии (часто смесь того и другого), без какого-либо различия между глиной и илом. В соответствии с этим определением илистость вызывается частицами глины и/или частицами ила, взвешенными в воде, поэтому в дальнейшем будем рассматривать илистость и повышенную илистость как соответствующие повышенные значения концентрации ВВ.

Классификация озёр

В нашем исследовании для интерпретации был взят временной ряд (1984–2018) многозональных космических снимков Landsat обучающего участка Центрального Ямала (район Бованенково). Оказалось, что на искомом участке Бованенково насчитывается 220 озёр, которые хотя бы на одном из использованных снимков были представлены высоким содержанием ила.

В результате визуального анализа временного ряда снимков с использованием цветовой модели RGB = (band_4, band_3, band_2) (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий) озёрам присваивался экспертный оценочный рейтинг содержания ила (табл. 1).

Таблица 1. Оценочный рейтинг содержания ила ($rating_{ism}$) на основе цветовых признаков

Цветовая модель RGB = (band_4, band_3, band_2)	$rating_{ism}$
Бело-синий и оттенки	4,0
Ярко-голубой	3,0
Тёмно-серый, жёлтый, зелёно-синий и оттенки	2,0
Чёрный	1,0

Озёра, для которых $rating_{ism} < 1,5$, с большой вероятностью являются прозрачными: чем ниже $rating_{ism}$, тем более прозрачным является озеро. Озёра, для которых $rating_{ism} > 2,5$, с большой вероятностью являются заиленными: чем выше $rating_{ism}$, тем более заиленным является озеро. Озёра, для которых $1,5 < rating_{ism} < 2,5$, являются визуально неоднородными и требуют дополнительной классификации, которая осуществлялась в два этапа.

На первом этапе классификации выявлялись стабильные озёра (S) в соответствии со следующими правилами определения классов по наблюдениям временного ряда:

- класс S1 — для озёр класса в большинстве наблюдений $rating_{ism} < 1,5$, при этом ни в один год $rating_{ism}$ не имел значение выше 3,0.
- класс S2 — для озёр класса в большинстве наблюдений $rating_{ism}$ попадает в диапазон от 1,5 до 2,5, при этом количество экстремальных значений ($rating_{ism} > 3$ или $rating_{ism} < 1,5$) было в менее половины наблюдений.

- класс *S3* — для озёр класса в большинстве наблюдений $rating_{ism}$ попадает в диапазон от 1,5 до 2,5, при этом во всех наблюдениях $rating_{ism} > 1,5$.
- класс *S4* — для озёр класса $rating_{ism} \cong 4,0$ во всех наблюдениях.

Класс постоянно прозрачных озёр (*S1*) далее не рассматривается, поскольку анализ ограничивался теми озёрами, которые хотя бы один раз были высоко заиленными на снимках временного ряда.

Оставшиеся озёра были схожи с классом *S2*, но оказались более динамичными (пульсирующими). Пульсация ила может быть интенсивной (вызывающей высокое содержание концентрации ВВ) или умеренной (вызывающей ограниченное увеличение концентрации ВВ). Кроме того, иловые импульсы всех типов могут возникать часто или быть редкими явлениями. Частота и интенсивность обусловлены региональными различиями.

Пульсирующие озёра (*P*) выявлялись на втором этапе классификации в соответствии со следующими правилами определения классов:

- класс *P1* — для озёр класса в большинстве наблюдений $rating_{ism} < 1,5$;
- класс *P2* — для озёр класса в большинстве наблюдений $rating_{ism}$ попадает в диапазон от 1,5 до 2,5;
- класс *P3* — для озёр класса в большинстве наблюдений $rating_{ism} > 2,5$.

Примеры фрагментов временного ряда снимков Landsat для образцов каждого класса представлены на рис. 2 (см. с. 315). Обнаружилось, что 80 из 220 озёр являются стабильными с точки зрения содержания ила, остальные 140 озёр — периодически заиленные (табл. 2). При этом отдельный иловый импульс оказывается относительно длительным явлением: в пульсирующих озёрах (*P1*, *P2*, *P3*) иловые импульсы сохраняются больше года, в стабильных озёрах (*S2*, *S3*, *S4*) — почти постоянно.

Таблица 2. Обобщённые результаты визуальной классификации озёр

ID класса	Описание класса	Число озёр	ID образца
<i>Постоянно/стабильно заиленные озёра</i>			
<i>S2</i>	умеренно заиленные	14	TS34
<i>S3</i>	заиленные	57	LDB594
<i>S4</i>	высоко заиленные	19	RS09
<i>Пульсирующие заиленные озёра</i>			
<i>P1</i>	(почти) прозрачные с циклами заиливания	25	TS54
<i>P2</i>	умеренно заиленные с циклами заиливания	93	TF03
<i>P3</i>	заиленные с циклами высокого заиливания	12	TS29
Итого:		220	

В результате визуального анализа и интерпретации многозональных снимков Landsat Центрального Ямала (район Бованенково) в видимом спектре принята гипотеза о том, что отражение озёрами Центрального Ямала определяется большей частью минеральным илом и минеральной глиной (органическая фракция этих озёр относится к второстепенным обстоятельствам). Заиленные участки водной поверхности представлены как области беловатого цвета, отражающие все входящие длины волн видимого спектра во всех направлениях, без какого-либо поглощения. Фактически водные участки с взвешенными частицами ила действуют как «зеркала» в видимом диапазоне длин волн. Другими словами, рассеяние света на минеральных ВВ приводит к возрастанию восходящей яркости, и увеличение яркости оказывается настолько сильным, что отдельные участки заиливания и полностью заиленные озёра распознаются как белые (или серые) объекты.

