

Structural-functional features of landscapes with active thermocarst in the northern taiga of Western Siberia

A.G. Lim, S.V. Loiko, I.V. Kritckov, D. M. Kyzmina

Tomsk State University

Lenin prospect, 36, Tomsk, 634050, Russia

E-mail: lim_artiom@mail.ru

Submitted: 24.10.2017. Accepted: 08.12.2017

In the article, the main results of the study of dissolved greenhouse gases (CO₂, CH₄), dissolved organic carbon (DOC) and colloidal trace elements-metals in surface and soil waters of hollows, depressions, permafrost subsidences are considered. These waters were sampled in areas with active and stable permafrost thawing in Western Siberia. It is found that these zones of active termokarst are mainly located on the slopes and the bottoms of the upper reaches of rivers, which drain the interfluvium. Active thawing of flat mound bogs leads to the appearance of numerous hollows, depressions and thermokarst subsidences, especially on the border between forest and fens. This is related to the additional heat input from the flowing water and causing the thawing deep permafrost on the edges of ridges occupied by the forest. Increase in specific conductivity (S.C.) in the smallest water bodies and supra-permafrost water is accompanied by a significant increase in concentrations of DOC, P, K, Cu, Zn, Mo and Ba. It has been found that small hollows and subsidence (< 10 – 100 m²) are characterized by much higher concentrations of DOC and CO₂ (p < 0.05) in comparison with large depressions and thermokarst water bodies. There is also a decrease of CH₄ concentration with an increase in the size of water bodies (p < 0.05), despite the fact that the data dispersion reaches 3 orders in small (<100 – 300 m²) water bodies of the where located zones active termokarst landscape, concentrations of DOC, CO₂ and CH₄ are significantly higher (p < 0.05) than in the previously studied water bodies formed under conditions of a stable state of permafrost in areas of Nojabrsk and Khanymey. Waters of the active thawed of permafrost peat landscapes are usually rich in oxygen (saturation in the range of 30 ≤ O₂ ≤ 105 %) and approximately 0.5 unit's pH more acidic than areas with a stable state of permafrost. Many major and trace elements show a statistically significant decrease in concentration from very small water bodies (< 10 m²) to larger thermokarst waters. By the results of carried out research we can say that in the landscapes with active termokarst there will be direct mobilization of soil water in the hydrological network (rivers and lakes) with a minimal transformation of the water composition within the catchment area.

Key words: Western Siberia; permafrost; permafrost thaw; carbon; soils; greenhouse gases; dissolved organic carbon

Структурно-функциональные особенности ландшафтов с активным термокарстом в северной тайге Западной Сибири

А.Г. Лим, С.В. Лойко, И.В. Крицков, Д.М. Кузьмина

Томский государственный университет

Ленина проспект, 36, Томск, 634050, Россия

E-mail: lim_artiom@mail.ru

В статье рассмотрено латеральное распределение парниковых газов (CO₂, CH₄), растворенного органического углерода (РОУ), растворенных и коллоидных форм металлов в водах северотаежных ландшафтов Западной Сибири с активными термокарстовыми процессами (водный континуум от болотных вод до озер). Рассматриваемые ландшафты приурочены к склонам и днищам долин, и широких долинообразных понижений верховьев рек, дренирующих междуречья. Происходящее потепление вызывает наиболее заметное оттаивание бугристых, а местами и полигональных болот в этих понижениях, что связано с аккумуляцией появившихся дополнительных количеств

тепловой энергии, переносимой водами в эти понижения со всего водосбора. Это вызывает активизацию процессов термокарста и пучения, протаивание многолетней мерзлоты по краям грив, занятых лесом, приводит к появлению новых термокарстовых просянок, вызывает спуск термокарстовых озёр и расширение ложбин. Полученные гидрохимические данные сравнивали с ранее изученными заболоченными междуречными северотаежными ландшафтами, где термокарстовые процессы инертны. Установлено, что для малых мочажин и просянок (<10–100 м²) характерны значительно более высокие концентрации РОУ и СО₂, по сравнению с большими депрессиями и термокарстовыми озерами. Отмечено уменьшение концентрации СН₄ с увеличением размера водоема. В маленьких (<100–300 м²) водоемах рассматриваемых ландшафтов концентрации РОУ, СО₂ и СН₄ значительно выше, чем в аналогичных водоёмах территорий с устойчивым состоянием многолетней мерзлоты. Концентрации многих макро- и микроэлементов статистически значимо уменьшаются от очень маленьких водоёмов (<10 м²) к более крупным термокарстовым озёрам. Их концентрации выше в ландшафтах с активными термокарстовыми процессами, по сравнению с инертным фоном. Благодаря большим уклонам почвенные воды мерзлых болот склонов и днищ широких ложбин испытывают меньшую трансформацию на пути в открытые водоёмы, по сравнению с инертными междуречьями.

Ключевые слова: мерзлые плоскобугристые болота; Западная Сибирь; углерод; почвы

Введение

Согласно многим прогнозам к концу 21-го века ожидается повышение среднегодовой температуры на 4–7°C и увеличение количества зимних осадков (Friedlingstein et al., 2006; Christensen et al., 2007; Romanovsky et al., 2010; Smith et al., 2010). Интенсивность потепления будет нарастать к высоким широтам, где широко распространены мёрзлые торфяные почвы. Таяние мерзлых торфов в зоне многолетнемерзлых пород может привести к существенной модификации условий окружающей среды, как на локальном уровне (термокарст, технические ущербы), так и в глобальном масштабе (режимы парниковых газов, гидрохимические режимы крупных рек Ледовитого бассейна).

Наши исследования проводились в северной тайге Западной Сибири, в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. По логике развития потепления именно в этой природной зоне на первых этапах потепления будут наиболее явные изменения. Приповерхностная многолетняя мерзлота в центральной части северотаежной подзоны приурочена к болотным массивам. По активности термокарстовых явлений их можно разделить на две группы ландшафтов: (1) инертные, распространенные на плоских междуречьях, изменений геокриологических условий, регистрируемых с помощью космических снимков (40–50 лет), практически нет; (2) активное таяние мерзлоты – придолинные ландшафты с активно протекающими термокарстовыми процессами (заметны по космоснимкам), приурочены к склонам и днищам широких долинообразных понижений верховьев рек, эрозионной сети с одним тальвегом. Зоны активного таяния первыми активно изменяются при потеплении климата. К заторфованным долинообразным понижениям, согласно Chikharev V. A. (Chikharev, 2012), приурочены бугристые болота в комплексе с минеральными буграми пучения, а местами и полигональные болота на склонах. Активизация в них термокарста связана с аккумуляцией в этих понижениях, появившихся в результате потепления дополнительных количеств тепловой энергии, переносимой водами со всего водосбора.

В связи с вышесказанным нами были проведены исследования, призванные пролить свет на вопрос о том, как изменится гидрохимия водного континуума заболоченных мерзлотных ландшафтов при потеплении климата. Для этого провели изучение растворенных в воде парниковых газов (СО₂, СН₄), органического углерода (РОУ) и коллоидных форм химических элементов в водном континууме от болотных вод до озер (верховодки и микроводоемы (мочажины, просянки) мерзлых болот, озера) в пределах ландшафта с активным термокарстом. Полученные результаты сравнивались с аналогичными водными объектами инертных ландшафтов, изученных ранее.

