

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.464.7:551.343(528.85)

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(33-42)

ТЕРМОДЕНУДАЦИЯ НА ЯМАЛЕ – ИСТОЧНИК УВЕЛИЧЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ
РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ОЗЕРАХ

Ю.А. Дворников¹, М.О. Лейбман^{1,2}, Б. Хайм³, А.В. Хомутов^{1,2}, С. Рёсслер⁴, А.А. Губарьков⁵

¹ Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; ydvornikow@gmail.com

² Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия

³ Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера,
14473, Потсдам, Телеграфенберг А43, Германия

⁴ FIELAX, 27568, Бремерхафен, Шлейсенштрассе, 14, Германия

⁵ Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

Исследовано влияние термоденудации на концентрацию растворенного в озерной воде органического вещества. Обобщены результаты анализа проб воды на концентрацию окрашенного растворенного органического вещества, отобранных из озер Центрального Ямала. Проанализированы различия в концентрации окрашенного растворенного органического вещества в озерах, берег которых нарушен термоцирками, и озерах со стабильными ненарушенными берегами. В обнажениях термоцирков найдены залежи торфа с высоким содержанием растворенного органического углерода. Выявлено, что в среднем концентрация окрашенного растворенного органического вещества в озерах с термоцирками в 3.5–4.5 раза выше, чем в озерах без термоцирков.

Окрашенное растворенное органическое вещество, термоцирки, озера Ямала

THERMODENUDATION ON YAMAL PENINSULA AS A SOURCE
OF THE DISSOLVED ORGANIC MATTER INCREASE IN THAW LAKES

Yu.A. Dvornikov¹, M.O. Leibman^{1,2}, B. Heim³, A.V. Khomutov^{1,2}, S. Roessler⁴, A.A. Gubarkov⁵

¹ Earth Cryosphere Institute SB RAS, P/O box 1230, Tyumen, 625000, Russia; ydvornikow@gmail.com

² Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia

³ Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, 14473, Telegrafenberg A43, Potsdam, Germany

⁴ FIELAX, 27568, Schleusenstr. 14, Bremerhaven, Germany

⁵ Tyumen Industrial University, 38, Volodarskogo str., Tyumen, 625000, Russia

This paper is devoted to the study of thermodenudation impact on concentration of the organic matter dissolved in lake water. Summarized are results of the laboratory tests on concentration of colored dissolved organic matter in water samples collected out of the lakes in Central Yamal. Analyzed is the difference of colored dissolved organic matter concentration in lakes with the coasts affected by active thermodenudation and in lakes with undisturbed coasts. Buried peat layers discovered in the thermocirque exposures appeared to have high concentration of dissolved organic carbon. It is established that average concentration of colored dissolved organic matter is 3.5–4.5 times higher in lakes with thermocirques.

Colored dissolved organic matter, thermocirques, Yamal lakes

ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество в виде залежей торфа, накопившееся в эпоху голоценового оптимума и находящееся длительное время в мерзлом состоянии, может вновь войти в биохимический цикл [Vonk et al., 2013] вследствие климатических изменений в Арктике, наблюдаемых в последние десятилетия [IPCC, 2014]. Рост температуры пород [Romanovskiy et al., 2010] и увеличение глубины

сезонного протаивания [Zhang et al., 1997] могут привести к активизации криогенных процессов, на Центральном Ямале представленных криогенным оползанием и термоденудацией [Лейбман, Кизяков, 2007; Leibman et al., 2015]. Термоденудация связана с наличием пластовых льдов, залегающих близко к поверхности [Пармузин, Суходольский, 1982; Дубиков, 2002; Лейбман, Кизяков, 2007;

Криосфера..., 2013]. Образование термоцирков, связанное с вытаиванием залежеобразующего льда, предположительно приводит к изменению геохимического состояния озер, у берегов которых эти процессы развиваются [Kokelj et al., 2005]. Озера – это природные резервуары, в которых аккумулируется вещество, сносимое с окружающих их водосборных бассейнов. Поэтому они могут служить хорошим индикатором ландшафтных изменений в Арктике.

За период исследований на Центральном Ямале (стационар Васькины Дачи), начавшихся в 1987 г., приоритетным объектом изучения являлись криогенные оползни скольжения [Лейбман, Кизяков, 2007]. Термоцирки по берегам озер были крайне редки и незначительны по длине и площади. Наблюдалось лишь четыре термоцирка, два из которых исчезли из-за полной выработки залежи

пластового льда, а два оставшихся периодически затухали [Лейбман, 2005].

С весны 2012 г. до осени 2013 г. наблюдалась значительная активизация термоденудации на ключевом участке [Leibman et al., 2015] в связи с резким повышением летней температуры воздуха, сопровождавшимся заметным увеличением глубины сезонного слоя (СТС). По меньшей мере шесть термоцирков по берегам озер были документированы летом 2012 и 2013 гг. (рис. 1). Результатом образования термоцирков стало значительное увеличение объема поступившего со склонов в озерную воду материала. Этот материал, кроме минеральной составляющей, включает органическое вещество в растворенном и взвешенном состоянии.

Окрашенная фракция растворенного органического вещества (ОРОВ)* является значимым