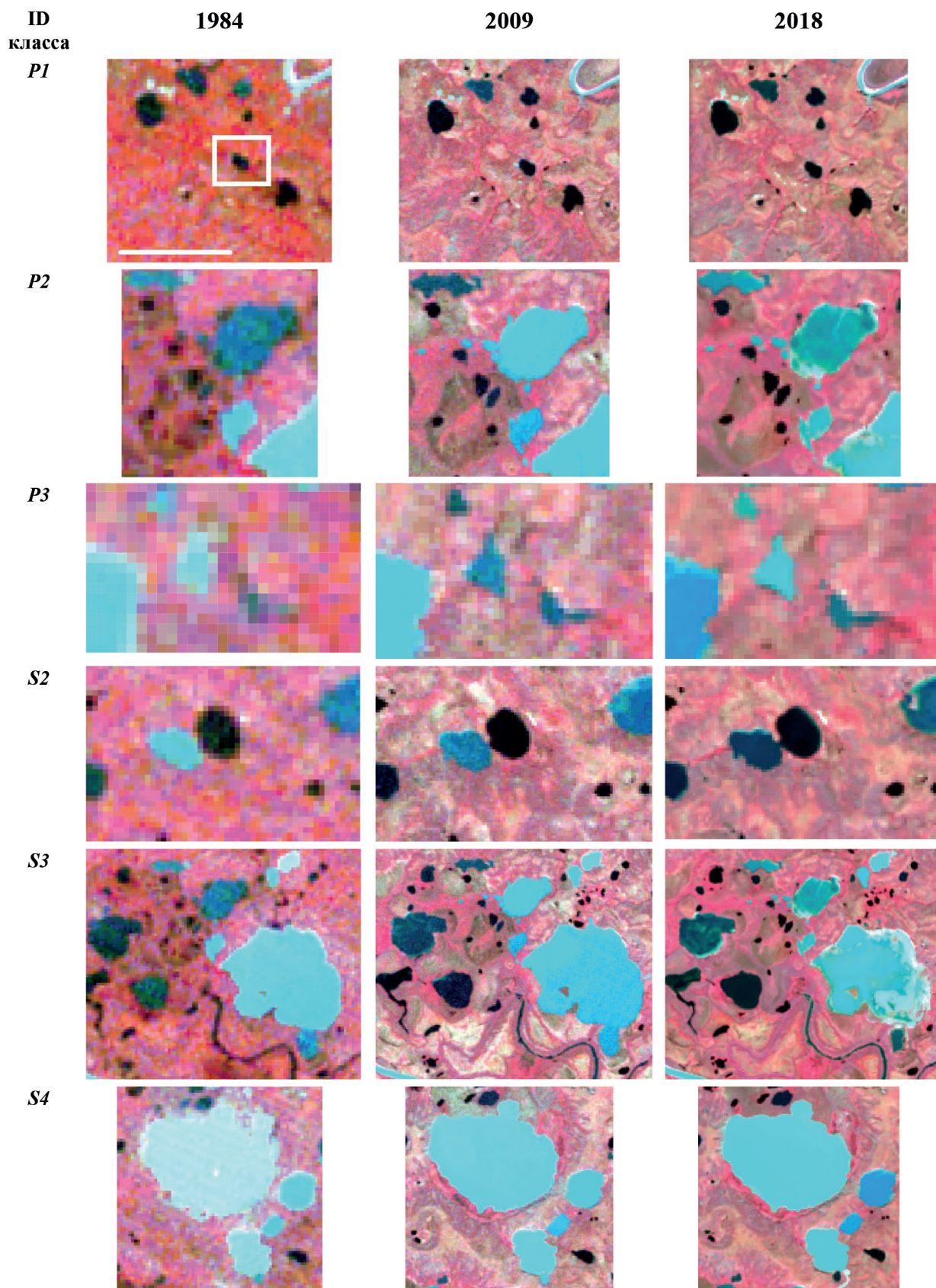


Рис. 2. Фрагменты временного ряда, представляющие образцы классов озёр в соответствии с цветовой моделью RGB = (band_4, band_3, band_2)

Поскольку максимально эффективное использование методов интерпретации снимков достигается при сочетании с полевыми и лабораторными исследованиями, на следующем шаге были использованы полевые данные и результаты лабораторного анализа, а также результаты обработки дополнительных спутниковых данных Sentinel-2 MSI.

Получение параметров качества воды и первичных гидрооптических характеристик на основе использования данных Sentinel-2 MSI

Водные пробы и спутниковые данные Sentinel-2 MSI

Собрано 89 образцов из 64 озёр региона Бованенково во время двух экспедиций, проведённых в августе – сентябре 2018–2019 гг. Данные *in situ* включали пробы из озёр разного размера и с различными оптическими свойствами. В лабораторных условиях водные образцы использовались для определения содержания ВВ и ХЛ и получения коэффициента поглощения жёлтого вещества (ЖВ). При этом общее содержание ВВ колебалось от 2,4 до 1354 г/м³, ХЛ-а — от 1,24 до 23,17 мг/м³, коэффициент поглощения РОВ, измеренный на длине волны 440 нм, — от 0,6 до 9,1 м⁻¹.