Объекты и методы исследований

Район исследований расположен в северной тайге в пределах междуречья рек Танлова и Пурпе, являющегося составной частью Надым-Пякупурского междуречья. Эту территорию будем также обозначать как ключевой участок «Северо-Комсомольское». Обширная водосборная ложбина, в которой и расположены наши изученные точки, приурочена к верховьям реки Пуритей. На рисунке 1 показан общий ландшафтный контекст района исследований, показаны следующие микроландшафты. 1 – сосняк с кустарничками и лишайниками на криометаморфических почвах без многолетней мерзлоты в пределах 2-х метров. 2 – ложбина с тальми топями (3) и мерзлыми бугристыми болотами в центральной плоской части (4). 3 – топь между лесом и мерзлым бугристым болотом. 4 – мерзлые бугристые болота, представляющими собой комплекс бугров и мочажин. На буграх – Dystric Hemic Histosols (Gelic) (названия почв даны по WRB 2014), в мочажинах – Fibric Histosols Dystric. 5 – молодая гарь на мерзлом плоскобугристом болоте. 6 – склоновая торфяно-минеральная топь сочетанием Gleyic Albic Podzols (Turbic), Histic Albic Gleyic Podzols (Turbic) и Histic Cryosols (Albic). 7 – полигональное болото с просевшими деградированными полигонами. Почвы – Dystric Hemic Histosol (Gelic) на полигонах и Histic Dystric Histosols в трещинах. 8 – отрицательные формы болотного микрорельефа в пределах массива бугристых болот (мочажины, депрессии и просянки), преобладающими почвами являются Dystric Hemic Histosol (Gelic). 9 – мочажины, депрессии и просянки многолетнемерзлых болот в пределах торфяно-минеральной склоновой топи. Почвы – Gleyic Albic Podzols.

Ненарушенные лесотундровые ландшафты Пур-Надымского междуречья состоят из двух фоновых, широко распространенных экосистем. Плоские междуречные равнины – заняты плоскобугристыми болотами с мощностью торфа от 0,5 до 1,5 м, залегающего поверх слоистых песчано-суглинистых отложений (рис. 1, зона 14). На этих болотах встречаются Hemic Cryic Histosols на буграх и Fibric Histosols в мочажинах.

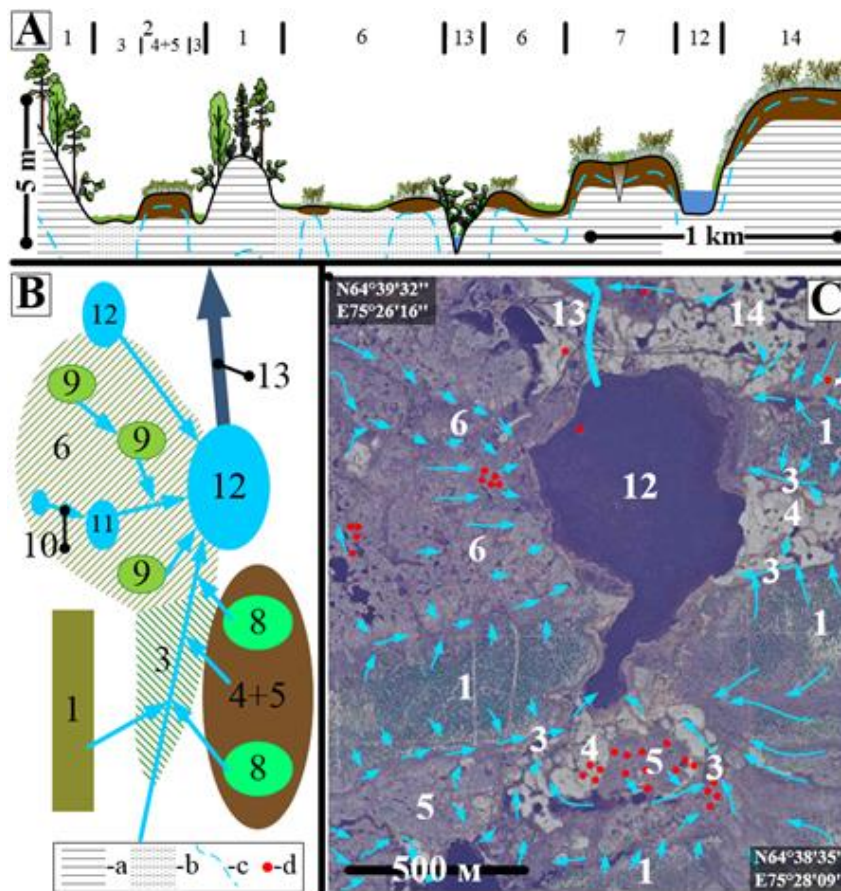


Рис. 1. Карта-схема района исследованной зон активного таяния ландшафта и схематические пути течения вод от водораздела до ручья.

А – Схематический профиль через изученный ландшафт. В – Схема гидрологической сопряженности рассматриваемых ландшафтов. С – Спутниковый снимок (WorldView-2 снимок 06.06.2012). а – преимущественно суглинистые отложения; b – переслаивающиеся суглинистые и песчаные отложения; с – уровень многолетней мерзлоты; d – места отбора проб. Расшифровка подписей в тексте. 10 – Временные водотоки соединяющие водоёмы (озера, микроозерки) и депрессии. 11 – Термокарстовые водоемы и термокарстовые озера. 12 – Крупное озеро Пуритеймалто. 13 – Зона затопления реки Пуритей (водосбор ≈ 6,63 км²). 14 – Плоскобугристые болота междуречья.

На гривах и дренированных склонах вдоль крупных рек (например, Пурпе) распространены сосновые, реже лиственнично-сосновые леса кустарничково-лишайниковые леса на немерзлотных почвах, диагностированных как Stagnic Cambisols (рис. 1, зона 1).

В качестве «инертной» территории сравнения использованы данные с фоновыми геокриологическими условиями, где многолетнемерзлые породы и микрорельеф в течение последних десятилетий практически не изменился (ключевой участок «Ханымей», в 90 км к югу от района исследований). Территория «Ханымей» подобна зоне 14 на рис. 1.

Среди рассмотренных ландшафтов выбирали болотные и отбирали в них воды. Отобранные образцы вод непосредственно в полевых условиях пропускались через фильтры диаметром 0,45 мкм (Merk Millipor) и консервировались для последующих лабораторно-аналитических исследований. При определении химических и физико-химических показателей использовались следующие методы: pH – потенциометрический; удельная электропроводность – кондуктометрический; содержание растворенного органического (POУ) и неорганического (НРОУ) углерода – каталитическое окисление (TOC-VCSN, SHIMADZU, Япония); определение растворенных в воде газов CO₂ и CH₄ проведено хроматографическим методом (Bruker 456 GC); SO₄²⁻, Cl⁻ – ионная хроматография (DIONEX ICS-2000); Na, Mg, Ca, K, Fe, Al – с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, Agilent 7500 CE, США).

