ISSN 2618-9712 (Print) http://no.ysn.ru

Экология

УДК 581.13:630*187:551.34
DOI 10.31242/2618-9712-2018-26-4-89-96

Изучение межгодовой и сезонной динамики изменчивости баланса углерода и многолетнемерзлых пород в типичной тундровой экосистеме на Северо-востоке России

Р.Е. Петров, Т.Х. Максимов, С.В. Карсанаев

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия
tcmax@mail.ru

Аннотация. *Последние десятилетия тундровые экосистемы Арктики претерпевают существенные изменения. Выбросы парниковых газов в процессе таяния мерзлоты из замороженного органического углерода имеют значительный потенциал усиления влияния изменения климата в данном регионе. Таяние и деградация многолетнемерзлых пород наблюдаются на многих циркумполярных исследовательских станциях. Нами проведен анализ данных многолетних комплексных наблюдений за динамикой растительности и многолетней мерзлоты на тундровой станции «Чокурдах» мониторинговой сети SakhaFluxNet. Потоки углекислого газа и метана были измерены в типичной тундровой экосистеме, расположенной в низменности р. Индигирка на Северо-Востоке России. Общие потоки углекислого газа здесь были выше по сравнению с другими участками с чистым углекислотным газообменом экосистемы (NEE) = –92 гСм$^{-2}$год$^{-1}$, состоящим из почвенного дыхания экосистемы (Reco), равного 141 гСм$^{-2}$год$^{-1}$ и валовой первичной продукции тундровой растительности (GPP) = –232 гСм$^{-2}$год$^{-1}$. Большое поглощение углерода может быть объяснено континентальным климатом участка с низкими зимними температурами почвы (–14 °С), которые снижают уровень почвенного дыхания, и коротким, но относительно теплым летом (10,4 °С), стимулирующим высокие темпы фотосинтеза. Поток метана составлял 28 гС-CO$_2$м$^{-2}$год$^{-1}$, так что баланс парниковых газов равен –64 гС-CO$_2$м$^{-2}$год$^{-1}$. Потоки метана весьма чувствительны к гидрологическим условиям и растительному составу участка. Была изучена важность состава растительных сообществ и рельефа поверхности для защиты активного слоя многолетнемерзлых пород и направления потока углерода. Показана сильная уязвимость арктической тундры даже к мелкомасштабным изменениям растительного покрова. Развитие талого пруда после удаления кустарничковой растительности преобразовало участки в нашем эксперименте от стока метана к его источнику. Данные, репрезентативные для тундровых экосистем, проанализированы с целью выделения трендов, изучения межгодовой и сезонной изменчивости баланса углерода. В настоящее время тундровые экосистемы являются слабыми стоками углерода по сравнению с мерзлотными лесными экосистемами Северо-Востока России. По нашим многолетним данным, полученным с помощью системы вихревой ковариации, годовой сток углерода в тундровых экосистемах равен –0,7 ± 0,2 тСга$^{-1}$год$^{-1}$, а в лиственничном лесу составляет 2,0 ± 0,5 тСга$^{-1}$год$^{-1}$. Аппроксимация многолетних данных едди-ковариации указывает на положительный тренд увеличения стока углерода в будущем в тундровых экосистемах вследствие изменения климата и расширения ареала произрастания древесных и кустарниковых видов на Север.*

Ключевые слова: тундра, многолетнемерзлые породы, изменение климата, растительный покров, баланс углерода.

Благодарности. *Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственных заданий ИБПК СО РАН (№ гос. регистрации 01201282193).*

DOI 10.31242/2618-9712-2018-26-4-89-96

Studies of interannual and seasonal variability of balance of carbon and permafrost rock mass in typical tundra ecosystem in Northeast of Russia