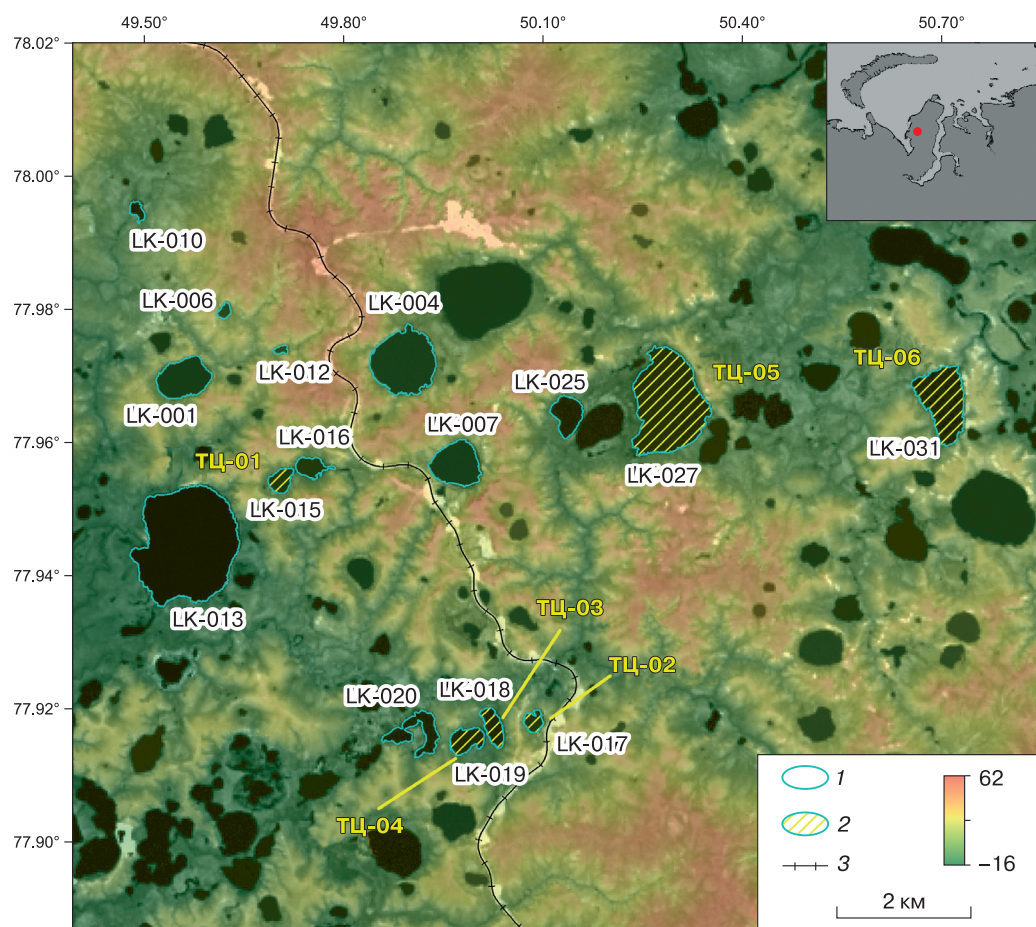


Рис. 1. Карта-схема фактического материала ключевого участка (стационар Васькины Дачи).

1 – обследованные озера; 2 – обследованные озера с термоцирками по берегам (ТЦ – индекс термоцирка, LK – индекс озера); 3 – железная дорога Обская–Бованенково. В качестве подложки использованы снимок Landsat 8 от 19.07.2014 (ближний инфракрасный канал) и ЦМР TanDEM-X (DLR©) с пространственным разрешением 12 м (высоты даны в метрах над ур. моря, система высот – Балтийская).

* В англоязычной литературе – colored dissolved organic matter (CDOM).

компонентом водных экосистем [Скопинцев, 1950; Kalle, 1939], в том числе термокарстовых озер высокоширотной Арктики [Vincent et al., 1998]. Составляет ОРОВ главным образом из гуминовых и фульвокислот [Скопинцев, 1950; Wetzel, 2001].

ОРОВ – составляющая часть растворенного органического углерода (РОУ)* – параметра, используемого при характеристике содержания органики в водных объектах. Поглощая в основном коротковолновое излучение (ультрафиолетовое и голубой участок видимого диапазона), ОРОВ оказывает влияние на степень проникновения солнечного света в глубинные слои водных объектов, а также на их температурный режим [Zaneveld, 1975; Vincent, Pienitz, 1996; Twardowski, Donaghay, 2001]. ОРОВ служит показателем “цветности” [Gjessing, 1976], а также оптически измеряемым показателем РОУ.

Растворенное органическое вещество (РОВ) в водоемах может быть автохтонным и аллохтонным [Kalle, 1966]. Автохтонное РОВ является продуктом жизнедеятельности фитопланктона, а аллохтонное РОВ поступает в водный объект из окружающего его водосборного бассейна. В северных высокоширотных озерах автохтонное РОВ не играет определяющей роли в формировании общей концентрации РОУ вследствие неблагоприятных климатических условий для обильного фитопланктона, в то время как аллохтонное РОВ может составлять основную часть в концентрации РОУ [Engstrom, 1987; Wetzel, 2001].

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Ключевой участок расположен на междуречье Сеяхи и Мордыахи (70°17' с.ш., 68°53' в.д., см. рис. 1). Заозеренность ключевого участка составляет 12 %, близка к средней по Ямалу (10 %) [Полуостров Ямал, 1975] и может достигать 20 % на поймах рек Сеяха и Мордыаха [Романенко, 1999]. На поймах этих рек находится также большее количество хасыреев по сравнению со слагающими водоразделы на ключевом участке V (Салехардской) и IV (Казанцевской) морскими равнинами. Площадь озер составляет от 0.14 до 346.6 га, среднее значение – 11.1 га.

Водосборные бассейны озер (область стока воды и сноса вещества в водоем) характеризуются различными фаціальными условиями. Литологический состав верхней толщи V (Салехардской), IV (Казанцевской) и III морских равнин – пески и глины, встречаются главным образом в зоне осушки озер. Растительный покров представлен осоковой растительностью, кустарниками и кустарничками, мхами [Ребристая, Хитун, 1998].

В стенках термоцирков, начавших активно формироваться в период наблюдений за РОВ в

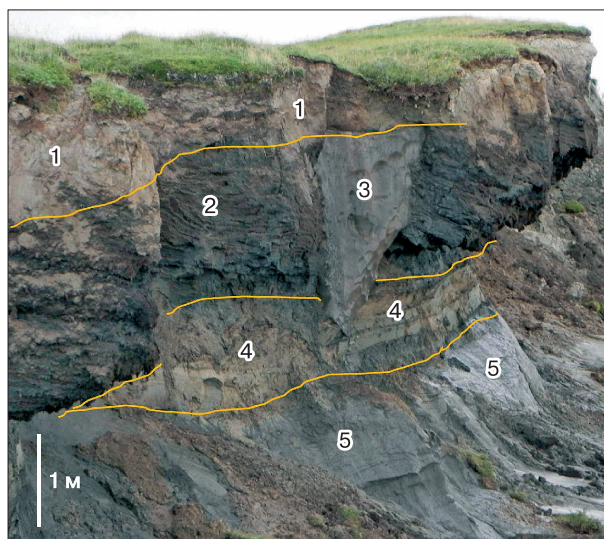


Рис. 2. Обнажение термоцирка ТЦ-01 и его криолитологическое строение:

1 – песчано-суглинистые склоновые отложения; 2 – торф; 3 – полигонально-жильный лед; 4 – переслаивание песков, суглинков и глин; 5 – пластовый лед. Фото М.О. Лейбман.