За безлёдный период 2018–2020 гг. обнаружено и использовано 10 безоблачных или почти безоблачных сцен первого уровня обработки (L1) Sentinel-2 MSI. Предварительная обработка включала передискретизацию (*англ.* resampling) данных всех спектральных диапазонов до пространственного разрешения 20 м. Продукты второго уровня обработки (L2) были получены для восьми сцен Sentinel-2 MSI от 21–22 июля 2018 г. и 23 июля 2019 г. В частности, результатом использования нейросетевых алгоритмов C2RCC и C2X по данным прибора MSI (MSI_{C2RCC} и MSI_{C2X}) были концентрация ВВ, концентрация ХЛ в поверхностном слое озёр и ПГХ.

Соотношение результатов обработки спутниковых данных с лабораторными измерениями на основе данных *in situ*

Сопоставление данных наземных наблюдений и данных, рассчитанных по снимкам Sentinel-2 MSI с использованием двух алгоритмов MSI_{C2RCC} и MSI_{C2X}, показало отсутствие корреляции между измеренными и вычисленными значениями концентрации ХЛ и коэффициента поглощения РОВ (квадрат коэффициента корреляции $R^2 < 0,1$), поэтому в дальнейших исследованиях концентрация ВВ использовалась как основной признак для классификации озёр, и на её основании проводились соответствующие оценки.

При сравнении концентрации ВВ оказалось, что для диапазона концентрации ВВ $conc_tsm < 150$ использование алгоритма MSI_{C2RCC} демонстрирует гораздо лучшие результаты, чем алгоритма MSI_{C2X}. Для значений $conc_tsm > 150$ MSI_{C2RCC} показывает завышенные значения, а применение MSI_{C2X} представляется достаточно эффективным (*рис. 3*, см. с. 317).

При биооптическом моделировании под водной взвесью понимают совокупность крупных и мелких частиц (Brockmann et al., 2016; Brumberger et al., 1968). Сильные белые рассеиватели были отдельно выделены в используемой биооптической модели, где фракции разделяются на мелкую и крупную. Последняя описывает большие (белые) частицы. В частности, в модели есть две разные гидрооптические характеристики для описания рассеивания материала в воде: коэффициент iop_bwit описывает рассеяние белыми (более крупными) частицами, коэффициент iop_bpart — рассеяние более тёмными (мелкими) частицами. При сравнении лабораторной концентрации ВВ с ПГХ, полученной с помощью алгоритмов MSI_{C2RCC} и MSI_{C2X}, самую сильную корреляцию продемонстрировал коэффициент рассеяния белыми частицами iop_bwit . При этом корреляция оказалась более существенной в случае использования алгоритма MSI_{C2X}, чем в случае использования MSI_{C2RCC} (*рис. 4*, см. с. 317).

Высокий уровень соответствия между измеренной концентрацией и спутниковыми биооптическими параметрами позволяет оценивать концентрации ВВ для озёр, находящихся за пределами обучающего участка Центрального Ямала (регион Бованенково).

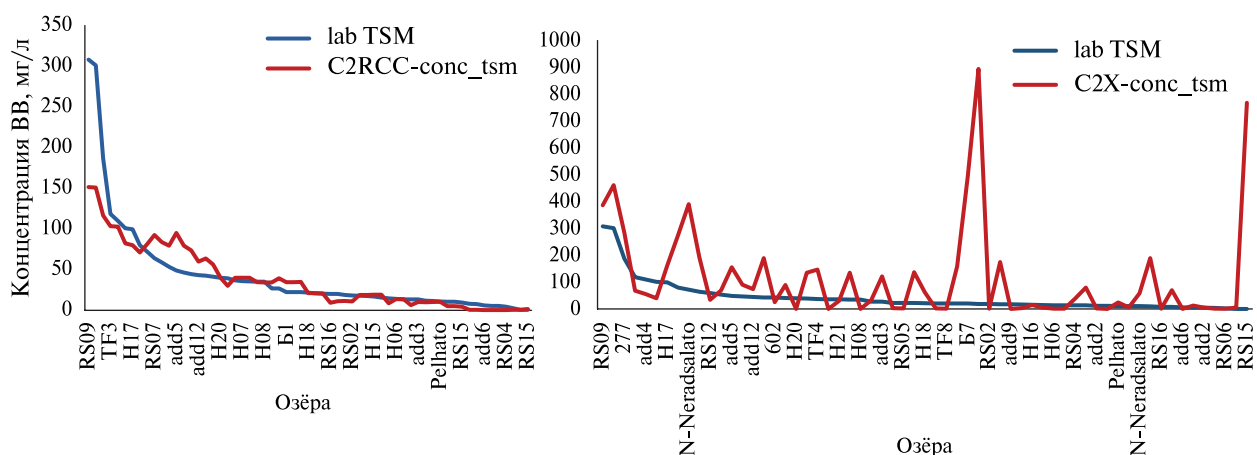


Рис. 3. Измеренные значения концентрации ВВ (*lab TSM*) по данным *in situ* и концентрации ВВ по данным Sentinel-2 (*conc_tsm*) MSI_{C2RCC} (слева), MSI_{C2X} (справа)