R.E. Petrov, T.Kh. Maximov, S.V. Karsanaev

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia
tcmax@mail.ru

Abstract. *In past decades, tundra ecosystems in the Arctic rapidly changed. Greenhouse gases emission from frozen organic carbon after permafrost thaw have the higher potential to increase effect of climate change in this region. Thawing and degradation of permafrost have been observed in many circumpolar research sites. The analysis of the multiyear complex observations of vegetation and permafrost dynamics in the tundra station «Chokurdakh» of SakhaFluxNet were carried out in this study. Carbon dioxide and methane fluxes in the typical tundra ecosystem in the Indigirka river lowlands in the Northeast of Russia were measured. The net carbon dioxide fluxes were higher compared to other sites, with a net ecosystem gas exchange (NEE) = –92 $gCm^{-2}yr^{-1}$, which is composed of soil respiration of the ecosystem (Reco) = 141 $gCm^{-2}yr^{-1}$ and gross primary production of tundra vegetation (GPP) = –232 $gCm^{-2}yr^{-1}$. This large carbon sink could be explained by the continental climate of the site with low winter soil temperatures (–14 ℃) that decrease the respiration rates, and short, but relatively warm summers (10.4 ℃), stimulating high photosynthesis rates. The methane flux was 28 $gC\text{-}CO_2m^{-2}yr^{-1}$, so that the greenhouse gas balance was −64 $gC\text{-}CO_2m^{-2}yr^{-1}$. The methane fluxes were highly sensitive to hydrological conditions and vegetation composition of the site. The importance of the vegetation composition and surface topography for protection of the active layer of permafrost and direction of the carbon flux were investigated. The strong vulnerability of the Arctic tundra even to small-scale changes of vegetation cover was shown. The development of a thaw pond after removing the shrub shifted the plots in our experimental site from a sink of methane into a source. The representative data for the tundra ecosystems, interannual and seasonal variability of the carbon balance are analyzed for the purpose of identification of trends. Nowadays, the tundra ecosystems are weak stock of carbon in comparison with the permafrost forest ecosystems of the Northeast of Russia. According to our long-term eddy-covariance data, the annual carbon sink in the tundra – 0.7 ± 0.2 $tCha^{-1}yr^{-1}$, in the larch forest is 2.0 ± 0.5 $tCha^{-1}yr^{-1}$. An approximation of the long-term data of eddy-covariance indicates the positive trend of an increase in the accumulation of carbon in the future in the tundra ecosystems owing to the climate change and expansion of an area of growth of tree and shrub species to the North.*

Key words: tundra, permafrost rock mass, climate change, vegetation, carbon balance.

Acknowledgments. *Financial support for the research was carried out from the federal budget for fulfillment of state tasks of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS (state registration No. 01201282193).*

Введение

Тундровые экосистемы покрывают площадь 8,7 млн. км^2, из них 32 % приходится на Россию [1]. Тундровые биогеоценозы играют важную роль в глобальном круговороте углерода, почвы этой зоны содержат 200 Пг С, что соответствует 30 % от глобального пула углерода, запасенного в педосфере Земли [2]. Прогноз повышения среднегодовой температуры воздуха в Арктике на 5 °С к концу XXI века [3] приведет к деградации многолетней мерзлоты, что ускорит процессы разложения органического вещества и высвобождения углекислого газа из верхнего слоя многолетнемерзлых пород [4]. Депонированный углерод в почвах лесных и тундровых экосистем Якутии насчитывает 17,1 Пг С (всего 125,5 млн. га леса и 37 млн. га тундры). Это около 7 и 25 % общего запаса углерода в лесных почвах Сибири и России [5].

По нашим оценкам, основанным на полевых исследованиях, годовой сток углерода в тундровые экосистемы России составляет 263 Тг [1]. Таким образом, стабильность углекислотного пула тундровой зоны России прямо влияет на скорость и направления климатических изменений Арктики в глобальных масштабах.

По мнению ряда ученых [4, 6, 7], потепление в Арктике будет благоприятно для продвижения древесной и кустарничковой растительности на Север, что отразится также на энергетическом балансе системы «Земля–атмосфера». Исследования, проведенные в Аляске, показывают, что

негативное влияние повышения летних температур воздуха на мощность активного слоя сглаживается растительным покровом [8]. В условиях глобального изменения климата в сторону потепления зимних и весенних месяцев в регионах высоких широт таяние снега происходит раньше, а вегетационный период становится длиннее, что отмечается по всей Арктике [6]. Это может привести к следующим сценариям: первый предусматривает увеличение поглотительной способности тундровых экосистем за счет продолжительности вегетационного периода и фотосинтетической активности растительных сообществ [9]; а второй – увеличение выброса метана за счет оттаивания активного слоя многолетней мерзлоты и повышения увлажненности полигональной тундры [1, 7, 10, 11].