озерной воде, вскрываются мерзлые породы и подземные льды. Обнажения, обнаруженные в полевой сезон 2012–2015 гг., включают погребенные повторно-жильные льды (ПЖЛ), вклинивающиеся в пластовые льды (рис. 2). В обнажениях также вскрываются погребенные залежи торфа мощностью в несколько метров (см. рис. 2) и минеральные породы, насыщенные органическим веществом.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб воды производился в августе–сентябре 2014–2015 гг. во время экспедиций Института криосферы Земли СО РАН. Кроме того, осуществлялся мониторинг динамики образовавшихся термоцирков.

Отбор проб воды. Пробы воды для определения концентрации ОРОВ были собраны в спокойных погодных условиях из верхних 30 см водного столба, с берега или в центре озера с лодки. Образцы хранили в темных прохладных условиях (4–8 °С), чтобы избежать фотодеградациии органического вещества под действием ультрафиолета [Bricaud et al., 1981]. Образцы фильтровали непосредственно в поле с применением стекловолокнистых фильтров Whatman GF/F с размером пор 0.7 мкм.

В работе представлены результаты анализа 34 проб, отобранных из 17 озер в 2014 г. и повторно в 2015 г.

* В англоязычной литературе – dissolved organic carbon (DOC).

Анализ проб воды. Лабораторные определения концентрации ОРОВ в образцах воды проводились в Лаборатории им. Отто Шмидта в Санкт-Петербурге. Проведен спектрофотометрический анализ проб воды на двухлучевом спектрофотометре Spесord 200. Анализ проводили в диапазоне 200–750 нм (ультрафиолетовый и видимый участки электромагнитного спектра) с оптическим разрешением прибора 1 нм. В результате выполненных работ определены спектры поглощения в каждой пробе.

При анализе измеряется оптическая плотность $a(\lambda)$, приведенная к натуральному логарифму и длине кюветы [Davies-Colley, Vant, 1987], через которую проходит излучение:

$$a(\lambda)_{\text{ОРОВ}} = 2.303 \frac{-\lg(I/I_0)}{L}, \quad (1)$$

где I – зарегистрированная интенсивность света после прохождения сквозь кюветы; I_0 – исходная интенсивность света, сгенерированного лампой (определяется регулярными калибровочными измерениями); L – длина оптического пути излучения, равная длине используемой кюветы. В этом исследовании применялись кварцевые кюветы длиной 0.05 и 0.10 м. Погрешность измерения значений оптической плотности $\pm 0.002 \text{ м}^{-1}$.

Корректированные значения оптической плотности $a(\lambda)_{\text{ОРОВ}}$ получены вычитанием значения оптической плотности на участке 700 нм, где

оптическая плотность ОРОВ предполагается равной нулю [Davies-Colley, Vant, 1987; Twardowski et al., 2004], из значений величины оптической плотности полного спектра.

Оптическая плотность $a(\lambda)_{\text{ОРОВ}}$, измеряемая в м^{-1} , прямо пропорциональна концентрации ОРОВ в воде [Скопинцев, 1950].

При обработке спектров поглощения ОРОВ вычислялся второй параметр – $S(\lambda)$, нм^{-1} (наклон кривой оптической плотности ОРОВ), который определялся между длинами волн 350 и 500 нм. Параметр $S(\lambda)$ характеризует степень кривизны кривой оптической плотности ОРОВ и служит индикатором источника (автохтонного или аллохтонного) органического вещества [Davies-Colley, Vant, 1987; Carder et al., 1989; Blough, Green, 1995; Helms et al., 2008].

Значения оптической плотности уменьшаются экспоненциально с возрастанием длины волны [Jerlov, 1968]. С использованием значений $a(\lambda)_{\text{ОРОВ}}$ и $S(\lambda)$ можно восстановить спектр оптической плотности ОРОВ [Bricaud et al., 1981].

Мониторинг термоцирков. С 2012 по 2015 г. в полевых условиях проводился мониторинг образовавшихся термоденудационных форм – термоцирков (рис. 3, см. фотографию на обложке). Помимо описаний разрезов проводился также мониторинг отступления бровки при помощи GPS+ГЛОНАСС аппаратуры, а также с использованием космических снимков сверхвысоко-



Рис. 3. Фотографии термоцирка ТЦ-01.

a – сентябрь 2012 г.; b – август 2015 г. Фото А.В. Хомутова. Расположение термоцирка см. на рис. 1.

го пространственного разрешения GeoEye-1 (05.07.2013), GeoEye-1 (15.08.2009) и QuickBird (30.07.2010). Снимки получены от Digital Globe Foundation©. Используются следующие GPS-приемники: Garmin Dakota 20, Garmin 60, Garmin Etrex 30 (погрешность измерений в плане ±1 м) и Trimble 5700 (погрешность ±0.1 м). Приемник располагался непосредственно над измеряемой бровкой.

Мультиспектральные снимки с улучшенным пространственным разрешением были получены с применением алгоритма PANSHARP2, разработанного в программе PCI Geomatica 2014 (PCI Geomatics©) [Zhang, 2004]. Этот метод был успешно протестирован на снимках сверхвысокого пространственного разрешения [Du et al., 2007]. Процедура ортотрансформирования снимков произведена с использованием модуля OrthoEngine в программе PCI Geomatica 2014. В августе 2014 г. были определены точные координаты в плане семи опорных точек, включающих объекты железной дороги Обская–Бованенково, мосты, здания, с помощью дифференциального GPS-приемника Trimble 5700. Эти точки использованы совместно с 40 связующими точками для совмещения снимков друг с другом (значения среднеквадратического отклонения равны 0.46, 0.37, 0.57 для снимков GeoEye-1 2009, GeoEye-1 2013, QuickBird 2010 соответственно). Для ортотрансформирования снимков применялась цифровая модель рельефа (ЦМР) TanDEM-X IDEM с пространственным разрешением 12 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты анализа проб воды. Результаты анализа проб воды приведены в табл. 1. Измеренные значения оптической плотности на участке 440 нм ($a(440)_{\text{ОРОВ}}$) изменяются от 0.736 до 8 м⁻¹ и от 0.58 до 8 м⁻¹ для 2014 и 2015 гг. соответственно (см. табл. 1). Наименьшие значения принадлежат озерам LK-025 (2014 г.) и LK-008 (2015 г.), наибольшие – озеру LK-031 (см. рис. 1, табл. 1). В целом 2015 год характеризовался более низкими значениями концентрации ОРОВ в озерах (среднее 3.51 м⁻¹) по сравнению с 2014 г. (среднее 2.93 м⁻¹). Только для 4 озер из 17 (LK-006, LK-010, LK-012, LK-013) отмечено увеличение значений $a(440)_{\text{ОРОВ}}$. Наибольшие значения для этих лет наблюдаются в озерах, нарушенных термоцирками, за исключением LK-013 (единственного озера, расположенного на пойме р. Мордыаха), которое также характеризуется довольно высокими значениями $a(440)_{\text{ОРОВ}}$.