Результаты и их обсуждение

Рассматриваемые в данной работе зоны активного таяния мерзлоты приурочены к склонам и днищам верховьев рек, дренирующих междуречье. В нижних частях долин и впадающих в них ложбинах распространены плоскобугристые торфяники (рис. 1, зоны 4, 5) в комплексе с буграми пучения, окаймлённые минеральными топями (рис. 1, зона 3). Фоновыми почвами плоских бугров являются Hemic Dystric Histosols (Gelic) с мерзлотой в пределах 0,5 м, сменяющиеся

в просадках и мелких мочажинах (рис. 1, зона 8) Hemic Dystric Histosols с уровнем залегания мерзлоты >1–1,5 м. Крупные мочажины заняты Fibric Histosols. В минеральных топях ложбин (рис. 1, зона 3), зажатых между лесом на гривах и пальзами, распространено два почвенных комплекса. К песчаным породам приурочен комплекс Gleyic Podzols (Arenic, Turbic) и Gleyic Histic Podzols (Arenic, Turbic), а к суглинистым Dystric Histic Gleysols (Turbic) и Dystric Gleysols (Turbic). Минеральные бугры пучения заняты Gleyic Histic Albic Podzol (Arenic, Siltic, Turbic). На склонах долин распространены минеральные топи (рис. 1, зона 6), трансформируемые процессами пучения, в результате чего формируются мелкобугорковатая поверхность, в пределах которой разбросаны многочисленные просадки (рис. 1, зона 9) и небольшие водоёмы (<50 м²) (рис. 1, зона 11), а также термокарстовые озёра (рис. 1, зона 12). Мелкие бугорки заняты Gleyic Histic Albic Podzol (Arenic, Siltic, Turbic), а понижения между бугорками Gleyic Albic Podzol (Arenic, Turbic). На мерзлых выпуклых повышениях среди топей – Histic Cryosol (Albic). Междуречные пространства (рис. 1, зона 14) покрыты плоскобугристыми мерзлыми болотами, которые тянутся далеко на север, вплоть до тундровой зоны. Среди перечисленных микроландшафтов зоны 2, 6 и 12 представляют зоны активного таяния многолетнемерзлых отложений (рис. 1А). Доказательством активности термокарстовых процессов на этой территории являются результаты сравнения космических снимков WorldView-2 2012 года и старых снимков со спутника «Corona» (1968). На рис. 2 и 3 приведены для сравнения два разновременных снимка на одни и те же участки. Видно, что за 44 года произошли довольно значимые изменения (рис. 2 и рис. 3), как-то осушение термокарстовых озёр, уменьшение площади мерзлых бугров в долинообразных понижениях, расширение ложбин, топей и мочажин. В крупных хасыреях, образовавшихся за несколько лет до 1968 года, успела произойти вторичная дифференциация микрорельефа. Её темпы совпадают с описанной Kaverin et al. (Kaverin et al. ,2014) для искусственно осушенных термокарстовых озёр Европейского северо-востока России.

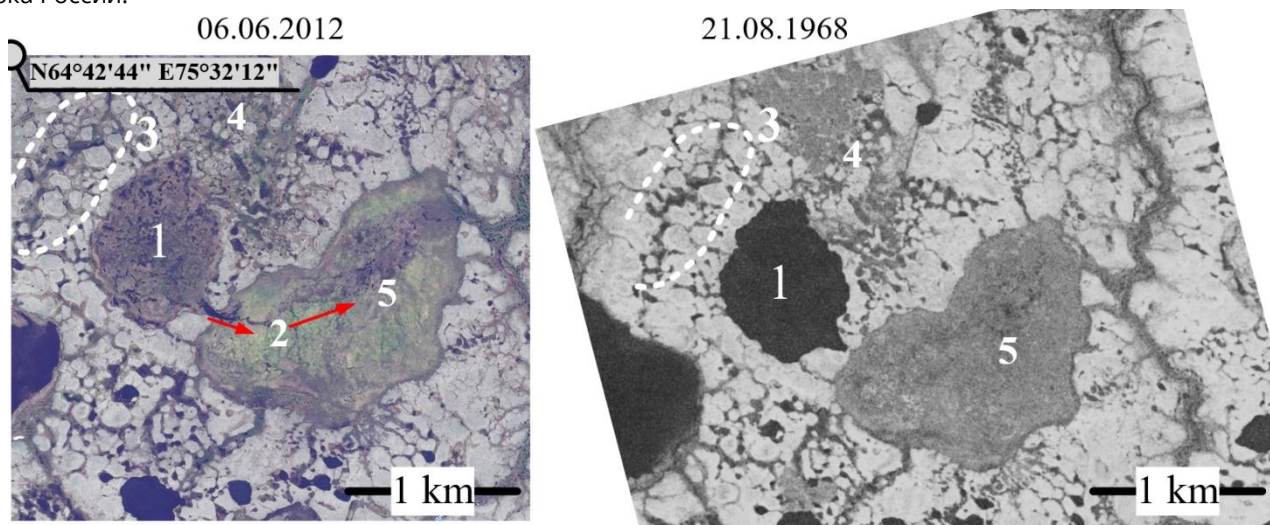


Рис. 2. Трансформация микроландшафтов на ключевом участке «Северо-Комсомольское» за 44 года (сравнение современных снимков со спутника WorldView-2 и старых снимков со спутника «Corona»). 1 – Спущенное озеро. 2 – Ложбина прорыва из озера в хасырей и формирование ниже по течению на дне хасырея транзитной топи. 3 – Расширение площади мочажин и топей. 4 – Дробление и уменьшение площади мерзлых бугров. 5 – Дифференцирование микрорельефа хасырея.

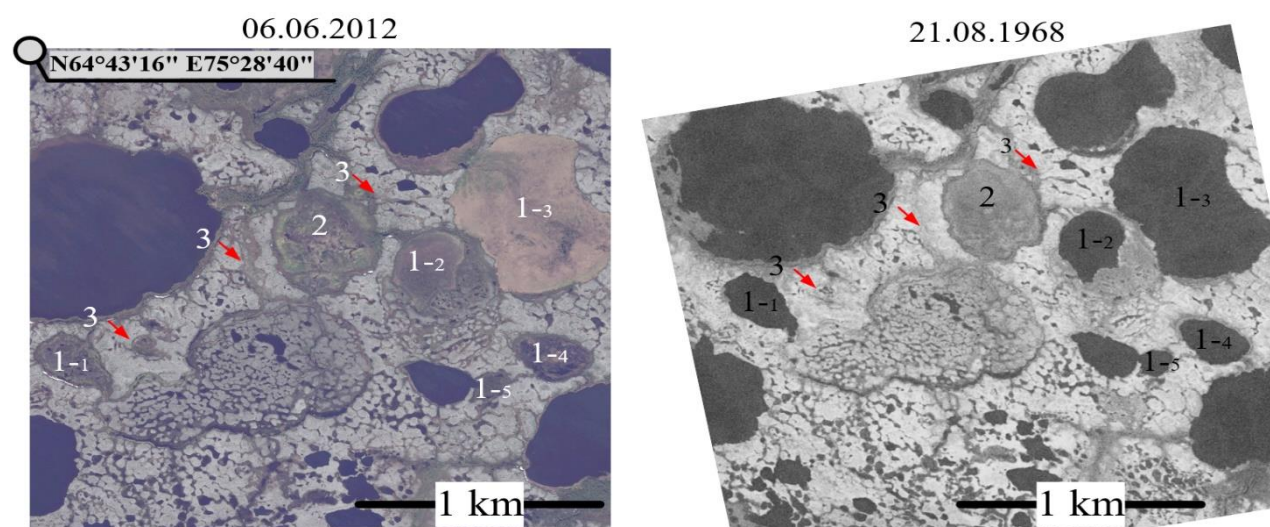


Рис. 3. Трансформация микроландшафтов на ключевом участке «Северо-Комсомольское» за 44 года (сравнение современных снимков со спутника WorldView-2 и старых снимков со спутника «Corona»). 1 – Спущенные озера. 2 – Дифференцирование микрорельефа хасырея. 3 – расширение ложбин стока за счёт термокарстового расширения бортов.