Основной целью наших исследований было изучение потока углерода в системе «Земля-атмосфера» в типичной тундровой экосистеме на Северо-Востоке России.

Были поставлены следующие задачи:

1. Провести исследования криогенной структуры исследуемой местности для прогнозирования влияния изменения климата на многолетнюю мерзлоту.

2. Выявить региональные особенности потока углерода тундровых экосистем в изменяющемся климате.

Материалы и методы

Исследования проводились на тундровой станции «Чокурдах» ИБПК СО РАН (70°49’44.9" с.ш., 147°29'39.4" в.д., высота 48 м н.у.м.), входящей в региональную мониторинговую сеть SakhaFluxNet. Станция расположена в 30 км к северо-западу от п. Чокурдах (Аллаиховский улус) на территории государственного природного заказника «Кыталык» Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия). Годовое количество осадков составляет 220 мм, толщина снежного покрова достигает 50–60 см.

Исследования криоструктуры многолетней мерзлоты были проведены с использованием кернов диаметром 5 см, отобранных с помощью мотобура Earth auger TIA-350S (Tanaka, Япония). Изотопный состав воды из кернов был проанализирован в лаборатории Университета Хоккайдо (Япония) равновесным методом $CO_2/H_2/H_2O$ на изотопном анализаторе Delta V (Thermo Fisher Scientific, Германия) с газоанализаторным модулем (Thermo Fisher Scientific, США) [12].

Чистый углекислотный газообмен экосистемы (NEE) определялся методом эдди-ковариации. Аппаратная часть системы вихревой ковариации с частотой измерения 10 Гц состояла из инфракрасного газоанализатора открытого типа Li-7500 (Li-COR, США) и ультразвукового анемометра Gill (Великобритания). Потоки метана из тундровых экосистем измерялись фотоакустическим газоанализатором INNOVA 1412 (LumaSense, Дания).

Результаты и обсуждение

Геокриологические характеристики мерзлых пород, в том числе содержание льда и органического вещества, криостратиграфия, а также соотношения стабильных изотопов воды содержат информацию о климатических условиях окружающей среды и поверхности за период формирования многолетней мерзлоты. Соотношение содержания льда в образцах мерзлотных отложений варьировалось в широком диапазоне 40–96 %. Среднее содержание льда в пойменной зоне, за исключением районов с залеганием повторно-жильного льда, составляло 75 %, что сравнимо с содержанием льда почв (благодаря порам и сегрегационному льду) на прибрежной равнине моря Бофорта (около 80 %) [12].

Возраст повторно-жильного льда в образцах датировался поздним голоценом, а возраст льдов едом – концом плейстоцена. Источником подземного льда предположительно являлись талые воды от таяния снега, как и в повторно-жильных льдах [12].

Разнообразие геокриологических характеристик и микрорельефа на исследуемом участке объяснялось пространственным распределением криогенных структур в верхнем слое многолетней мерзлоты. Участки с преобладающим распространением морозного пучения при сегрегации льда в многолетней мерзлоте могут образовывать возвышенности, что позволяет кустарничкам и другим растениям произрастать на затопленных равнинах. Понимание пространственных изменений в геокриологических условиях важно для восстановления палеоклимата в районах залегания многолетней мерзлоты. Эта информация так же может быть использована для восстановления истории потоков парниковых газов, так потоки метана чувствительны к составу растительности тундры и гидрологическим условиям [11, 13].