Измеренные значения $S(350-500)$ изменяются от 0.0117 до 0.0183 нм⁻¹ и от 0.0132 до 0.0186 нм⁻¹ для 2014 и 2015 гг. соответственно (см. табл. 1). Наименьшие значения принадлежат озе-

Таблица 1. Результаты анализа проб воды озер (LK) (см. рис. 1) и термоцирки (ТЦ)

Индекс озера	$a(440)_{\text{ОРОВ}}$, м ⁻¹		$S(350-500)$, нм ⁻¹		Индекс ТЦ
	2014 г.	2015 г.	2014 г.	2015 г.	
LK-001	0.818	0.640	0.016 54	0.016 76	–
LK-004	1.189	0.735	0.016 48	0.016 58	–
LK-006	2.359	2.531	0.018 17	0.017 50	–
LK-007	1.351	0.854	0.016 59	0.017 14	–
LK-008	3.820	0.580	0.014 07	0.018 58	–
LK-010	1.711	2.272	0.017 21	0.017 52	–
LK-012	2.300	2.588	0.018 05	0.018 30	–
LK-013	5.015	7.849	0.015 33	0.014 54	–
LK-015	6.338	4.940	0.013 55	0.014 58	ТЦ-01
LK-016	4.179	3.049	0.016 17	0.016 92	–
LK-017	4.640	1.797	0.013 21	0.015 25	ТЦ-02
LK-018	5.458	4.808	0.014 36	0.014 67	ТЦ-03
LK-019	7.651	6.330	0.013 33	0.014 58	ТЦ-04
LK-020	1.722	1.095	0.015 66	0.016 50	–
LK-025	0.736	0.713	0.018 33	0.017 53	–
LK-027	2.386	1.080	0.013 82	0.015 94	ТЦ-05
LK-031	8.000	8.000	0.011 74	0.013 21	ТЦ-06
<i>Среднее</i>	<i>3.5</i>	<i>2.9</i>	<i>0.0154</i>	<i>0.0162</i>	

Примечание. $a(440)_{\text{ОРОВ}}$ – оптическая плотность ОРОВ на участке 440 нм, $S(350-500)$ – значение наклона кривой оптической плотности на участке 350–500 нм.

ру LK-031, наибольшие – озерам LK-025 и LK-008 (см. рис. 1) для 2014 и 2015 гг. соответственно. В целом 2015 год характеризовался более высокими значениями $S(350-500)$ для озер (среднее 0.0154 нм⁻¹) по сравнению с 2014 г. (среднее 0.0162 нм⁻¹). Для 3 озер из 17 (LK-006, LK-013, LK-025) отмечено понижение значений $S(350-500)$. Наименьшие значения для двух лет наблюдаются в озерах, нарушенных термоцирками, за исключением озер LK-008 для 2014 г. и LK-013 для 2015 г. (см. рис. 1), тоже характеризующихся довольно низкими значениями $S(350-500)$.

Результаты мониторинга развития термоцирков. В табл. 2 приведены количественные

Таблица 2. Характеристика термоцирков (расположение см. на рис. 1)

Индекс ТЦ	Нарушенная площадь*, га	Среднее отступление бровки**, м/год	Класс объекта	Год образования
ТЦ-01	0.68	6.6	Природный	2012
ТЦ-02	0.81	4.1	Техногенный	Ранее 2010
ТЦ-03	0.53	8.7	Природный	2012
ТЦ-04	1.02	10.4	Природный	2012
ТЦ-05	–	7.6	Природный	2012
ТЦ-06	3.98	18.5	Природный	2012

* По состоянию на 2015 г.

