

ГИДРОЛОГИЯ СКЛОНОВЫХ ЛОЖБИН СТОКА И ИХ ВКЛАД В УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС АРКТИЧЕСКОЙ ТУНДРЫ ЯНО-ИНДИГИРСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Тананаев Н.И., Кривенок Л.А., Солдатова Е.А., Лупачев А.В.,

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Тюменский государственный университет

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

Аннотация. Склоны арктических регионов мира испещрены склоновыми ложбинами стока, наиболее распространенной в этих областях формы организации подповерхностного стока. Современные гидрологические и биогеохимические функции склоновых ложбин стока Яно-Индигирского междуречья отличаются от других арктических регионов, однако, как и во всём мире, склоновые ложбины стока выступают основными магистралями выноса растворенных веществ из тундровых ландшафтов. Показано, что химический состав вод склоновых ложбин стока формируется непосредственно на склонах, и не получает питания ни от вытаивания подземного льда, в том числе текстурного, ни с приводораздельных «озёрных полей», типичных для областей распространения склоновых ложбин стока. Дифференциация склоновых поверхностей не приводит к значимому изменению удельных потоков диоксида углерода, однако этот эффект может быть сглажен межгодовой и сезонной изменчивостью.

Ключевые слова: Арктика, гидрология криолитозоны, склоновые ложбины стока, диоксид углерода, метан, деградация криолитозоны

HYDROLOGY OF HILLSLOPE WATER TRACKS AND THEIR CONTRIBUTION TO THE CARBON BUDGET OF ARCTIC TUNDRA OF THE YANA-INDIGIRKA INTERFLUVE

Tananaev N.I., Krivenok L.A., Soldatova E.A., Lupachev A.V.

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University

P.I. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS

Tyumen State University

Institute of physical-chemical and biological problems in soil science, RAS

Abstract. Hillslope water tracks are omnipresent on Arctic slopes as a form of fast subsurface runoff. Hydrological and biogeochemical functions of hillslope water tracks of the Yana-Indigirka interfluve differ from other Arctic regions but nonetheless they are the major drainage pathways for dissolved material from tundra landscapes. Water chemistry in hillslope water tracks results from organic soil leaching and is not affected neither by ground ice melting nor from the minor thermokarst lakes abundant along local water divides. Slope differentiation into water tracks and inter-track surfaces does not show to alter average carbon dioxide fluxes from slopes, but this may be subject to interannual and seasonal variations.

Keywords: Arctic, permafrost hydrology, hillslope water tracks, carbon dioxide, methane, permafrost degradation

Введение. Современное изменение климата уже привело к повышению среднегодовой температуры воздуха в высоких широтах, в четыре раза более интенсивному, чем в среднем

по планете [9]. Деградация верхних горизонтов многолетнемерзлых пород (ММП) приводит к интенсивному развитию криогенных процессов, в основе которых лежат гравитационные или флювиальные механизмы [3]. Вслед за криогенно-обусловленными изменениями состояния экосистем происходит изменение баланса климатически-активных газов (КАГ), затронутые территории превращаются из нетто-поглощителей в источники диоксида углерода [4]. Склоновые ложбины стока – типичные криогенно-флювиальные формы рельефа типичных тундр криолитозоны [11], слабо выраженные в рельефе склонов, но хорошо визуально выделяющиеся на местности благодаря контрастной растительности с обилием гидрофильных видов, например, *Eriophorum sp.*, *Betula nana* и другим. Склоновые ложбины стока – нетто-эмитенты диоксида углерода и метана; удельные потоки этих газов в атмосферу определяются с приповерхностной температурой почвы, содержанием растворенного органического углерода (РОУ) и увлажненностью [5, 8]. Биогеохимическая значимость склоновых ложбин стока очевидна, однако удельные потоки КАГ в тундровых экосистемах практически не измерялись; в предыдущих работах оценки удельных потоков сделаны по содержанию растворенного CO_2 и метана в поверхностных водах в пределах ложбин, а современные данные камерных измерений отсутствуют. В данной работе сделан обзор гидрохимических условий исследованного участка на территории Яно-Индибирского междуречья в бассейне р. Аллаиха, левого притока р. Индибирка в районе пос. Чокурдах, а также впервые приведены детальные сведения об удельных потоках КАГ с поверхности склоновых ложбин стока, межложбинных пространств и участков фоновой тундры.