Изучение растительного покрова необходимо для лучшего понимания ответной реакции многолетней мерзлоты на климатические изменения [8]. В связи с этим в 2007 г. в репрезентативном тундровом биогеоценозе нами были заложены пять экспериментальных участков, на которых была удалена вся надземная биомасса доминирующих видов листопадных кустарничков – карликовой березы (*Betula nana*), при этом были

сохранены некоторые другие кустарнички (*Salix* spp., *Vaccinium uliginosum*, *Dryas octope-tula, Ledum polustre, Vaccinium vitis-idea*), злаки, осоки, мхи и лишайники [9]. Пять контрольных участков с преобладанием карликовой березы остались не нарушенными. Изучаемая территория представляет собой слабо дренированную равнинную тундру с залеганием мощного слоя многолетнемерзлых пород. Ожидалось, что карликовая береза, как доминирующий вид, выиграет от потепления климата и увеличит свой ареал. За последующие шесть лет видовой состав растительности на участках с удаленной карликовой березой изменился в связи с переувлажнением этих участков, в то время как растительный покров на контрольных делянках оставался стабильным. В частности, *Arctagrostis latifolia* и *Eriophorum angustifolium* расширили свой ареал и колонизировали сильно увлажненные участки, до начала эксперимента они негусто росли между кустарничками.

Измерения потока метана с использованием фотоакустического полевого газоанализатора Innova и специальных почвенных камер показали эмиссию метана на опытных (0,2 мгCH_4м$^{-2}$ч$^{-1}$) и его поглощение на контрольных (–0,5 мгCH_4м$^{-2}$ч$^{-1}$) участках (рис. 1, *d*). Это согласуется с ранее измеренными отрицательными потоками метана на аналогичных участках с доминированием кустарникового покрова и положительными потоками в увлажненных депрессиях [2]. Эмиссия метана была в положительной зависимости от толщины активного слоя, влажности почвы (высоты снежного покрова и уровня грунтовых вод). К концу эксперимента наблюдались значительные изменения между контрольными и экспериментальными участками без карликовой березы (рис. 1).

Высокий уровень грунтовых вод усиливает выбросы метана в результате снижения доступного кислорода в пределах активного слоя [8]. Но при этом минимальные значения потока метана наблюдались в биогеоценозах с преобладанием мхов рода *Sphagnum* [2, 13]. Так локальные измерения суточного потока метана в областях без сфагнума были в 2 раза выше, чем на участках с его преобладанием: 8,0 ±4,7 мгCH_4м$^{-2}$ч$^{-1}$ и 4,1 ±3,1 мгCH_4м$^{-2}$ч$^{-1}$ соответственно [10]. Это объяснялось тем, что бактерии, находившиеся в симбиозе с мхами рода *Sphagnum* в анаэробных условиях из кислорода, полученного от мха, окисляли метан до двуокиси углерода. Таким образом, эти бактерии играют важную роль в круговороте углерода тундровых экосистем.

Наши результаты показывают, что даже нарушение части растительного покрова может спровоцировать начало цепи ответных реакций экосистемы на воздействие климатических факторов и тем самым ускорить термокарстовые процессы в результате которых тундровые экосистемы превращаются из стока метана в их источники. Эти факты имеют далеко идущие последствия для антропогенной деятельности в Арктике. Разработка нефтяных и газовых месторождений может привести к уничтожению растительности и сдвигу баланса парниковых газов в Арктике с потенциальными обратными связями и ускорением глобального изменением климата в высоких широтах.