** За 2012–2015 гг.

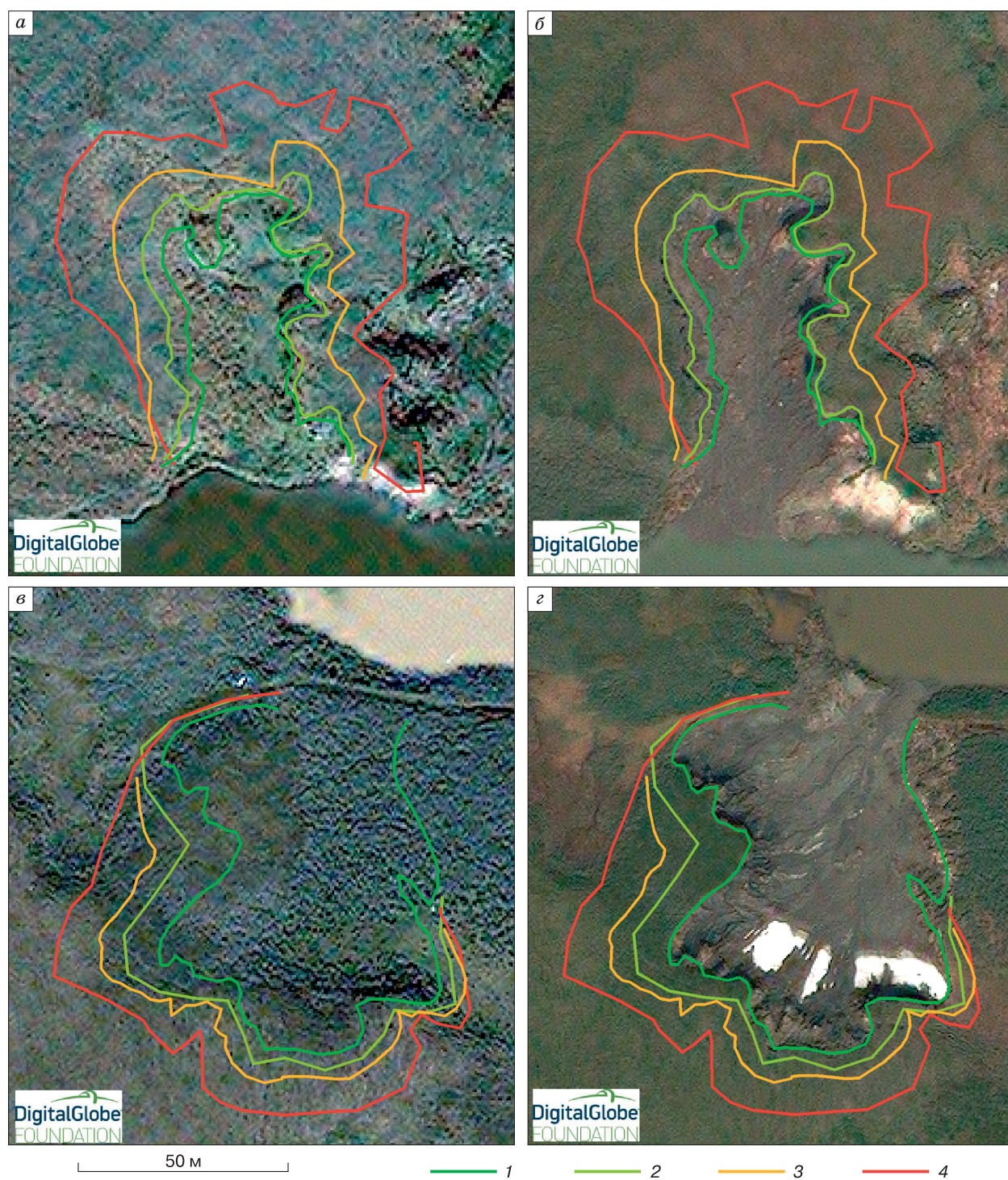


Рис. 4. Состояние берегов до образования термоцирков (а, в) и после (б, г).

а, в – снимок QuickBird от 30.07.2010 с разрешением 0.6 м; б, г – GeoEye-1 от 05.07.2013 с разрешением 0.5 м. Динамика термоцирков: а, б – ТЦ-01; в, г – ТЦ-04. Положение бровок термоцирков: 1 – 05.09.2012 (а, б), 05.07.2013 (в, г); 2 – 05.07.2013 (а, б), 27.08.2013 (в, г); 3 – 27.08.2013 (а, б), 27.08.2014 (в, г); 4 – 21.08.2015 (а, б), 26.08.2015 (в, г). Положение бровок определено с использованием: 1, 3 (а, б) – GPS-приемника Garmin 60; 1 (в, г), 2 (а, б) – снимка GeoEye-1 от 05.07.2013; 2 (в, г), 4 – GPS+ГЛОНАСС приемника Garmin Etrex 30; 3 (в, г) – DGPS-приемника Trimble GNSS 5700.

показатели развития термоденудационных форм (см. рис. 1). Отступление бровки термоцирков варьирует от 4.1 до 18.5 м/год (см. табл. 2, рис. 4). Ширина термоцирков достигает 200 м, а их площадь изменяется от 0.53 до 3.98 га (см. табл. 2, рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Параметры ОРОВ в озерах Ямала. Высокоширотные внутренние водоемы севернее границы леса характеризуются низкой концентрацией ОРОВ [Vincent et al., 1998], которая снижается по мере удаления к северу от зоны распространения лесов [Vincent, Pienitz, 1996]. Однако территория Центрального Ямала отмечается распространением высокоствольных (до 2 м) ивняков [Ребристая, Хитун, 1998; Украинцева, 1998; Лейбман, 2004], занимающих, как правило, понижения, вогнутые склоны и долины, защищенные от сильных ветров. Высокоствольные ивняки производят большее количество органического вещества при разложении по сравнению с обычными тундровыми растительными ассоциациями. Это органическое вещество служит источником аллохтонного ОРОВ в озерной воде наряду с ОРОВ и органическим веществом из СТС [Vonk et al., 2013]. Транспорт органического вещества из водосборных бассейнов может происходить при смыве с поверхности жидкими осадками, а также в результате интенсивного снеготаяния [Чистов, 1991], учитывая значительные снегозапасы на территории исследования [Дворников и др., 2015; Dvornikov et al., 2015]. В настоящей работе структура транспорта органического вещества детально не рассматривается, исследуется лишь связь между активизацией термоцирков и концентрацией ОРОВ в воде озер.

Сравниваются концентрации ОРОВ в озерах Центрального Ямала и в более южных водоемах. Поскольку в литературных источниках значения оптической плотности приведены для разных длин волн, они были приведены к 440 нм с использованием формулы [Bricaud et al., 1981]

$$a(440)_{\text{ОРОВ}} = a(\lambda_g)_{\text{ОРОВ}} \exp[-S(440 - \lambda_g)], \quad (2)$$

где $a(\lambda_g)_{\text{ОРОВ}}$ – значение оптической плотности для указанной длины волны λ_g из литературы; S – значение на участке 350–500 нм, принятое равным 0.015 nm^{-1} , измеренное для озерной и морской воды [Twardowski et al., 2004], а также измеренное в озерах Центрального Ямала (см. табл. 1).

Средняя измеренная оптическая плотность ОРОВ в озерах Центрального Ямала (см. табл. 1), равная $2.93\text{--}3.51 \text{ m}^{-1}$, сопоставима со значениями для озер южной Швеции и Финляндии ($4\text{--}5 \text{ m}^{-1}$) [Kutser et al., 2005] ввиду увеличения дополнительного транспорта аллохтонного ОРОВ в озера. Измеренные в июле 2008 и 2009 гг. средние значе-

ния $a(440)_{\text{ОРОВ}}$ в р. Колыме и других реках Восточной Сибири ($2.00 \pm 0.92 \text{ m}^{-1}$) [Griffin et al., 2011] находятся в тех же пределах, что и в озерах Центрального Ямала. Более высокие концентрации ОРОВ (главным образом аллохтонного) измерены Дж. Бретоном с коллегами в 15 мелких болотах Канадской Арктики (средние значения оптической плотности $6.76 \pm 5.04 \text{ m}^{-1}$), что объясняется поступлением вещества из окружающих водосборных бассейнов [Breton et al., 2009]. Авторами также измерена оптическая плотность в 10 небольших водоемах (площадь менее 1000 m^2), аналогичных по размеру описанным в [Breton et al., 2009]. Эти значения также выше, чем в среднем в озерах ($4.6 \pm 4.5 \text{ m}^{-1}$).