Средняя концентрация CO₂, CH₄, POУ и всех макро- и микроэлементов в маленьких водоемах участка «Северо-Комсомольское» (n = 33) можно сравнить со средними значениями участка «Ханымей» (Manasurov et al., 2015; Pokrovsky et al., 2013), и «Ноябрьск» (Shirokova et al., 2013). Согласно отношению концентраций элемента (C) на двух ключевых участках, все химические элементы можно разделить на четыре категории: (i) сильное обогащение вод в зоне активного таяния многолетней мерзлоты, C ≥ 4: Sr, Nd, Ba, Fe, Al, U, P, Si, Hf, Ca, CO₂ и CH₄; (ii) умеренное обогащение 1,5 ≤ C < 4: Cu, Cd, POУ, K, Cs, Ti, V, Pb, Co, Ga, Ge, Rb, Zr, Nb, Y, REEs, Cr, Ni, Th, и (iii) незначимым образом отличающиеся (p > 0,05) между с C = 1,0 ± 0,5: Cl, SO₄, Li, B, Na, Mg, Mn, Cu, Zn, As, Mo, Sb и W.

Рассмотрение Fe, Al и POУ является важным, поскольку они являются основным переносчиком тяжелых металлов в криолитозоне (Neubauer et al., 2013; Neubauer et al., 2013a; Raudina et al., 2016). Поэтому тяжелые металлы имеют хорошую корреляцию с Fe, Al или POУ или могут не показывать какой-либо корреляции с главными коллоидными составляющими, присутствующими как ионы или нейтральные молекулы. Много нерастворимых, низкомобильных элементов коррелируют с Fe, среди них Al, Y, Zr, Nb, редкоземельные и Th, а также элементы, как правило, связанные с коллоидами Fe – V, Cr, Co, Ge, As (0,7 < R < 0,9). Корреляции тяжелых металлов с POУ хорошо объясняются и включают растворимые нутриенты, выщелоченные из торфа, такие как P, Cu, Zn, Mo, Sb, Cs, Ba и элементы, как правило, связанные с органико-железистыми коллоидами, такими как Ga, Ti, Pb и U (0,39 ≤ R ≤ 0,76). Были обнаружены статистически значимые различия в концентрации элементов между водами мерзлого бугристого болота и торфяно-минеральных топей (рассматривались все типы вод). Статистические параметры различия в концентрациях макро- и микроэлементов в водах бугристых торфяников и торфяно-минеральных топей приведены в таблице 1. Воды бугристого болота были на 0,5 единицы pH более кислыми, а концентрации Ca, P, DOC, CO₂, Zn, Ba, Pb, SO₄, K, Cu, Mo с фактором от 1,5 до 5.

Таблица 1. Сравнение гидрохимических параметров в водах торфяно-минеральных топей и бугристого болота в ложбине.

Параметр*	Единицы	Торф.-минер. топь	Пальза в ложбине	U-test*	p-level
pH		4,26±0,34	3,71±0,12	2,5	<0,001
Sp. cond.	µS·cm ⁻¹	34,9±13,7	77,3±19,7	2,5	<0,001
DOC		35,0±12,7	55,2±27,8	66,5	0,012
SO ₄ ²⁻	mg/l	0,25±0,32	1,09±1,32	59,0	0,005
Cl ⁻		0,21±0,11	0,22±0,09	128,0	0,773
DIC		0,79±0,23	0,84±0,38	134,0	0,942
CO ₂	µmol/L	460±344	759±282	30,0	0,048
CH ₄		3,71±7,42	21,7±37	45,0	0,323
Mg		0,17±0,07	0,14±0,12	80,0	0,043
Al		0,67±0,46	0,36±0,38	75,0	0,003
P		0,014±0,008	0,095±0,09	10,0	<0,001
K		0,23±0,13	0,39±0,20	61,0	0,007
Ca	ppm	0,65±0,27	11,9±19,3	18,0	<0,001
Fe		2,06±2,35	0,32±0,21	18,0	<0,001
Mn		0,023±0,021	0,012±0,012	75,0	0,028
Na		0,49±0,27	0,57±0,34	122,0	0,614
Si		3,06±1,55	2,42±0,86	98,0	0,171
Cr		1,44±0,66	0,95±0,38	59,0	0,006
Co		0,59±0,45	0,25±0,18	47,0	0,001
Cu		0,37±0,17	1,16±0,81	30,0	<0,001
Zn		7,39±2,56	14,84±7,97	46,0	0,001
As		1,16±1,05	0,50±0,19	51,0	0,002
Sr		5,75±1,90	29,06±43,35	73,0	0,023
Mo		0,0099±0,0068	0,0410±0,0363	19,0	<0,001
Ba	ppb	10,99±5,80	22,90±11,26	40,0	<0,001
Pb		0,49±0,34	1,15±0,59	35,0	<0,001
U		0,01±0,02	0,02±0,02	88,0	0,084
Ti		2,11±1,40	2,49±2,16	130,0	0,829
Ni		1,40±1,06	2,02±1,80	119,0	0,540
Rb		0,45±0,37	0,68±0,46	91,0	0,105
Cd		0,033±0,016	0,048±0,030	96,0	0,150
Sb		0,041±0,012	0,044±0,013	130,0	0,829

* жирным выделены статистически значимые различия

Эволюция концентрации CO₂, CH₄, POУ и микроэлементов-металлов в термокарстовых водоемах удобно выражать путём представления концентрации как функции площади поверхности водного объекта, согласующуюся с постепенным увеличением размера озера в ходе развития ландшафтов мерзлых бугристых болот Западной Сибири. Для малых мочажин и просадок (< 10 – 100 м²) характерны значительно более высокие концентрации POУ и CO₂ (p <

0,05), по сравнению с большими депрессиями и термокарстовыми водоемами (рис. 4). Ряд таяния многолетнемерзлых пород включает преобразование мочажин, депрессий и просадок в малые талые водоёмы, а далее в зрелые термокарстовые озера и наконец осушенные озера, либо хасыреи Kirpotin et al., 2009; Kirpotin et al., 2011). В этой последовательности в фоновых условиях наблюдается уменьшение концентрации CO_2 , CH_4 , POU и связанных концентраций элементов по мере увеличения размера водоемов, что связано с комбинацией внутренних процессов такой как био- и фотодеграция растворенного органического вещества, фитопланктона и поглощение макрофитами элементов, и внешними факторами, такими как уменьшение поступления веществ от выщелачивания торфа, уменьшением отношения периметр озера / объем озера (Shirokova et al., 2013).