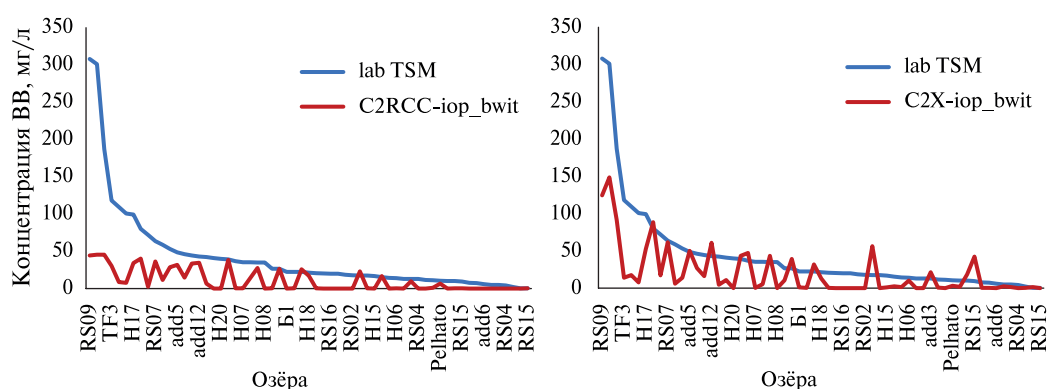


Рис. 4. Измеренные значения концентрации ВВ (*lab TSM*) по данным *in situ* и коэффициент рассеяния белыми частицами (*iop_bwit*) MSI_{C2RCC} (слева), MSI_{C2X} (справа)

С этой целью были обработаны безоблачные и безледовые сцены Sentinel-2 (2019–2020) на основе параметрической классификации, полностью покрывающие центральную часть п-ова Ямал. Результаты обработки сцен на основе обучающих процедур могут быть основой для выделения озёр различных классов. Рисунок 5 (см. с. 318) демонстрирует одну из таких возможностей — определение местоположения постоянно мутных озёр, представляющих особый интерес и требующих дополнительного исследования, поскольку вода в этих озёрах имеет источник ВВ и является турбулентной.

Заключение

В результате проведённых исследований на основе данных дистанционного зондирования района Бованенково (многоспектральные сенсоры, 1984–2020 гг.), а также данных полевых исследований (2018–2019) получены детали циклического развития и «внутренних обратных связей» (Pestryakova et al., 2012) озёр Центрального Ямала.

Оказалось, что для Ямала характерны как заиляющиеся озёра в пульсирующей форме (с периодами заиления или высокого заиления — прозрачные, умеренно заиленные, заиленные), так и заиленные озёра в стабильной форме (умеренно заиленные, заиленные, высоко заиленные).

Для классификации и мониторинга на основе многоспектральных спутниковых данных важной характеристикой термокарстовых озёр Ямала выступает концентрация ВВ: классы озёр, различимые на многозональных снимках по яркостным признакам, также различаются по диапазонам концентрации ВВ.