Транспорт аллохтонного ОРОВ приводит к уменьшению значений S [Laurion et al., 1997]. Среди озер, расположенных в Канадской Арктике, измеренные значения S были приблизительно в том же диапазоне ($0.0135\text{--}0.0186 \text{ nm}^{-1}$ при среднем 0.0158 nm^{-1}), что и в озерах Центрального Ямала (см. табл. 1).

Связь концентрации ОРОВ и параметра S активизацией термоцирков в береговой зоне озер. Ранее для термокарстовых озер, расположенных в дельте р. Маккензи, было показано, что озера с термоденудационными берегами в среднем имеют меньшую концентрацию РОУ и вода в таких озерах более прозрачная [Kokelj et al., 2005]. В [Thompson et al., 2008; Kokelj et al., 2009] это явление связывают с седиментацией органического вещества на тонкодисперсных глинистых частицах и их совместным осаждением. Авторы этих работ поясняют, что в момент отбора проб воды термоцирки были неактивны и активного выноса взвешенных веществ не происходило [Kokelj et al., 2009]. Термоцирки, наблюдаемые нами в полевых условиях, активизировались преимущественно в 2012 г. [Leibman et al., 2015], т. е. являются относительно свежими. До 2015 г. они продолжали активно развиваться [Khomutov et al., 2016].

В разрезах образовавшихся термоцирков были обнаружены залежи торфа с характерным запахом, которые служат дополнительным источником аллохтонного органического вещества (см. рис. 2). Измеренная концентрация РОУ в водной вытяжке, отфильтрованной из торфа, составила 243 mg/l , что в 50 раз превышает значение этого параметра для арктических озер, включая озера Центрального Ямала. Авторы считают, что захороненные многолетнемерзлые торфяники при образовании термоцирков способствуют транспорту большого количества органического вещества в озеро.

Анализ полевых данных за 2014 и 2015 гг. отдельно для озер без термоцирков и озер с термоцирками показал, что медиана значений оптиче-

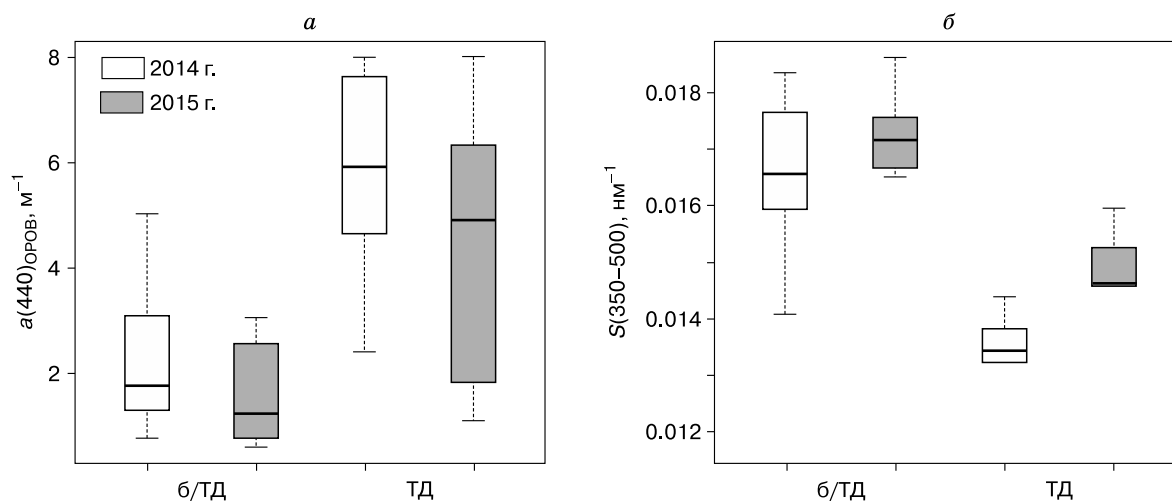


Рис. 5. Различия в оптической плотности $a(440)_{\text{ОРОВ}}$ (а) и параметре $S(350-500)$ (б) в озерах без активной термоденудации по берегам (б/ТД) и с активными термоцирками (ТД).

ской плотности ОРОВ на 440 нм у озер с термоцирками в 3.5 раза (2014 г.) и 4.4 раза (2015 г.) выше, чем у озер без термоцирков (рис. 5, а). Это означает, что процесс термоденудации по берегам озер на ранней стадии может значительно повысить концентрацию ОРОВ.

Полученные данные подтверждают, что озера с термоцирками обладают более низкими значениями S (0.0134 и 0.0146 nm^{-1} для 2014 и 2015 гг. соответственно) по сравнению с озерами без термоцирков (0.0165 и 0.0171 nm^{-1} для 2014 и 2015 гг.) (см. рис. 5, б).

Используя атмосферно-скорректированные снимки GeoEye-1 за 2009 и 2013 гг. и алгоритм дистанционной оценки параметра $a(440)_{\text{ОРОВ}}$ [Kutser et al., 2005; Dvornikov et al., 2014, 2016], авторы смогли детально оценить изменение концентрации ОРОВ в озерах в 2013 г., когда появились активные термоцирки, не существовавшие на момент съемки 2009 г. В табл. 3 приведены результаты определения оптической плотности ОРОВ на 440 нм за 2009 и 2013 гг. Покрытие снимков по-

зволило проанализировать только четыре озера. Прирост концентрации ОРОВ в 2013 г. по сравнению с 2009 г. составил от 312 до 590 % (см. табл. 3), т. е. в 4–7 раз.

ВЫВОДЫ

В статье проанализированы количественные характеристики развития термоденудационных форм (термоцирков), образовавшихся в летний период 2012 г., и связанные с ними различия в концентрации ОРОВ и параметра S для озер со стабильными берегами и берегами, нарушенными процессами термоденудации, с использованием полевых, лабораторных и дистанционных методов исследования.

1. Отступление бровки термоцирков идет со скоростью от 4.1 до 18.5 м/год, ширина термоцирков достигает 200 м, площадь, пораженная процессом, составляет 0.53–3.98 га.

2. В стенках термоцирков обнаружены крупные залежи торфяников. Концентрация растворенного органического углерода в водной вытяжке из торфяника равна 243 мг/л. При этом средняя концентрация растворенного органического углерода в озерах Ямала равна 4–5 мг/л.

3. В озерах с термоцирками концентрация окрашенного растворенного органического вещества значительно выше, чем в озерах со стабильными берегами. Для озер с термоцирками по берегам средние значения $a(440)_{\text{ОРОВ}}$ составляют 5.9 и 4.9 m^{-1} за 2014 и 2015 гг. соответственно. Для озер со стабильными берегами эти значения в 3.5 и 4.4 раза меньше (1.7 и 1.1 m^{-1} за 2014 и 2015 гг.).