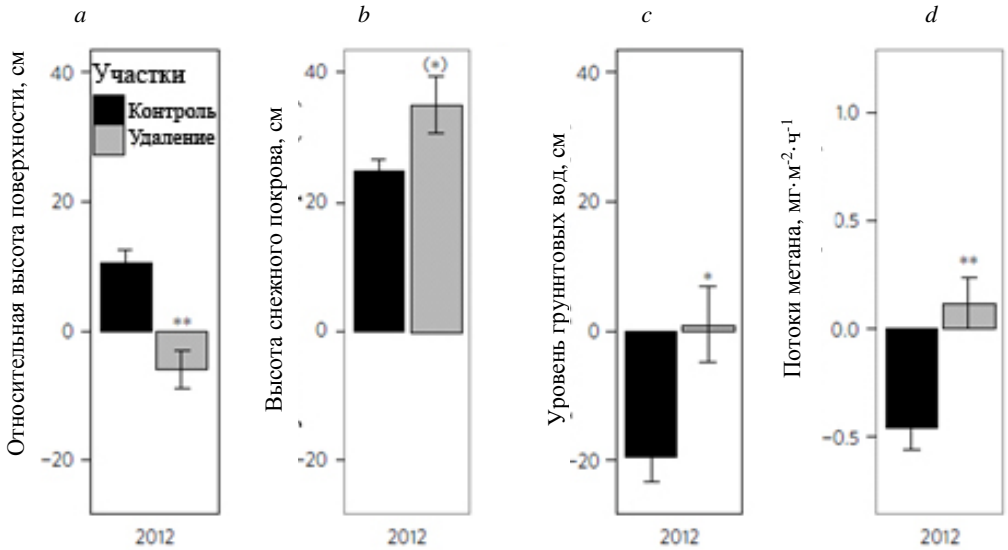

Рис. 1. Относительная высота поверхности (*a*), высота снежного покрова (*b*), уровень грунтовых вод (*c*) и потоки метана (*d*) на контрольном и экспериментальном участках в 2012 г. [8]

Fig. 1. Relative surface elevation (*a*), snow depth (*b*), groundwater level (*c*) and methane flux (*d*) in control and removal plots in 2012 [8]

В результате многолетних исследований нами были обобщены данные наблюдений за основными компонентами углекислотного баланса или чистого экосистемного газообмена (NEE), который состоял из двух основных компонентов: депонирования углерода растительными сообществами в виде валовой первичной продуктивности (GPP) и его эмиссии тундровыми почвами в процессе экосистемного дыхания (R_{eco}). Изучение потоков парниковых газов (ПГ) на станции «Чокурдах» в северо-восточной Якутии показало следующую картину. Общая первичная продуктивность тундровых экосистем на исследуемом участке (GPP) составляла –232 гСм$^{-2}$год$^{-1}$, а дыхание почв (R_{eco}) – 141 гСм$^{-2}$год$^{-1}$. Чистый углекислотный газообмен (NEE) типичной тундровой экосистемы Северо-Востока России был равен –92 гСм$^{-2}$год$^{-1}$. Эмиссия метана на данном участке достигала 28 гСм$^{-2}$год$^{-1}$ [1]. Таким образом баланс парниковых газов в данной экосистеме был отрицательным, и участок выступает в роли стока углерода с годовой поглотительной способностью –64 гС-CO_2м$^{-2}$год$^{-1}$ (рис. 2).

Математический подсчет зимнего потока диоксида углерода на исследуемом участке имел величину 5 гСм$^{-2}$зима$^{-1}$. Схожие результаты были получены и на других мониторинговых станциях: на Аляске он варьировался в диапазоне 1,3 – 10,9 гСм$^{-2}$зима$^{-1}$, в Гренландии – 8,1 гСм$^{-2}$ зима$^{-1}$, в Воркуте – 4–6 гСм$^{-2}$зима$^{-1}$ [1]. Следовательно, значения зимних потоков в среднем составляли около 20 % от суммарного годового потока углерода. Учитывая эти данные, чистый газообмен экосистемы исследуемого участка составлял –87 гСм$^{-2}$год$^{-1}$. Этот сток углерода мог быть объяснен континентальным климатом, который выражался в низких зимних температурах почвы (–14 °С), уменьшающих интенсивность дыхания, и в коротких, сравнительно теплых летних сезонах, стимулирующих высокие темпы фотосинтеза.

Как показали сравнительные результаты наших многолетних исследований, существует значительная межгодовая вариация NEE в лиственничном лесу, тогда как в тундровой экосистеме она более сглажена (рис. 3), поскольку климатические условия из-за морского климата в тундровой зоне Якутии менее изменчивы, чем в Центральной Якутии. По многолетним эдди-ковариационным данным годовой сток углерода в лиственничном лесу составляет 2,0 ± 0,5 тС·га$^{-1}$·год$^{-1}$, а в тундровой равен –0,7 ± 0,2 тС·га$^{-1}$·год$^{-1}$ (рис. 4).