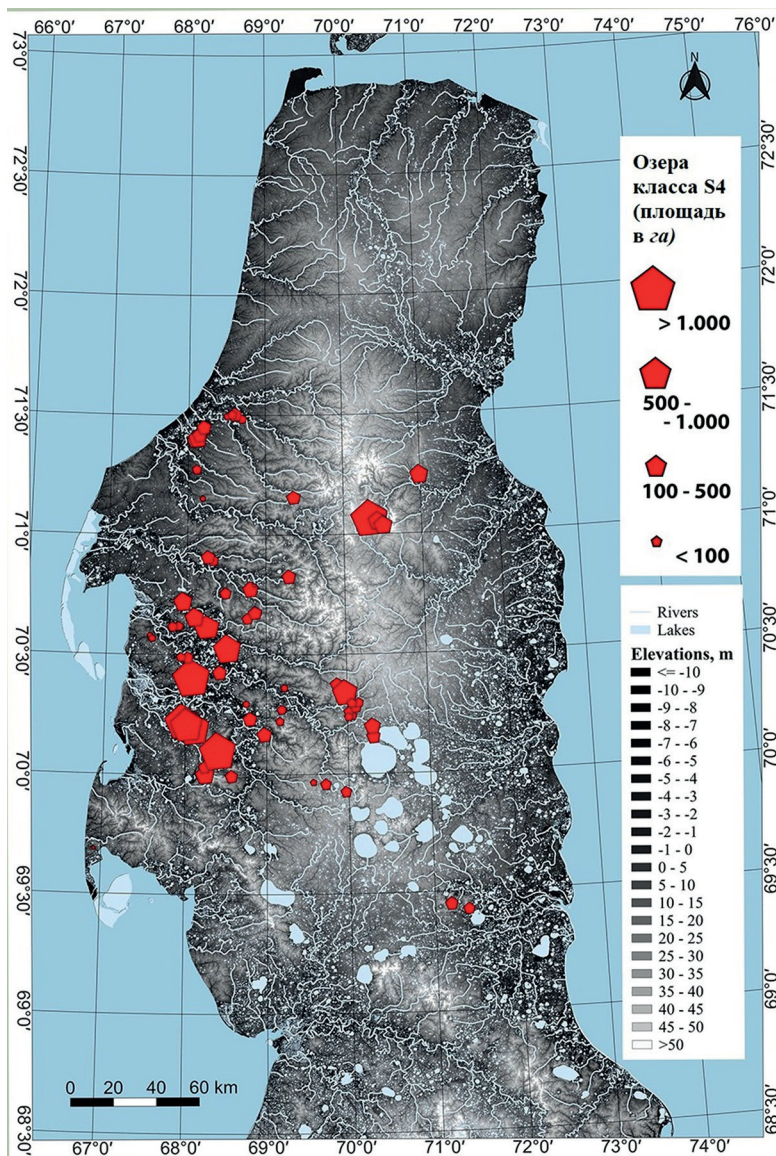


Рис. 5. Расположение постоянно мутных озёр Центрального Ямала как результат классификации сцен Sentinel-2 MSI с обучением

Проведённые исследования на основе данных Landsat и Sentinel-2 показали, что для термокарстовых озёр Центрального Ямала основными рассеивателями (источниками «белых частиц») становятся ил, глины и минералы, которые увеличивают отражательную способность воды из-за высокого уровня рассеяния (высоких значений коэффициента рассеяния белыми частицами) и сравнительно низкого уровня поглощения. Поскольку одной из причин того, что ил остаётся во взвешенном состоянии в постоянно высоко заиленных озёрах, является турбулентность, следующий шаг исследования будет посвящён возможным причинам этой турбулентности.

Интерпретация и картографирование водных объектов из космоса с использованием многоспектральных данных позволяет распознавать различные классы арктических озёр, в частности термокарстовых озёр Ямала. Частые снимки с высоким пространственным разрешением позволяют перейти к детальному мониторингу озёр разных классов и эффективно-му получению пространственного распределения доминирующих водных характеристик. Для получения более точных результатов, включающих все возможные водные параметры, потребуется создание арктической биооптической базы данных и специальной биооптической модели.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института водных и экологических проблем СО РАН (регистрационный номер 121031200178-8) при финансовой поддержке Российского центра освоения Арктики (Салехард, Россия).

Литература

1. *Веремеева А. А.* Формирование и современная динамика озерно-термокарстового рельефа тундровой зоны Колымской низменности по данным космической съемки: дис. ... канд. геогр. наук. Пушино, 2017. 134 с.
2. *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. Томского гос. ун-та. 2008. № 311. С. 185–189.
3. *Кравцова В. И., Быстрова А. Г.* Изменение размеров термокарстовых озер в различных районах России за последние 30 лет // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 2. С. 16–26.
4. *Кудрявцев В. А.* О термокарсте // Вопросы физической географии полярных стран: сб. Вып. 1 / под ред. В. Г. Богорова. М.: Изд-во МГУ, 1958. С. 101–106.
5. *Март Д.* Зрение: Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов / пер. с англ. Н. Г. Гуревич; под ред. И. Б. Гуревича. М.: Радио и связь, 1987. 400 с.
6. *Соловьев П. А.* Аласный термокарстовый рельеф Центральной Якутии: Путеводитель. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1973. 47 с.
7. *Томирдиаро С. В.* Физика озерного термокарста в полярных низменностях и в Антарктиде и криогенная переработка грунтов // Колыма. 1965. № 7. С. 30–34. № 8. С. 36–40. № 10.
8. *Томирдиаро С. В.* Эволюция озерно-термокарстовых ландшафтов на равнинах Восточной Сибири и динамика подземного оледенения // Палеогеографические аспекты изменения природных условий Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск, 1969. С. 65–67.
9. *Томирдиаро С. В., Рябчун В. К.* Озерный термокарст на Нижне-Анадырской низменности // Докл. 2-й Международ. конф. по мерзлотоведению. Якутск, 1973. С. 58–67.
10. *Andresen C. G., Lougheed V. L.* Disappearing Arctic tundra ponds: Fine-scale analysis of surface hydrology in drained thaw lake basins over a 65 year period (1948–2013) // J. Geophysical Research: Biogeosciences. 2015. V. 120. P. 466–479. DOI: 10.1002/2014JG002778.
11. *Baraldi A.* Pre-processing, classification and semantic querying of large-scale Earth observation spaceborne/airborne/terrestrial image databases: Process and product innovations: Doctoral Thesis. Naples, 2017. 519 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.25510.52808.
12. *Billings W. D., Peterson K. M.* Vegetational change and ice-wedge polygons through the thaw-lake cycle in arctic Alaska // Arctic and Alpine Research. 1980. V. 12. No. 4. P. 413–432.
13. *Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Kerstin S., Embacher S., Ruescas A.* Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel 2 and 3 for the Retrieval of Ocean Colour Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters // Proc. Living Planet Symp. 9–13 May 2016, Prague, Czech Republic / ed. L. Ouwehand. ESA Special Publication. 2016. V. 740. P. 54–60.
14. *Brumberger H., Stein R. S., Powell R.* Angular patterns of scattered intensity for three basic particle sizes // Light Scattering, Science and Technology. 1968. November. P. 38–42.
15. *Cabot E. C.* The northern Alaskan coastal plain interpreted from aerial photographs // Geographical Review. 1947. V. 37. No. 4. P. 639–648. DOI: 10.2307/211190.
16. *Carroll M. L., Townshend J. R. G., DiMiceli C. M. et al.* Shrinking lakes of the Arctic: Spatial relationships and trajectory of change // Geophysical Research Letters. 2011. V. 38(20). Article L20406. DOI: 10.1029/2011GL049427.
17. *Chebud Y., Naja G., Rivero R., Melesse A.* Water Quality Monitoring Using Remote Sensing and an Artificial Neural Network // Water, Air, and Soil Pollution. 2012. V. 223. P. 4875–4887.
18. *Doerffer R., Schiller H.* The MERIS Case 2 water algorithm // Intern. J. Remote Sensing. 2007. V. 28. P. 517–535. DOI: 10.1080/01431160600821127.
19. *Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P.* Remote-Sensing Reflectance of Turbid Sediment-Dominated Waters. Reduction of Sediment Type Variations and Changing Illumination Conditions Effects by Use of Reflectance Ratios // Applied Optics. 2003. V. 42(15). P. 2623–2634. DOI: 10.1364/a0.42.002623.
20. *Hinkel K. M., Eisner W. R., Bockheim J. G. et al.* Spatial extent, age, and carbon stocks in drained thaw lake basins on the Barrow Peninsula, Alaska // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2003. V. 35(3). P. 291–300. DOI: 10.1657/1523-0430(2003)035[0291:SEAACS]2.0.CO;2.
21. *Hopkins D.* Thaw lakes and thaw sinks in the Imuruk Lake area, Seward Peninsula, Alaska // J. Geology. 1949. V. 57. No. 2. P. 119–131. DOI: 10.1086/625591.