4. Органическое вещество, поступившее из термоцирков, по своим свойствам отличается от аллохтонного органического вещества из водо-

Таблица 3. Увеличение концентрации ОРОВ в четырех озерах, вызванное активностью термоцирков в береговой зоне

Индекс озера	$a(440)_{\text{ОРОВ}}, \text{m}^{-1}$		Прирост, %
	2009 г.	2013 г.	
LK-015	1.277	5.265	312
LK-027	0.528	2.664	404
LK-178*	2.329	9.371	302
LK-298**	1.078	7.444	590

* Расположено в 5.7 км к север-северо-востоку от озера LK-004.

** Расположено в 0.5 км к северу от озера LK-025.

сборных бассейнов. Результаты расчетов параметра $S(350-500)$ для проб 2014 и 2015 гг. показали, что медианы значений для озер с нарушенными берегами составляют 0.0134 и 0.0146 нм^{-1} соответственно, в то время как для озер со стабильными берегами они равны 0.0165 и 0.0171 нм^{-1} .

5. Существенное увеличение (до 7 раз) концентрации окрашенного растворенного органического вещества в озерах может произойти после образования термоцирков по берегам. Дополнительный анализ на основе данных дистанционного зондирования сверхвысокого пространственного разрешения позволил получить за 2009 г. значения $a(440)_{\text{ОРОВ}}$ для четырех озер, берега которых оставались стабильными до 2012 г., а также за 2013 г., когда их берега уже были нарушены термоцирками. Значения $a(440)_{\text{ОРОВ}}$ с 2009 по 2013 г. увеличились в среднем в 5.1 раза (от 4.1 до 6.9 раза).

Показано, что активизация процессов термоденудации на п-ове Ямал приводит к мобилизации древнего органического вещества торфяников, находившегося длительное время в мерзлом состоянии, и выносу его в озера.

Авторы благодарны сотрудникам Лаборатории им. Отто Шмидта (г. Санкт-Петербург) Т.В. Скороспеховой, Е.Д. Добротиной, И.В. Федоровой, Н.К. Шумской, А.А. Четверовой за помощь в проведении лабораторных работ; сотруднику МГУ им. М.В. Ломоносова А.К. Ильясову за предоставление геодезического оборудования, сотрудникам Университета Аляски (г. Фэрбенкс) и компании Digital Globe Foundation за предоставленные данные дистанционного зондирования. Авторы выражают благодарность Германской службе академических обменов (DAAD) и Школе полярных и морских исследований им. Гельмгольца (POLMAR) за оказание финансовой поддержки.

Работа выполнена в рамках проектов “Циркумполярный мониторинг деятельного слоя” (CALM), ОНЗ-12 “Процессы в атмосфере и криосфере как фактор изменений природной среды”, при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-05-91001-АНФ_а), РНФ (грант 16-17-10203) и ВМБФ (грант OSL-15-04), а также при поддержке гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ РФ (НШ-9880-2016.5). Экспедиции организованы при участии НП “МЭЦ “Арктика”.

Литература

Дворников Ю.А., Хомутов А.В., Муллануров Д.Р., Ермохина К.А. Моделирование распределения водного эквивалента снежного покрова в тундре с использованием ГИС и данных полевой снегомерной съемки // *Лед и снег*, 2015, т. 55, № 2, с. 69–80, DOI: 10.15356/2076-6734-2015-2-69-80.
Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири / Г.И. Дубиков. М., ГЕОС, 2002, 246 с.

Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал / Под ред. Ю.Б. Баду, Н.А. Гафарова, Е.Е. Подборного. М., ООО “Газпром Экспо”, 2013, 424 с.

Лейбман М.О. Механизмы формирования криогенных оползней скольжения и условия их индикации по высококорослой иве на Центральном Ямале // *Материалы Московского центра РГО. Биогеография*. М., РАСХН, 2004, вып. 12, с. 89–94.

Лейбман М.О. Криогенные склоновые процессы и их геоэкологические последствия в условиях распространения ледяных льдов: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Тюмень, 2005, 262 с.

Лейбман М.О. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова / М.О. Лейбман, А.И. Кизяков. М., Тип. Россельхозакадемии, 2007, 206 с.

Пармузин С.Ю., Суходольский С.Е. Пластовые льды Среднего Ямала и их роль в формировании рельефа // *Пластовые льды криолитозоны*. Якутск, ИМ СО АН СССР, 1982, с. 51–61.

Полуостров Ямал / Под ред. В.Т. Трофимова. М., МГУ, 1975, 278 с.

Рибристая О.В., Хитун О.В. Ботанико-географические особенности флоры Центрального Ямала // *Бот. журн.*, 1998, т. 83, № 7, с. 37–52.

Романенко Ф.А. Динамика озерных котловин на центральном Ямале // *Эрозионные процессы центрального Ямала*. СПб., Изд-во Гомел. ЦНТДИ, 1999, 350 с.

Скопинцев Б.А. Органическое вещество в природных водах (водный гумус) // *Тр. ГОИН*, 1950, т. 17, № 29, 290 с.

Украинцева Н.Г. Особенности распространения кустарниковых тундр на Ямале // *Материалы Московского центра РГО. Биогеография*. М., РАСХН, 1998, вып. 7, с. 46–53.

Чистов С.В. Принципы определения природоохранных мероприятий для ландшафтов западно-сибирской Арктики и Субарктики в условиях хозяйственного освоения // *Проблемы экологии полярных областей*. Сер. Соврем. пробл. биосферы. М., Наука, 1991, с. 29–35.

Blough N.V., Green S.A. Spectroscopic characterization and remote sensing of non-living organic matter // *The Dahlem Workshop on the Role of Nonliving Organic Matter in the Earth's Carbon Cycle* / R.G. Zepp, C. Sonntag (eds.). Berlin, New York, Wiley, 1995, p. 23–45.

Breton J., Valliere C., Laurion I. Limnological properties of permafrost thaw ponds in northeastern Canada // *Can J. Fish Aquat. Sci.*, 2009, No. 66, p. 1635–1648, DOI: 10.1139/f09-108.

Bricaud A., Morel A., Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains // *Limnol. Oceanogr.*, 1981, No. 26, p. 43–53.