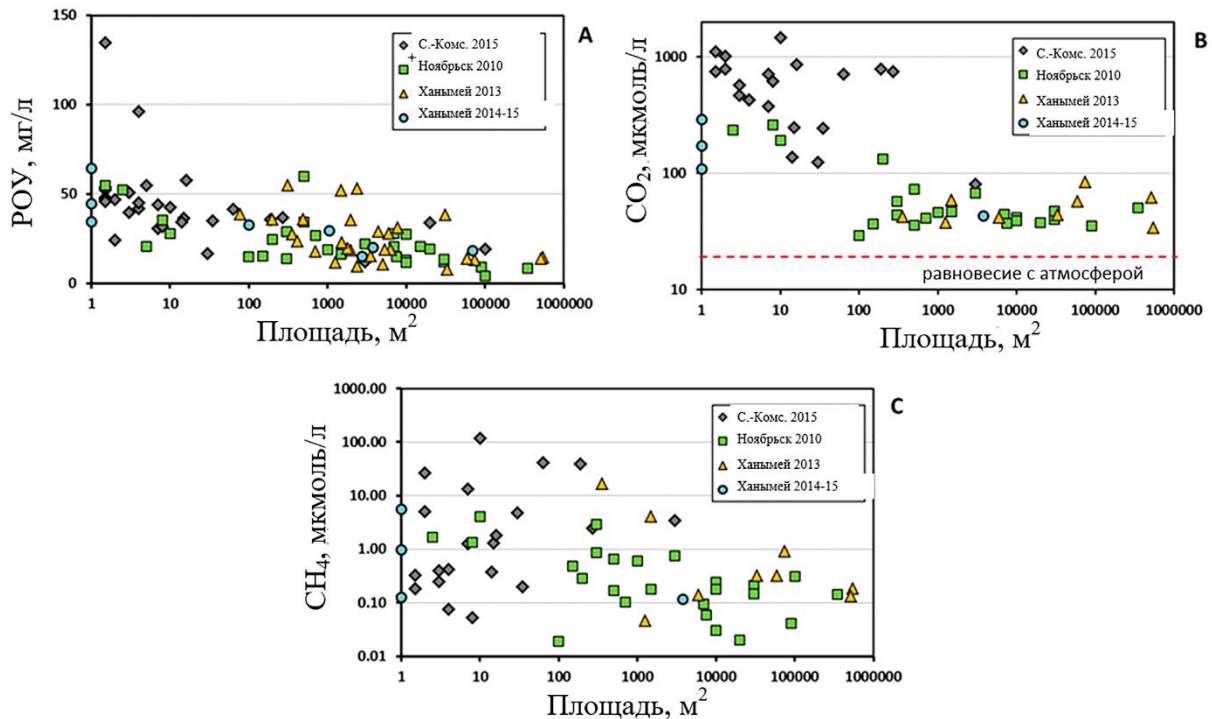


Рис. 4. Концентрации POU (А), CO_2 (В) и CH_4 (С) как функция площадь водных объектов на участке активного таяния (Северо-Комсомольское) и в пределах ландшафтов с устойчивой многолетней мерзлотой вблизи Ноябрьска (квадраты) и Ханымея (треугольники).

В водах зон активного таяния многолетней мерзлоты установлен факт статистически значимого ($p < 0,05$) уменьшения концентрации POU и CO_2 по направлению от маленьких мочажин и депрессий ($< 10 - 100 \text{ м}^2$) к более крупным водоемам и озерам ($> 1000 \text{ м}^2$), тогда как уменьшение концентрации CH_4 было менее явным. Самый важный результат состоит в том, что концентрации POU , CO_2 и CH_4 в маленьких водоемах, в начале таяния вечной мерзлоты, статистически выше ($p < 0,05$) в зонах активного таяния вечной мерзлоты (С.-Комсомольское) сравненный с устойчивым таянием вечной мерзлоты в Ноябрьске и Ханымее.

Также отмечено уменьшение концентрации CH_4 с увеличением размера водоема ($p < 0,05$) несмотря на то, что дисперсия данных достигает 3 порядков. В маленьких ($< 100 - 300 \text{ м}^2$) водоемах где происходит активный термокарст (ключевой участок Северо-Комсомольское), концентрации POU , CO_2 и CH_4 значительно выше ($p < 0,05$), чем в тех водоемах, но в условиях устойчивого состояния многолетней мерзлоты в районах Ноябрьска и Ханымея, изученных ранее.

Возможно, что растворенное органическое вещество на участке Северо-Комсомольское более подходит для бактериального роста и менее невосприимчиво в сравнении с районами устойчивой многолетней мерзлоты. Такие различия в характере растворенного органического вещества согласовывается с недавними результатами лабораторной инкубации различных минеральных многолетнемерзлых горизонтов, демонстрирующих, что существенная биодеграция растворенных органических веществ многолетней мерзлоты происходит сразу после оттаивания и прежде чем происходит его транспорт (Drake et al., 2015). Присутствие легкогидролизуемых карбоновых кислот (Yang et al., 2016) и неопознанных соединений углерода, конечно, выше на участках катастрофического таяния относительно к участкам устойчивого состояния многолетней мерзлоты. В целом это может обеспечить более высокие концентрации POU и CO_2 в маленьких водоемах в зонах активного таяния многолетней мерзлоты.

Воды ландшафта, где происходит активный термокарст, имеют приблизительно, на 0,5 более кислые единицы pH, чем участки с устойчивым состоянием многолетней мерзлоты (рис. 5) и обычно богаты кислородом (насыщенность в диапазоне $30 \leq \text{O}_2 \leq 105 \%$). Многие важные макро- и микроэлементы демонстрируют статистически значимое уменьшение концентрации от очень маленьких водоемов ($< 10 \text{ м}^2$) к более крупным термокарстовым водоемам, как это проиллюстрировано для P, Si, Ca и Sr на рисунке 6 А, В, С и D, соответственно и для электропроводности, SO_4 и K на рисунке 9, соответственно. Концентрации Al и Fe также уменьшаются.