22. Jones B., Grosse G., Arp C. et al. Modern Thermokarst Lake Dynamics in the Continuous Permafrost Zone, Northern Seward Peninsula, Alaska // J. Geophysical Research Biogeosciences. 2011. V. 116. Article G00M03. DOI: 10.1029/2011jg001666.
23. Kondratyev K. Ya., Pozdnyakov D. V., Pettersson L. H. Water quality remote sensing in the visible spectrum // Intern. J. Remote Sensing. 1998. V. 19. No. 5. P. 957–979. DOI: 10.1080/014311698215810.
24. Kratzer S., Kyriliuk D., Brockmann C. Inorganic suspended matter as an indicator of terrestrial influence in Baltic Sea coastal areas — Algorithm development and validation, and ecological relevance // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 237. Article 111609. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111609.
25. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color // Limnology and Oceanography. 1977. V. 22. No. 4. P. 709–722. DOI: 10.4319/lo.1977.22.4.0709.
26. Mueller J. L., Austin R. W. Ocean optics protocols for SeaWiFS validation, revision 1 // Oceanographic Literature Review. 1995. V. 42. No. 9. P. 805.
27. Olthof I., Fraser R. H., Schmitt C. Landsat-based mapping of thermokarst lake dynamics on the Tuktoyaktuk Coastal Plain, Northwest Territories, Canada since 1985 // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 168. P. 194–204. DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.001.
28. Pestryakova L. A., Herzsich U., Wetterich S., Ulrich M. Present-day variability and Holocene dynamics of permafrost-affected lakes in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from diatom records // Quaternary Science Reviews. 2012. V. 51. P. 56–70. DOI: 10.1016/j.quascirev.2012.06.020.
29. Plug L. J., Walls C., Scott B. M. Tundra lake changes from 1978 to 2001 on the Tuktoyaktuk Peninsula, western Canadian Arctic // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. Iss. 3. Article L03502. DOI: 10.1029/2007GL032303.
30. Ray R. G. Aerial photographs in geologic interpretation and mapping. Report USGS Numbered Series. U. S. Govt. Print. Off., 1960. 230 p. DOI: 10.3133/pp373.
31. Riordan B., Verbyla D., McGuire A. D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // J. Geophysical Research. 2006. V. 111. Article G04002. DOI: 10.1029/2005JG000150,2006/2005JG000150.
32. Roy-Léveillé P. Permafrost and thermokarst lake dynamics in the Old Crow Flats, northern Yukon, Canada: Doctoral Thesis. Ottawa, Canada: Carleton University, 2014. 224 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.1542.1527.
33. Schiller H., Doerffer R. Neural network for emulation of an inverse model — operational derivation of case II water properties from MERIS data // Intern. J. Remote Sensing. 1999. V. 20. No. 9. P. 1735–1746.
34. Smith L. C., Sheng Y., MacDonald G. M., Hinzman L. D. Disappearing Arctic lakes // Science. 2005. V. 308(5727). Article 1429. DOI: 10.1126/science.1108142.
35. Xing Q., Lou M., Chen C., Shi P. Using in situ and Satellite Hyperspectral Data to Estimate the Surface Suspended Sediments Concentrations in the Pearl River Estuary // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2013. V. 6(2). P. 731–738. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2238659.