Carder K.L., Steward R.G., Harvey G.R., Ortner P.B. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll // *Limnol. Oceanogr.*, 1989, No. 34, p. 68–81.

Davies-Colley R.J., Vant W.N. Absorption of light by yellow substance in freshwater lakes // *Limnol. Oceanogr.*, 1987, No. 32, p. 416–425.

Du Q., Younan N.H., King R., Shah V. On the performance evaluation of pan-sharpening techniques // *IEEE Geosci. and Remote Sensing Lett.*, 2007, No. 4 (4), p. 518–522.

Dvornikov Yu., Bartsch A., Khomutov A. et al. Process of organic transport in lakes of the Yamal region (POLYAR) // *Proc. of Arctic Change* (Ottawa, Canada, 8–12 December, 2014): Oral Presentation Abstr. Ottawa, 2014, p. 56.

Dvornikov Y.A., Khomutov A.V., Mullanurov D.R. et al. GIS and field data-based modelling of snow water equivalent in shrub tundra // *Fennia*, 2015, No. 193 (1), p. 53–65.

- Dvornikov Y., Leibman M., Heim B. et al.** Geodatabase and WebGIS project for long-term permafrost monitoring at the Vaskiny Dachi research station, Yamal, Russia // *Polarforschung*, 2016, vol. 85 (2), p. 107–115.
- Engstrom D.R.** Influence of vegetation and hydrology on the humus budgets of Labrador lakes // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1987, No. 44, p. 1306–1314.
- Gjessing E.T.** Physical and chemical characteristics of aquatic humus / E.T. Gjessing. Michigan, USA, *Annales Arbor Science Publ.*, 1976, 120 p.
- Griffin C.G., Frey K.E., Rogan J., Holmes R.M.** Spatial and interannual variability of dissolved organic matter in the Kolya River, East Siberia, observed using satellite imagery // *J. Geophys. Res.*, 2011, No. 16, G03018, DOI: 10.1029/2010JG001634.
- Helms J.R., Stubbins A., Ritchie J.D., Minor E.C.** Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, sources, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter // *Limnol. Oceanogr.*, 2008, vol. 53, p. 955–969.
- IPCC 2014.** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). Geneva, Switzerland, IPCC, 151 p.
- Jerlov N.G.** Optical oceanography. Amsterdam, Elsevier, 1968, 194 p.
- Kalle K.** Color of the sea // *Proc. of the Intern. Council for the Exploration of the Sea / P.V. Rappet (ed.)*. 1939, No. 109, p. 98–105. (in German).
- Kalle K.** The problem of gelbstoff in the sea // *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.*, 1966, No. 4, p. 91–104.
- Khomutov A.V., Dvornikov Yu.A., Gubarkov A.A., Mullanurov D.R.** Activation of thermal denudation under recent climatic fluctuations, Central Yamal, Russia // *Geophys. Res. Abstr. EGU General Assembly*, 2016, EGU2016-311, (<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-311-1.pdf>).
- Kokelj S.V., Jenkins R.E.L., Milburn D. et al.** The influence of thawing permafrost on the water quality of small lakes across the forest-tundra transition, Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2005, No. 16, p. 343–353.
- Kokelj S.V., Zajdlík B., Thompson M.S.** The impacts of thawing permafrost on the chemistry of lakes across the subarctic boreal-tundra transition, Mackenzie Delta region, Canada // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2009, No. 20, p. 185–199, DOI: 10.1002/ppp. 641.
- Kutser T., Pierson D., Kallio K. et al.** Mapping lake CDOM by satellite remote sensing // *Remote Sensing of Environ.*, 2005, vol. 94 (4), p. 534–540.
- Laurion I., Vincent W.F., Lean D.R.S.** Underwater ultraviolet radiation: development of spectral models for northern high latitude lakes // *Photochem. Photobiol.*, 1997, No. 65, p. 107–114.
- Leibman M.O., Khomutov A.V., Gubarkov A.A. et al.** The research station “Vaskiny Dachi”, Central Yamal, West Siberia, Russia – A review of 25 years of permafrost studies // *Fennia*, 2015, No. 193 (1), p. 3–30.
- Romanovsky V., Smith S., Christiansen H.** Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007–2009: a synthesis // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, No. 21, p. 106–116.
- Thompson M.S., Kokelj S.V., Wrona F.J., Prowse T.D.** The impact of sediments derived from thawing permafrost on tundra lake water chemistry: An experimental approach // *Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Permafrost / D.L. Kane, K.M. Hinkel (eds.)*, Fairbanks Alaska, Inst. of Northern Eng., Univ. of Alaska Fairbanks, 2008, vol. 2, p. 1763–1768.
- Twardowski M.S., Boss E., Sullivan J.M., Donaghay P.L.** Modeling the spectral shape of absorbing chromophoric dissolved organic matter // *Mar. Chem.*, 2004, vol. 89, p. 69–88.
- Twardowski M.S., Donaghay P.L.** Separating in situ and terrigenous sources of absorption by dissolved material in coastal waters // *J. Geophys. Res.*, 2001, No. 106, p. 2545–2560.
- Vincent W.F., Laurion I., Pienitz R.** Arctic and Antarctic lakes as optical indicators of global change // *Ann. Glaciol.*, 1998, vol. 27, p. 691–696.
- Vincent W.F., Pienitz R.** Sensitivity of high-latitude freshwater ecosystems to global change: Temperature and solar ultraviolet radiation // *Geoscience Canada*, 1996, vol. 23, p. 231–236.
- Vonk J.E., Mann P.J., Davydov S. et al.** High biolability of ancient permafrost carbon upon thaw // *Geophys. Res. Lett.*, 2013, No. 40, p. 2689–2693, DOI: 10.1002/grl.50348.
- Wetzel R.G.** *Limnology: Lake and River Ecosystems*. San Diego, USA, Academic Press, 2001, p. 731–759.
- Zaneveld J.R.V.** Penetration of ultraviolet radiation into natural waters // *Impacts of Climatic Change on the Biosphere*. Dept. of Transportation Climatic Assessment Program, Monogr., 1975, No. 5, p. 2-108–2-166.
- Zhang T., Osterkamp T.E., Starnes K.** Effects of climate on the active layer and permafrost on the North Slope of Alaska, U.S.A // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1997, No. 8 (1), p. 45–67.
- Zhang Y.** Highlight article: understanding image fusion // *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 2004, No. 70 (6), p. 657–661.

Поступила в редакцию
2 мая 2016 г.