Сезонный ход баланса углекислого газа тундровой экосистемы зависел от интенсивности фотосинтеза и испарения, которые в свою очередь были лимитированы температурой воздуха ниже 4°С в начале вегетационного периода и продолжительностью солнечного дня в конце вегетационного сезона. В межгодовой динамике на поток углекислого газа так же оказывают влияние состав растительного покрова и состояние многолетней мерзлоты. Так, например, в нашем эксперименте возвышенные участки с доминированием карликовой березы выступали стоком углерода, в то время как обводненные участки с преобладанием злаков являлись его источником.

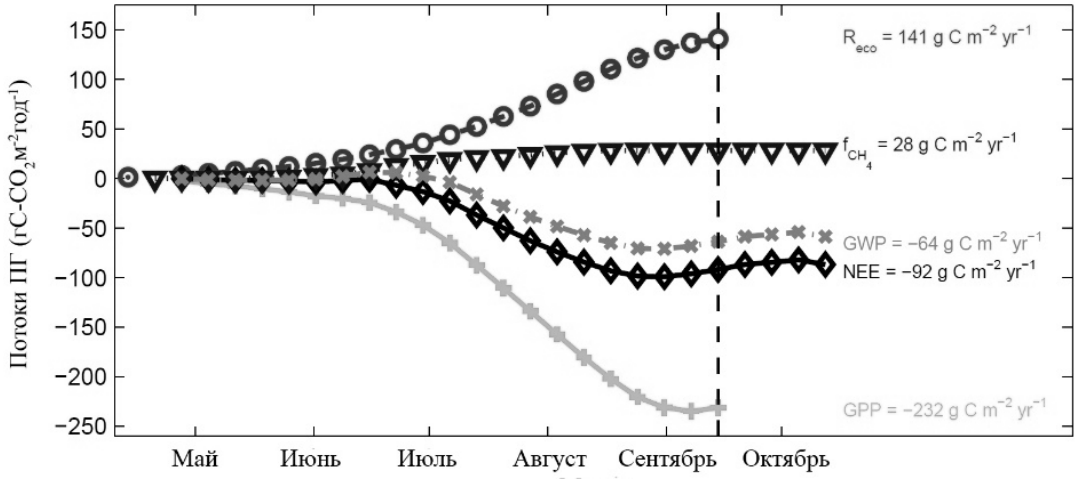

Рис. 2. Ежегодно накопительные NEE, R_{eco}, GPP потоки метана и потенциальный вклад в глобальное потепление климата (GWP). Цифры справа обозначают общий поток в середине сентября, вертикальной пунктирной линией показана дата, когда измерения системой вихревой ковариации были больше не доступны [1]

Fig. 2. Annually cumulative NEE, R_{eco}, GPP and methane fluxes and global warming potential (GWP). Numbers at right indicate total flux in mid september, vertical dashed line indicates day when eddy covariance measurements were no longer available [1]

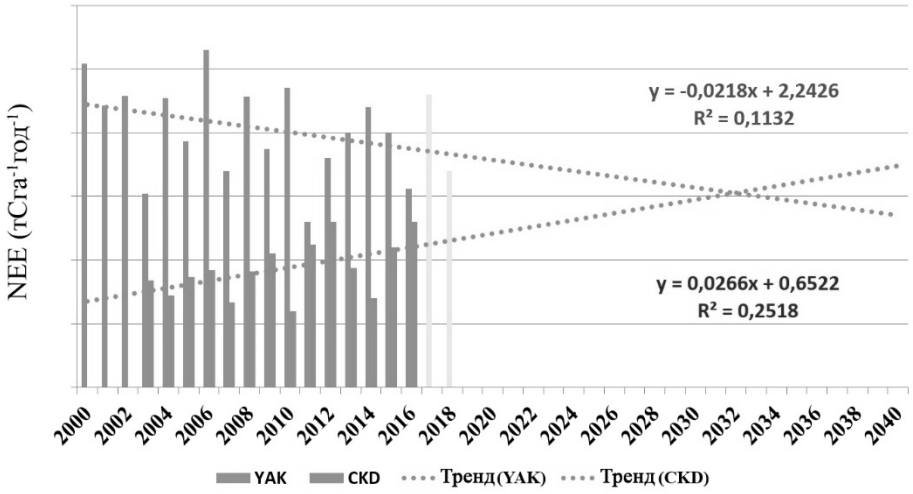

Рис. 3. Прогнозируемое изменение потоков углерода (NEE) в тундровых (CKD) и лесных (YAK) экосистемах на Северо-Востоке России