Comprehensive monitoring of Central Yamal lakes based on multispectral imaging usage

A. V. Puzanov¹, H. J. Drost², V. V. Kirillov¹, O. V. Lovtskaya¹, D. N. Balykin¹,
M. I. Koveshnikov¹, O. B. Akulova¹, K. Teshebaeva³, L. A. Khvorova⁴,
A. V. Kulshin⁴, A. V. Kotovshchikov¹, N. M. Kovalevskaya¹

¹ Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia
E-mail: knm@iwep.ru

² National Institute for Inland Water Management, Lolystad 8224, The Netherlands

³ Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam 1081, The Netherlands

⁴ Altai State University, Barnaul 656049, Russia

The work is devoted to monitoring and mapping thermokarst lakes based on multispectral satellite data. It gives a description of lakes evolution details in Central Yamal through classification and with regard to qualitative changes in the lakes over the past ten years. To analyze and interpret im-

ages in the context of qualitative characteristics of water bodies and pattern recognition, the time series (1984–2018) of multispectral Landsat satellite images of Bovanenkovo region (Central Yamal training area) is used. It appeared that Yamal is characterized by permanently silty lakes (hyper-silty lakes, silty lakes, moderately silty lakes) and intermittently silty lakes (silty lakes with hyper-silty pulses, moderately silty lakes with silt pulses, almost silt-free lakes with silt pulses). Field data and Sentinel-2 images (2018–2019) are employed to derive water quality parameters and inherent optical properties. Our findings suggest that total suspended matter concentration is a major characteristic of Yamal thermokarst lakes (lake classes distinguishable in multispectral images by reflectance also differ in ranges of total suspended matter concentration). An additional result is that main scatterers (sources of “white particles”) of thermokarst lakes in Central Yamal are silts, clays and minerals, which increase water reflectivity due to high scattering and relatively low absorption. In order to obtain comprehensive results, including all possible ranges of water parameters, the creation of a specific Arctic bio-optical database is required.

Keywords: thermokarst lakes, Yamal, Landsat, image analysis and interpretation, Sentinel-2, water processors

Accepted: 02.02.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-308-322

References

1. Veremeyeva A. A., *Formirovanie i sovremennaya dinamika ozerno-termokarstovogo rel'efa tundrovoi zony Kolymskoi nizmennosti po dannym sputnikovoi s'emki: Diss. kand. geogr. nauk* (Formation and modern dynamics of lacustrine-thermokarst topography of the tundra zone of the Kolyma Lowland according to satellite imaging data, Cand. geogr. sci. thesis), Pushchino, 2017, 134 p. (in Russian).
2. Kirpotin S. N., Polishchuk Yu. M., Bryksina N. A., Dynamics of areas of thermokarst lakes in continuous and discontinuous cryozones of Siberia under global warming, *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2008, No. 311, pp. 185–189 (in Russian).
3. Kravtsova V. I., Bystrova A. G., Changes in the size of thermokarst lakes in various regions of Russia over the past 30 years, *Kriosfera Zemli*, 2009, Vol. 13, No. 2, pp. 16–26 (in Russian).
4. Kudryavtsev V. A., About thermokarst, In: *Voprosy fizicheskoi geografii polyarnykh stran, Vyp. 1*, Moscow: MGU, 1959, pp. 101–106 (in Russian).
5. Marr D., *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*, Cambridge: MIT Press, 1982, 400 p.
6. Solov'yev P. A., *Alasnyi termokarstovyi rel'ef Tsentral'noi Yakutii: Putevoditel'* (Alas thermokarst relief of Central Yakutia: Guide), Yakutsk: Knizhnoe izdatel'stvo, 1973, 47 p. (in Russian).
7. Tomirdiario C. B., Physics of lake thermokarst in the polar lowlands and Antarctica and cryogenic processing of soils, *Kolyma*, 1965, No. 7, pp. 30–34, No. 8, pp. 36–40, No. 10 (in Russian).
8. Tomirdiario C. B., Evolution of lacustrine thermokarst landscapes on the plains of Eastern Siberia and the dynamics of underground glaciation, In: *Paleogeograficheskie aspekty izmeneniya prirodnykh uslovii Sibiri i Dalnego Vostoka*, Novosibirsk, 1969, pp. 65–67 (in Russian).
9. Tomirdiario C. B., Ryabchun V. K., Lake thermokarst in the Lower Anadyr Lowland, *Doklady 2-i Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu* (Proc. 2nd Intern. Conf. Permafrost Science), Yakutsk, 1973, pp. 58–67 (in Russian).
10. Andresen C. G., Loughheed V. L., Disappearing Arctic tundra ponds: Fine-scale analysis of surface hydrology in drained thaw lake basins over a 65-year period (1948–2013), *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, Vol. 120, pp. 466–479, DOI: 10.1002/2014JG002778.
11. Baraldi A., *Pre-processing, classification and semantic querying of large-scale Earth observation spaceborne/airborne/terrestrial image databases: Process and product innovations: Doctoral Thesis*, Naples, 2017, 519 p., DOI: 10.13140/RG.2.2.25510.52808.
12. Billings W. D., Peterson K. M., Vegetational change and ice-wedge polygons through the thaw-lake cycle in arctic Alaska, *Arctic and Alpine Research*, 1980, Vol. 12, No. 4, pp. 413–432.
13. Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Kerstin S., Embacher S., Ruescas A., Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel 2 and 3 for the Retrieval of Ocean Colour Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters, *Proc. Living Planet Symp.*, 9–13 May 2016, Prague, Czech Republic, L. Ouwehand (ed.), ESA Special Publication, 2016, Vol. 740, pp. 54–60.
14. Brumberger H., Stein R. S., Powell R., Angular patterns of scattered intensity for three basic particle sizes, *Light Scattering, Science and Technology*, 1968, November, pp. 38–42.