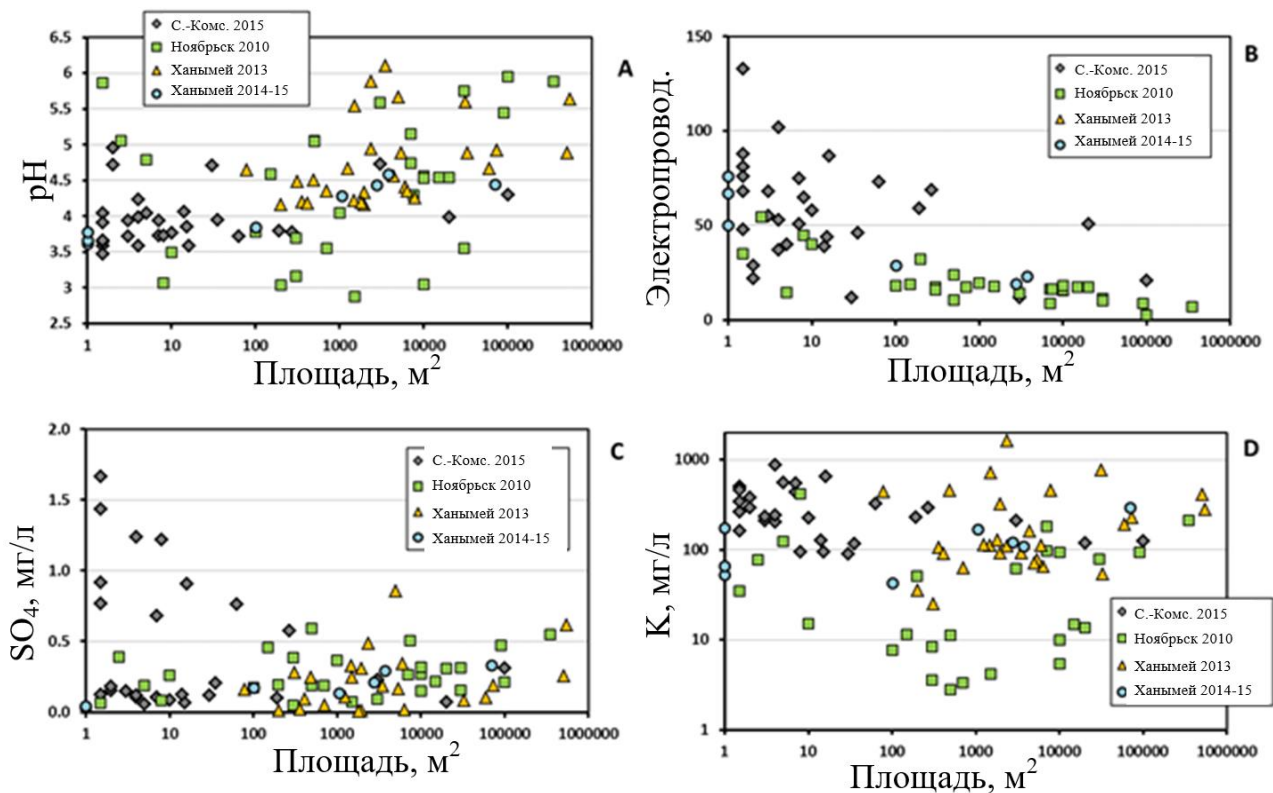


Рис. 5. pH(A), электропроводность (B), концентрации SO_4 (C) и K (D) на участке Северо-Комсомольское в сравнении с участком устойчивого состояния мерзлоты.

Поведение многих важных макро- (P, Ca, Si) и микронутриентов (Fe, Ni, Co, Cu, V, Sr), а также токсичных элементов (Al, Cr, Cd, Pb, U) коррелирует с РОУ и парниковыми газами в том смысле, что (1) концентрации этих элементов значительно, как правило, с фактором 2 – 8 ($p < 0,05$), выше в ландшафтах, где проявляется активный термокарст, и (2) концентрации этих элементов систематически выше (фактор 2 – 10, $p < 0,05$) в мочажинах, депрессиях и просадках ($\leq 30 \text{ м}^2$) относительно больших ($> 100 \text{ м}^2$) водоемов. Это ясно указывает на важность органогенных и минеральных горизонтов в качестве источников элементов в водах, дренирующих эти болотные массивы. Мобилизация Sr и других «минеральных» элементов от замороженной минеральной почвы, как известно, является эффективным индикатором таяния многолетней мерзлоты на Аляске (Keller et al., 2010) и в Центральной Сибири (Bagard et al., 2011; Bagard et al., 2013), и в целом, с таянием вечной мерзлоты увеличивается экспорт элементов из минеральных горизонтов. Выдвигаем гипотезу, что участие минеральных горизонтов, включая слои многолетнемерзлого торфа, которые подвержены активному таянию, на участке «Северо-Комсомольское» служат важным источником литогенных элементов в потоке надмерзлотных верховодок и водах термокарстовых водоёмов.

Действительно, тающая многолетняя мерзлота в торфяно-минеральных болотах увеличивает время контакта и объёмы контактирующих вод с торфом и минеральными горизонтами, таким образом, увеличивая потенциал выщелачивания кислых, богатых органическими соединениями вод и увеличивая концентрацию неорганических соединений в термокарстовых водах. Высокая корреляция между РОУ и удельной электропроводностью ($r^2 = 0,65$) предлагает совместное выщелачивание макроэлементов и РОУ из комплекса мерзлого торфа и глины. Нутриенты, которые, как известно, накапливаются в растительной подстилке, мхе и торфе (P, Cu, Zn, K, Mo, Ba), были более всего затронуты катастрофическим оттаиванием, поскольку их концентрация сильно увеличивается с увеличением удельной электропроводности. Эти элементы, скорее всего, выщелочены из биогенных (органических) резервуаров почвенного профиля как показано в лабораторных опытах и прогрессивно удаляются в ходе созревания термокарстовых водоемов из-за поглощения водной биотой (перифитон, планктон и макрофиты). Наблюдаемое усиление мобилизации органического углерода из почв в водоемы на участках катастрофического таяния согласуется с наблюдениями, что увеличение мощности горизонта верховодок торфяников приводит к увеличению концентрации РОУ в почвенных растворах, усиливая, таким образом, экспорт нутриентов и к окружающим гидроэкосистемам (Wardle et al., 2004). Увеличение сезонно-талого слоя в зоне активного проявления термокарста приводит к появлению многочисленных мочажин, депрессий и термокарстовых просадок, особенно на границе между лесом и топями, что связано с поступлением дополнительных количеств тепла от текучих вод и вызывает протаивание глубокой многолетней мерзлоты по краям грив, занятых лесом. Увеличение удельной электропроводности в самых маленьких водоемах и надмерзлотных верховодках сопровождается значительным увеличением концентраций РОУ, P, K, Cu, Zn, Mo и Ba. Это показывает высокий потенциал мобилизации из мерзлого торфа дополнительных количеств макро- и микронутриентов в случае его оттаивания и согласовывается с доступными лабораторными исследованиями. РОУ, CO_2 , CH_4 , Ca, P и концентрации Si в маленьких депрессиях и просадках, образовавшихся в результате активного таяния многолетней мерзлоты, были в 5–10 выше, чем в пределах плоскобугристых болот со стабильными геокриологическими условиями (участок Ханымей) (Raudina et al., 2017).

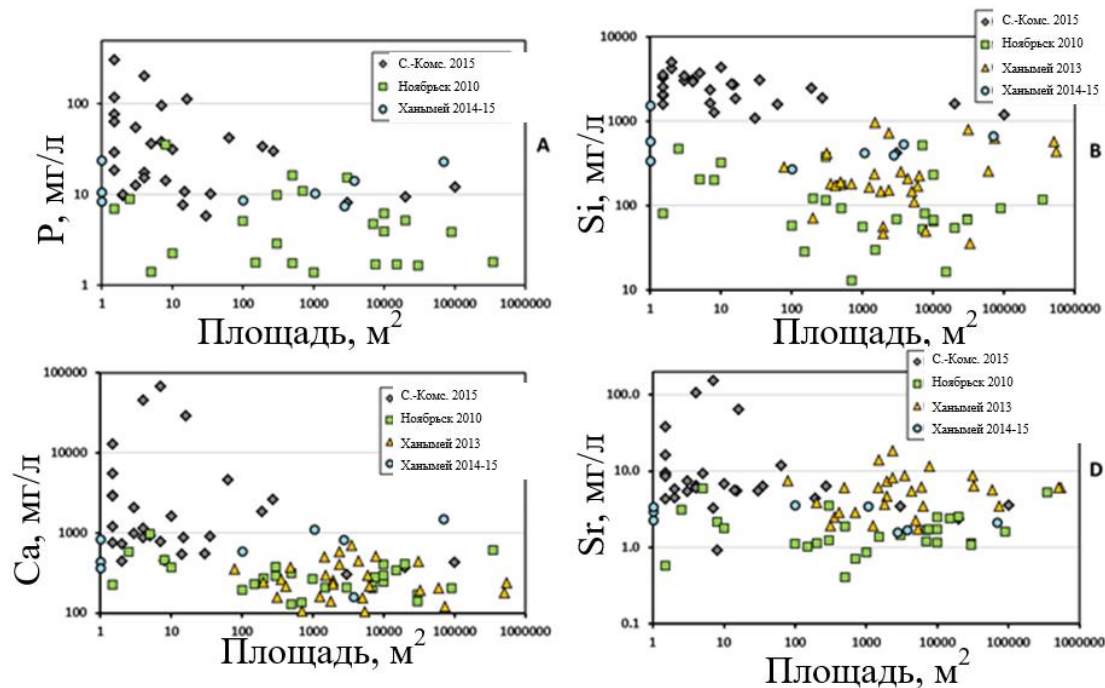


Рис. 6. Концентрации P (A), Si (B), Ca (C) и Sr (D) на участке Северо-Комсомольское в сравнении с участком устойчивого состояния мерзлоты.