Материалы и методы. Экспедиционные исследования проводились в период с 17 по 26 июля 2022 г. на территории Яно-Индибирского междуречья, в левобережной приустьевой части бассейна р. Аллаиха, левого притока р. Индибирка, в 35 км к юго-западу от пос. Чокурдах (Аллайховский улус РС(Я)). Детальные исследования охватили элементарный водосбор безымянного притока второго порядка р. Аллаиха, образованного крупной ложбиной стока и водотоком, вытекающем из озерной котловины; работы проводились на северном и южном склонах долины этого притока, на приводораздельных поверхностях и непосредственно в русле притока и по тальвегам склоновых ложбин стока. В полевых условиях определялись температура, pH и электропроводность воды с помощью мультипараметрического измерителя WTW Multi 3620. Химический состав природных вод исследовался в лаборатории функциональной экологии и окружающей среды Национального политехнического института г. Тулуза, Франция (растворенный органический углерод (РОУ), общий азот), Обсерватории Юг-Пиренеи г. Тулуза, Франция (полный элементный состав). Определение РОУ и общего азота выполнено методом высокотемпературного каталитического сжигания на ТОС-анализаторе Shimadzu TOC-L (Shimadzu, Япония), определение полного элементного состава – методом трехкврупольной масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре Thermo iCAP QQQ (Thermo Scientific, США). Измерение удельных потоков климатически-активных газов, диоксида углерода, CO_2 , и метана, CH_4 , проводилось методом статических закрытых камер, с площадок с удаленной растительностью. Изменение содержания CO_2 в объеме камеры измерялось установленным в камере датчиком SenseAir K33 с записью показаний один раз в 30 секунд, согласно [2], при этом объем камеры перемешивался небольшим вентилятором. Образцы для определения содержания CH_4 отбирались из объема камеры в шприц и перегонялись в виалу с солевым раствором объемом 20 мл, после чего транспортировались в лабораторию и анализировались на хроматографе «Кристалл-5000» (Хроматэк, РФ).

Результаты и обсуждение. Исследованный участок Яно-Индибирского междуречья в настоящее время относится к категории сухих арктических тундр. По данным реанализа GHSCN-CAMS, район пос. Чокурдах характеризуется интенсивным ростом среднегодовой температуры воздуха: свыше $+1.6^\circ\text{C}$ между климатическими периодами 1961-1990 и 1991-2020 гг. [1]. В то же время годовая сумма осадков на территории района, ранее не

превышавшая 200 мм, уменьшилась между периодами 1961-1990 и 1991-2020 гг. более чем на 20 мм, или более 10% от годовой суммы (данные ВНИИГМИ-МЦД и реанализа CRU TS v. 4.05). Снижение увлажненности территории при увеличении среднегодовой температуры воздуха приводит к сопоставимому уменьшению влажности почвы, на 20-25 мм, за тот же период, по данным проекта CPC Soil Moisture версии 2.0 (NOAA, США). Таким образом, общий региональный фон развития склоновых ложбин стока – иссушение поверхности склонов, сосредоточение склонового стока в более глубоких горизонтах почвы.

Основные гидрохимические характеристики. Исследованные водные объекты имеют повышенную кислотность, среднее значение pH = 6.4, что неудивительно, учитывая особое внимание к почвенной влаге в рамках полевых работ. В крупных термокарстовых озерах среднее значение pH = 7.5, в пр. Индигирка и Аллаиха pH = 7.8, в водах исследованного малого водотока – колеблется от 6.8 до 7.1. В то же время в термокарстовых западинах и склоновых ложбинах стока pH редко превышает 6.0, и в большей части случаев колеблется от 5.2 до 5.5. Электропроводность вод превышает 100 мкСм/см в крупных водных объектах, находится в диапазоне от 50 до 100 мкСм/см в русловых водотоках, и большей частью не превышает 30-35 мкСм/см в подповерхностных водах в пределах склоновых ложбин стока. Температура воды в поверхностных водоемах и водотоках меняется от 9 до 12°C, однако оказывается значительно ниже в склоновых ложбинах стока, от 2.0 до 4.5°C, и связано с наименьшими значениями pH.

Растворенный органический углерод (РОУ). Содержание РОУ в исследованных водных объектах типично для арктической тундры и не превышает 40 мг/дм³, среднее значение – 26 мг/дм³. Минимальная концентрация РОУ, 5.6 мг/дм³, измерена в термокарстовом озере, прислоненном к борту крупной, глубоко вложенной в местность озерной котловины. Максимальная концентрация РОУ, 39.3 мг/дм³, измерена в небольшой термокарстовой западине, большое количество которых представлено на приводораздельной поверхности, примыкающей к склону долины южной экспозиции. В склоновых ложбинах стока, как правило, содержание РОУ превышает 25 мг/дм³, тогда как в водоемах и проточных водотоках оно составляет не более 10 мг/дм³. Характерно, что в большинстве образцов содержание РОУ превышает сумму растворенных веществ; растворенный органический углерод, таким образом – преобладающий компонент химического состава природных вод территории, определяющий их минерализацию.