15. Cabot E. C., The northern Alaskan coastal plain interpreted from aerial photographs, *Geographical Review*, 1947, Vol. 37, No. 4, pp. 639–648, DOI: 10.2307/211190.
16. Carroll M. L., Townshend J. R. G., DiMiceli C. M. et al., Shrinking lakes of the Arctic: Spatial relationships and trajectory of change, *Geophysical Research Letters*, 2011, Vol. 38(20), DOI: 10.1029/2011GL049427.
17. Chebud Y., Naja G., Rivero R., Melesse A., Water Quality Monitoring Using Remote Sensing and an Artificial Neural Network, *Water, Air, and Soil Pollution*, 2012, Vol. 223, pp. 4875–4887.
18. Doeffler R., Schiller H., The MERIS Case 2 water algorithm, *Intern. J. Remote Sensing*, 2007, Vol. 28, pp. 517–535, DOI: 10.1080/01431160600821127.
19. Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P., Remote-Sensing Reflectance of Turbid Sediment-Dominated Waters. Reduction of Sediment Type Variations and Changing Illumination Conditions Effects by Use of Reflectance Ratios, *Applied Optics*, 2003, Vol. 42(15), pp. 2623–2634, DOI: 10.1364/AO.42.002623.
20. Hinkel K. M., Eisner W. R., Bockheim J. G. et al., 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), pp. 291–300, DOI: 10.1657/1523-0430(2003)035[0291:SEAACS]2.0.CO;2.
21. Hopkins D., Thaw lakes and thaw sinks in the Imuruk Lake area, Seward Peninsula, Alaska, *J. Geology*, 1949, Vol. 57, No. 2, pp. 119–131, DOI: 10.1086/625591.
22. Jones B., Grosse G., Arp C. et al., Modern Thermokarst Lake Dynamics in the Continuous Permafrost Zone, Northern Seward Peninsula, Alaska, *J. Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, Vol. 116, Article G00M03, DOI: 10.1029/2011jg001666.
23. Kondratyev K. Ya., Pozdnyakov D. V., Pettersson L. H., Water quality remote sensing in the visible spectrum, *Intern. J. Remote Sensing*, 1998, Vol. 19, No. 5, pp. 957–979, DOI: 10.1080/014311698215810.
24. Kratzer S., Kyriliuk D., Brockmann C., Inorganic suspended matter as an indicator of terrestrial influence in Baltic Sea coastal areas — Algorithm development and validation, and ecological relevance, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 237, Article 111609, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111609.
25. Morel A., Prieur L., Analysis of variations in ocean color, *Limnology and Oceanography*, 1977, Vol. 22, No. 4, pp. 709–722, DOI: 10.4319/lo.1977.22.4.0709.
26. Mueller J. L., Austin R. W., Ocean optics protocols for SeaWiFS validation, revision 1, *Oceanographic Literature Review*, Vol. 42, No. 9, p. 805.
27. Olthof I., Fraser R. H., Schmitt C., Landsat-based mapping of thermokarst lake dynamics on the Tuktoyaktuk Coastal Plain, Northwest Territories, Canada since 1985, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 168, pp. 194–204, DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.001.
28. Pestryakova L. A., Herzsuh U., Wetterich S., Ulrich M., Present-day variability and Holocene dynamics of permafrost-affected lakes in central Yakutia (Eastern Siberia) inferred from diatom records, *Quaternary Science Reviews*, 2012, Vol. 51, pp. 56–70, DOI: 10.1016/j.quascirev.2012.06.020.
29. Plug L. J., Walls C., Scott B. M., Tundra lake changes from 1978 to 2001 on the Tuktoyaktuk Peninsula, western Canadian Arctic, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, Issue 3, Article L03502, DOI: 10.1029/2007GL032303.
30. Ray R. G., *Aerial photographs in geologic interpretation and mapping, Report USGS Numbered Series*, U. S. Govt. Print. Off, 1960, 230 p., DOI: 10.3133/pp373.
31. Riordan B., Verbyla D., McGuire A. D., Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images, *J. Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, Article G04002, DOI: 10.1029/2005JG000150, 2006/2005JG000150.
32. Roy-Léveillé P., *Permafrost and thermokarst lake dynamics in the Old Crow Flats, northern Yukon, Canada: Doctoral Thesis*, Ottawa, Canada: Carleton University, 2014, 224 p., DOI: 10.13140/RG.2.1.1542.1527.
33. Schiller H., Doerffer R., Neural network for emulation of an inverse model — operational derivation of case II water properties from MERIS data, *Intern. J. Remote Sensing*, 1999, Vol. 20, No. 9, pp. 1735–1746.
34. Smith L. C., Sheng Y., MacDonald G. M., Hinzman L. D., Disappearing Arctic lakes, *Science*, 2005, Vol. 308(5727), Article 1429, DOI: 10.1126/science.1108142.
35. Xing Q., Lou M., Chen C., Shi P., Using in situ and Satellite Hyperspectral Data to Estimate the Surface Suspended Sediments Concentrations in the Pearl River Estuary, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, Vol. 6(2), pp. 731–738, DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2238659.