В то же время органические коллоиды (1 килодальтон – 0,45 мкм) в пределах зон активного таяния богаче Fe, Al, Ni, Pb и нерастворимыми литогенными элементами, происхождение которых связано с взаимодействием жидкостей из оттаивших органических горизонтов с минеральными горизонтами. Водные коллоиды зон активного проявления термокарста (1 килодальтон – 0,45 мкм) показали очень однородный элементный химический состав в широком спектре изученных вод, принадлежащим формам микрорельефа различных стадий развития термокарста.

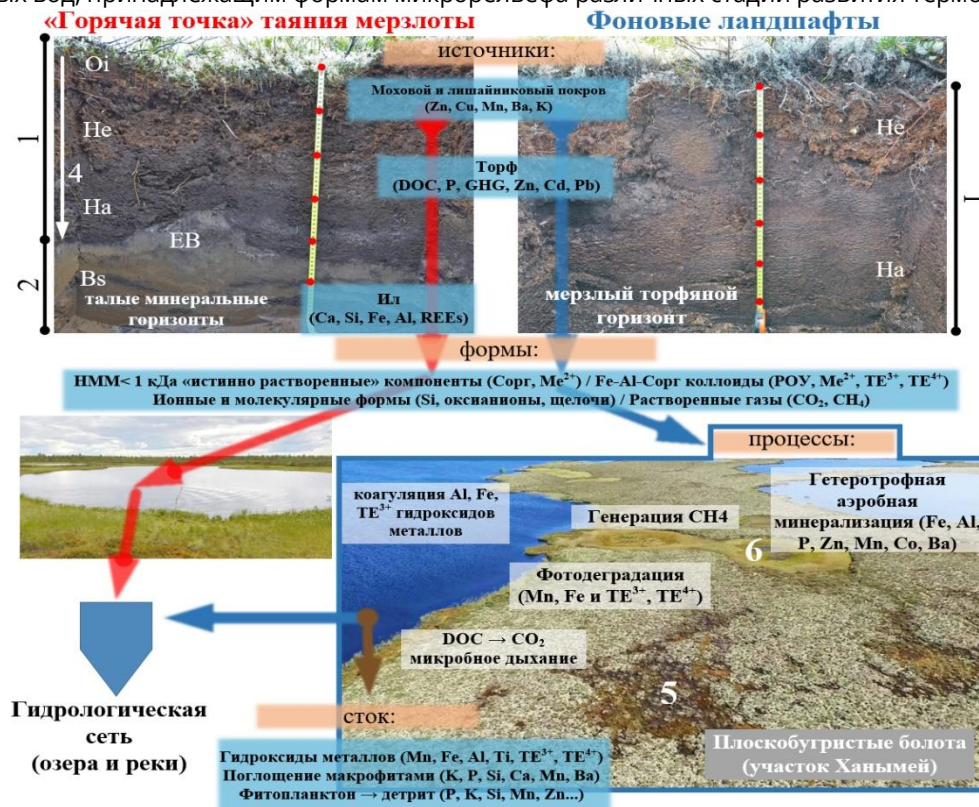


Рис. 7. Схематичное изображение источников, форм и процессов преобразования и стока химических элементов в «типичной» устойчивой вечной мерзлоте в пределах плоскобугристых междуречных торфяников («Ханымей») и активного таяния многолетней мерзлоты («Северо-Комсомольское»). Красные стрелки – потоки элементов в сценарии таяния «горячих точек» и голубые стрелки – районы устойчивого таяния вечной мерзлоты. 1 – слои торфа; 2 – талые минеральные горизонты; 3 – многолетнемерзлые минеральные горизонты; 4 – направление увеличения степени разложения торфа; 5 – просадки многолетней мерзлоты; 6 – мочажины.

Основным факторам обогащения вод ландшафтов, где происходит активное проявление термокарста, различными элементами является более существенное участие глубоких минеральных горизонтов, как проводящих путей для почвенных вод, а также отсутствие значительных био- и фотопреобразований органических и органо-минеральных коллоидов в малых поверхностных водоёмах в условиях меньшего среднего времени пребывания воды в ландшафте, что связано с более выраженными уклонами в пределах широкой ложбины верховьев реки Пуритей.

Время пребывания воды в ландшафте управляет концентрациями РОУ, металлов и парниковых газов, а также их потенциалом к изменению химического состава дренирующих рек и увеличением выбросов CO₂ и CH₄ в атмосферу. Можно предположить, что в зонах активного проявления термокарста, так называемых «горячих точках», будет происходить прямая мобилизация почвенных вод в гидрологическую сеть (реки, и озера) с минимальной трансформацией состава вод в пределах водосбора (рис. 7).

Продолжающееся оттаивание многолетнемерзлых пород в пределах «горячих точек» увеличит мощность деятельного слоя, что приведет к усилению поступления неорганических веществ из глубоких минеральных горизонтов, что может привести к обогащению подповерхностных вод коллоидами, обогащенными Al и низкомолекулярными органическими комплексами. В результате этого коллоидный состав поверхностных вод Западно-Сибирской равнины может переместиться от преимущественно органического к железистому алюмо-органическому типам. Что приведёт к увеличению поступления из почв в реки трехвалентных и четырехвалентных элементов.

Выводы

Резкие изменения внешних условий приводят к формированию горячих точек в ландшафтах, где скорость преобразования значительно превышает более консервативный «холодный» или «устойчивый» фон (Козловский Ф.И., 2003). Потепление климата в северотаежных ландшафтах приводит к формированию «горячих точек» в пределах больших водосборных систем с наличием мерзлых бугристых торфяных массивов. Эти части ландшафтов будут пребывать в таком статусе по причине усиленного увеличения притока тепла в них с поверхностными водами при потеплении климата. Это приведет к ускоренному развитию термокарстовых процессов, что уже зафиксировано для ключевого участка Северо-Комсомольское (рис. 3). В этом отношении кумулятивное действие небольших дополнительных частей тепла в гетерономных ландшафтах оказывает значительное влияние на геокриологические условия.

Систематически более высокие величины (на 0,5 – 1,0 порядка) концентраций макро- и микронутриентов, и парниковых газов в «горячих точках» ландшафта, в сравнении с устойчивым фоном, показывает потребность в картографировании с высоким разрешением болотных комплексов Западной Сибири с использованием дистанционных данных с высоким разрешением. Калибровка спутниковых снимков по данным наземных наблюдений, что было сделано в данном исследовании, может позволить инвентаризировать число и относительное поверхностное покрытие обнаруженных «горячих точек», что может существенно изменить оценки текущих запасов углерода и металлов в водах термокарстовых водоёмов Западной Сибири.