Растворенный азот. Содержание растворенного азота (общего) меняется в пределах от 0.4 до 1.2 мг/дм³, и возрастает линейно вместе с содержанием РОУ ($n = 48, r = 0.84$); таким образом, в крупных водоемах и русловых водотоках оно не превышает 0.6 мг/дм³, тогда как в термокарстовых западинах и склоновых ложбинах стока меняется от 0.9 до 1.2 мг/дм³. Соотношение РОУ и растворенного азота, C:N, соответственно, так же изменчиво: от 2.8 в полигонально-жильных льдах (ПЖЛ) обнажения Аллаиха до 41.7 в ложбине стока на склоне северной экспозиции. Соотношение C:N прямо связано с содержанием РОУ, что противоречит глобальным выводам работы выводов работы [6], в которой указано на статистически значимую обратную связь этих показателей.

Главные ионы. По химическому составу исследованные воды – ультрапресные, с минерализацией менее 50 мг/дм³, гидрокарбонатно-кальциевые; второстепенные катионы – Mg²⁺ и K⁺, второстепенные анионы – SO₄²⁻ и Cl⁻. Известно, что деградация верхних горизонтов криолитозоны приводит к увеличению концентрации сульфатов в природных водах [10]. В исследованном нами районе наибольшие концентрации сульфатов, 0.94 мг/дм³, действительно, отмечены в ПЖЛ обнажения Аллаиха, однако значимого влияния оттаивающих ПЖЛ на химический состав вод территории нам установить не удалось. Лишь в левом отвершке небольшой долины, открывающейся в основное русло р. Аллаиха в районе обнажения, отношение SO₄²⁻/Na⁺ увеличивается с фоновых 0.03-0.05 до 0.17-0.31,

приближаясь к таковому в ПЖЛ, равному 0.49. В правом отвершке той же долины отношение $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ находится на уровне фона.

Элементный состав. Выполнено 2900 элементоопределений, от Li до U, в 50 образцах природных вод и подземного льда, отобранных в ходе полевых работ; детальный анализ обширного массива данных выходит далеко за рамки этого краткого обзора. Преобладающие в исследованных образцах микроэлементы – Al, Si и Fe, причём их содержание в водах склоновых ложбин стока превышает содержание большинства главных ионов. Среднее содержание алюминия составило 0.14 мг/дм³, кремния – 1.96 мг/дм³, железа – 0.25 мг/дм³; в склоновых ложбинах стока эти значения составили 0.28 мг/дм³, 2.61 мг/дм³ и 0.36 мг/дм³, соответственно. При этом отсутствует связь между содержаниями Al, Fe и РОУ, типичная для мерзлотных ландшафтов Западной Сибири [7], и в целом содержание железа не является определяющим фактором содержания других элементов. Это указывает на ограниченную роль коллоидной фазы и сложных Fe(Al)-РОУ комплексов в латеральном переносе химических элементов. На ограниченную роль коллоидов указывает соотношение U/Th значительно меньше 0.1, за исключением вод рр. Индигирка и Аллаиха, где U/Th > 10, в ПЖЛ и питаемых их таянием водотоках (U/Th от 0.3 до 0.7), в крупных термокарстовых озёрах и вытекающем из них ручье (U/Th от 1 до 5). Резкие различия отмечаются в содержании редкоземельных элементов (РЗЭ) и их соотношениях. Соотношение легких и тяжелых РЗЭ (по La*/Lu*, где (*) обозначает концентрации элементов, нормированные на УСС) в малых термокарстовых озёрах не превышает 0.05; такое преобладание тяжелых РЗЭ типично для водоемов преимущественно атмосферного питания. В поверхностных водах La*/Lu* колеблется от 0.1 до 0.2, в подповерхностном стоке склоновых ложбин стока – превышает 0.2. Аналогично, соотношение Nd/Yb минимально в приводораздельных термокарстовых озерах, менее 2.0, тогда как в поверхностных водотоках оно колеблется между 4.0 и 5.0, а в склоновых ложбинах стока – превышает 6.0, что указывает на преобладающий вклад быстрого подповерхностного стока. Наши результаты подтверждают, что склоновые ложбины стока – пути активного выноса растворенных веществ из тундровых ландшафтов.

Удельные потоки КАГ. На участке сухой фоновой тундры медианный УП CO₂ составил 147.9 мгС/(м²·ч), при этом в межложбинном пространстве он равен 104.8 мгС/(м²·ч), а в пределах ложбин стока – 174.6 мгС/(м²·ч). При допущении, что ложбины стока и межложбинные пространства на склонах занимают примерно равные площади, средний УП с поверхности склона существенно не изменился. Впрочем, от сезона к сезону и от года к году соотношение УП CO₂ с ложбин стока, межложбинных пространств и фоновой тундры может меняться; кроме того, для оценки нетто-статуса экосистем необходимы более детальные исследования. Что касается метана, то и склоновые ложбины стока, и межложбинные поверхности на момент проведения работ демонстрировали нулевые удельные потоки, то есть не являлись ни эмитентами, ни поглотителями СН₄.

Выводы. Склоновые ложбины стока распространены повсеместно на арктических склонах. На исследованном участке Яно-Индигирского междуречья ложбины стока формируют гидрографическую сеть и выступают основными путями переноса растворенных веществ, включая РОУ и микроэлементы, концентрация которых выше содержания большинства главных ионов. При этом приводораздельные термокарстовые озера в вершинах ложбин стока, как показывают гидрохимические данные, не принимают существенного участия в питании этих ложбин. Аналогично, вытаивание подземных льдов не оказывает существенного влияния на химический состав вод, дренируемых склоновыми ложбинами стока, однако такое влияние нами установлено для эрозионного вреза с водотоком, открывающегося в долину р. Аллаиха, по значительному содержанию в воде сульфатов. Таким образом, химический состав вод склоновых ложбин стока формируется вследствие выщелачивания органического горизонта почв, при котором происходит

обогащение атмосферных осадков растворенным органическим веществом, легкими РЗЭ, железом и алюминием, а воды приобретают характерную кислую реакцию. По нашим оценкам, дифференциация склоновых поверхностей, связанная с развитием склоновых ложбин стока, не меняет средние УП диоксида углерода, однако этот вывод не учитывает межгодовой и сезонной вариации интенсивности почвенного дыхания, а также другие составляющие нетто-обмена экосистем.

Благодарность. Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект №21-55-75004.

Литература

1. Тананаев Н.И. Подбор оптимальной модели климатического реанализа по среднегодовой температуре воздуха для территории Республики Саха (Якутия) // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». 2023. №2. С. 88–101.

2. Bastviken D., Sundgren I., Natchimuthu S., Reyier H., Gålfalk M., 2015. Technical Note: Cost-efficient approaches to measure carbon dioxide (CO₂) fluxes and concentrations in terrestrial and aquatic environments using mini loggers. *Biogeosciences* 12(12), 3849–3859.

3. Beel C.R., Lamoreux S.F., Orwin J.F., Pope M.A., Lafreniere M.J., Scott N.A., 2020. Differential impact of thermal and physical permafrost disturbances on High Arctic dissolved and particulate fluvial fluxes. *Scientific Reports* 10, 11836.

4. Cassidy A.E., Christen A., Henry G.H.R., 2016. The effect of a permafrost disturbance on growing-season carbon-dioxide fluxes in a high Arctic tundra ecosystem. *Biogeosciences* 13, 2291–2303.

5. Harms T.K., Rocher-Ros G., Godsey S.E., 2020. Emission of greenhouse gases from water tracks draining Arctic hillslopes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 125(12), e2020JG005889.

6. Heffernan L., Kothawala D.N., Tranvik L.J., 2023. Review article: A systematic review of terrestrial dissolved organic carbon in northern permafrost. *The Cryosphere* (accepted for publication), doi: 10.5194/tc-2023-152.

7. Manasypov R., Pokrovsky O., Kirpotin S., Shirokova L., 2014. Thermokarst lake waters across the permafrost zones of western Siberia. *The Cryosphere* 8, 1177–1193.

8. Oberbauer S.F., Tenhunen J.D., Reynolds J.F., 1991. Environmental effects on CO₂ efflux from water track and tussock tundra in Arctic Alaska, U.S.A. *Arctic and Alpine Research* 23(2), 162–169.

9. Rantanen M., Karpechko A., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A., 2022. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment* 3, 168.

10. Roberts K.E., Lamoureux S.F., Kyser T.K., Muir D.C.G., Lafreniere M.J., Iqaluk D., Pienkowski A.J., Normandeau A., 2017. Climate and permafrost effects on the chemistry and ecosystems of High Arctic lakes. *Scientific Reports* 7, 13292.

11. Tananaev N., Lotsari E., 2022. Defrosting northern catchments: Fluvial effects of permafrost degradation. *Earth-Science Reviews* 228, 103996.