Все изученные ландшафты представляют собой гидрологический континуум, представляющий собой систему сопряженных поверхностных вод различных болотных микроландшафтов. В пределах этого континуума концентрация CO₂ и РОУ уменьшалась вдоль гидрологического континуума (почвенные растворы → почвенные воды → депрессии и просадки многолетней мерзлоты → малые термокарстовые водоёмы → термокарстовые озера). Концентрации растворенных в воде CO₂, CH₄, Ca, Si, P, Al, Fe, Nd и U были с фактором 4 – 10 выше в пределах «горячих точек», в сравнении с районом устойчивых многолетнемерзлых болот (ключевой участок «Ханымей»), изученным ранее в том же регионе. Органические коллоиды (1 килодальтон – 0,45 мкм), сформированные в горячих точках, были сильно обогащены Fe и Al, а также нерастворимыми трехвалентными и четырехвалентными металлами.

Благодарности

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России 1.8195.2017/9.10.

References

- Bagard, M. L., Chabaux, F., Pokrovsky, O. S., Viers, J., Prokushkin, A. S., Stille, P., ... & Dupré, B. (2011). Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(12), 3335-3357. DOI: 10.1016/j.gca.2011.03.024.
- Bagard, M. L., Schmitt, A. D., Chabaux, F., Pokrovsky, O. S., Viers, J., Stille, P., ... & Prokushkin, A. S. (2013). Biogeochemistry of stable Ca and radiogenic Sr isotopes in a larch-covered permafrost-dominated watershed of Central Siberia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 114, 169-187. DOI: 10.1016/j.gca.2013.03.038.
- Chikharev, V. A. (2012). Morfologo-dinamicheskaya struktura tipa mestnosti zatorfovannykh dolinoobraznykh ponizheniy. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Sotsial'no-ekonomicheskkiye i pravovyye issledovaniya*, (7) (in Russian).
- Christensen, J. H., & Christensen, O. B. (2007). A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic change*, 81, 7-30. DOI 10.1007/s10584-006-9210-7.
- Drake, T. W., Wickland, K. P., Spencer, R. G., McKnight, D. M., & Striegl, R. G. (2015). Ancient low-molecular-weight organic acids in permafrost fuel rapid carbon dioxide production upon thaw. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(45), 13946-13951.
- Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., von Bloh, W., Brovkin, V., ... & Bala, G. (2006). Climate-carbon cycle feedback analysis: results from the C4MIP model intercomparison. *Journal of climate*, 19(14), 3337-3353. DOI: 10.1175/JCLI3800.1.

- IUSS Working Group WRB (2014) World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Kaverin, D. A., Pastukhov, A. V., Kakunov, N. B., & Kalmykov, A. V. (2014). Osobennosti formirovaniya pochv v kotlovine osushennogo ozera "Opytnoye" (Yevropeyskiy severo-vostok Rossii). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 16(5) (in Russian).
- Keller, K., Blum, J. D., & Kling, G. W. (2010). Stream geochemistry as an indicator of increasing permafrost thaw depth in an arctic watershed. *Chemical Geology*, 273(1), 76-81. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2010.02.013.
- Keller, K., Blum, J. D., & Kling, G. W. (2010). Stream geochemistry as an indicator of increasing permafrost thaw depth in an arctic watershed. *Chemical Geology*, 273(1). DOI: 10.1016/j.chemgeo.2010.02.013.
- Kirpotin, S. N., Berezin, A., Bazanov, V., Polishchuk, Y., Vorobiov, S., Mironycheva-Tokoreva, N., ... & Kouraev, A. (2009). Western Siberia wetlands as indicator and regulator of climate change on the global scale. *International Journal of Environmental Studies*, 66(4), 409-421. DOI: 10.1080/00207230902753056.
- Kirpotin, S., Polishchuk, Y., Bryksina, N., Sugaipova, A., Kouraev, A., Zakharova, E., ... & Dupre, B. (2011). West Siberian peatlands: distribution, typology, cyclic development, present day climate-driven changes, seasonal hydrology and impact on CO₂ cycle. *International journal of environmental studies*, 68(5), 603-623. DOI: 10.1080/00207233.2011.593901.
- Manasypov, R. M., Vorobyev, S. N., Loiko, S. V., Kritckov, I. V., Shirokova, L. S., Shevchenko, V. P., & Sinkinov, V. V. (2015). Seasonal dynamics of organic carbon and metals in thermokarst lakes from the discontinuous permafrost zone of western Siberia. *Biogeosciences*, 12(10), 3009. DOI: 10.5194/bg-12-3009-2015.
- Neubauer, E., Köhler, S. J., von der Kammer, F., Laudon, H., & Hofmann, T. (2013). Effect of pH and stream order on iron and arsenic speciation in boreal catchments. *Environmental science & technology*, 47(13), 7120-7128. DOI: 10.1021/es401193j.
- Neubauer, E., Von Der Kammer, F., Knorr, K. H., Peiffer, S., Reichert, M., & Hofmann, T. (2013). Colloid-associated export of arsenic in stream water during stormflow events. *Chemical Geology*, 352, 81-91. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.05.017.
- Pokrovsky, O. S., Shirokova, L. S., Kirpotin, S. N., Kulizhsky, S. P., & Vorobiev, S. N. (2013). Impact of western Siberia heat wave 2012 on greenhouse gases and trace metal concentration in thaw lakes of discontinuous permafrost zone. *Biogeosciences*, 10(8), 5349-5365. DOI: 10.5194/bg-10-5349-2013.
- Raudina, T. V., Loiko, S. V., Lim, A. G., Krickov, I. V., Shirokova, L. S., Istigechev, G. I., ... & Pokrovsky, O. S. (2017). Dissolved organic carbon and major and trace elements in peat porewater of sporadic, discontinuous, and continuous permafrost zones of western Siberia. *Biogeosciences*, 14(14), 3561.
- Raudina, T. V., Loyko, S. V., Kritckov, I. V., & Lim, A. G. (2016). Sravneniye sostava pochvennykh vod merzlykh bolot Zapadnoy Sibiri, poluchennykh razlichnymi metodami. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 3(35) (in Russian).
- Romanovsky, V. E., Smith, S. L., & Christiansen, H. H. (2010). Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007–2009: a synthesis. *Permafrost and Periglacial processes*, 21(2), 106-116. DOI: 10.1002/ppp.689.
- Shirokova, L. S., Pokrovsky, O. S., Kirpotin, S. N., Desmukh, C., Pokrovsky, B. G., Audry, S., & Viers, J. (2013). Biogeochemistry of organic carbon, CO₂, CH₄, and trace elements in thermokarst water bodies in discontinuous permafrost zones of Western Siberia. *Biogeochemistry*, 113(1-3), 573-593. DOI: 10.1007/s10533-012-9790-4.
- Wardle, D. A., Bardgett, R. D., Klironomos, J. N., Setälä, H., Van Der Putten, W. H., & Wall, D. H. (2004). Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 304(5677), 1629-1633. DOI: 10.1126/science.1094875.
- Yang, Z., Wullschleger, S. D., Liang, L., Graham, D. E., & Gu, B. (2016). Effects of warming on the degradation and production of low-molecular-weight labile organic carbon in an Arctic tundra soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 95, 202-211. DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.12.022.

Citation:

Lim, A.G., Loiko, S.V., Kritckov, I.V., Kyzmina, D.M. (2017). Structural-functional features of landscapes with active thermocarst in the northern taiga of Western Siberia. *Ukrainian Journal of Ecology*, 7(4), 414-423.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0. License