Fig. 3. Predicted changes in carbon fluxes (NEE) in tundra (CKD) and forest (YAK) ecosystems in the North-East of Russia

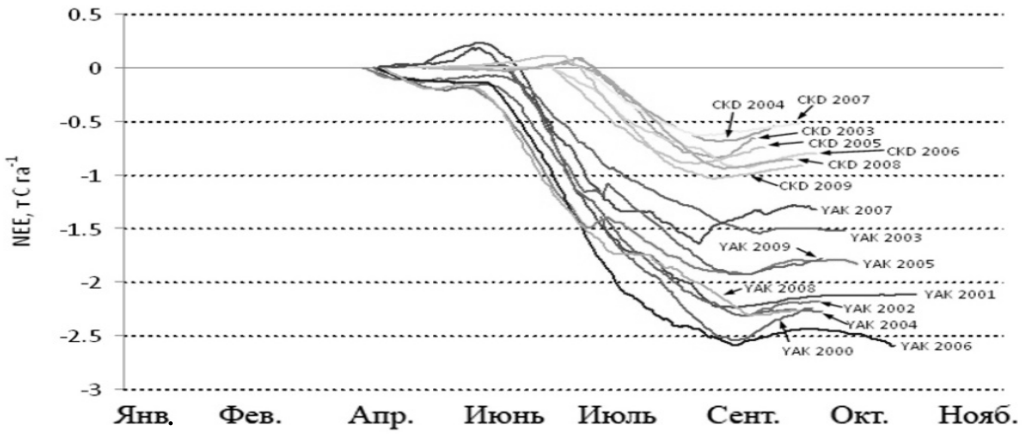

Рис. 4. Межгодовая динамика чистого CO_2-газообмена экосистемы (NEE) лесных и тундровых экосистем Якутии за 2000–2009 гг. YAK – лиственничный лес, станция «Спасская падь», Центральная Якутия; CKD – субарктическая тундра, станция «Чокурдах», северо-восточная Якутия

Fig. 4. Interannual dynamics of net ecosystem CO_2-gas exchange (NEE) for forest and tundra ecosystems of Yakutia, in 2000–2009. YAK – larch forest, Spasskaya Pad station, Central Yakutia; CKD – subarctic tundra, Chokurdakh station, Northeast Yakutia

Нами был подсчитан чистый газообмен экосистемы (NEE) доминантных природно-климатических зон России при помощи методологии Euroflux. Выделены три группы экосистем по величине стока углерода: леса – 1,9 тСга$^{-1}$год$^{-1}$, луга (степи) – 1,1 тСга$^{-1}$год$^{-1}$ и заболоченные территории, включая тундру – 0,5 тСга$^{-1}$год$^{-1}$.

Результаты статистически достоверных данных по эдди-ковариации (1996–2017 гг.), полученных на 12 научных станциях, позволили нам количественно оценить годовые потоки углерода в трех репрезентативных биомах Российской Федерации. Установлено, что в мерзлотных лесах Якутии заметно преобладает сток углерода по сравнению со всеми исследованными биомами России. В лиственничных и сосновых лесах субарктической зоны лесов Якутии стоки углерода составляют 2 тСга$^{-1}$год$^{-1}$ и 2,7 тСга$^{-1}$год$^{-1}$ соответственно. Это в среднем в 1,5 и 4,5 раза больше, чем в лугах и тундрах России (станция «Чокурдах»), соответственно.

Годовой сток углерода в тундровой зоне в 3 раза меньше, чем в бореальных лесах. Многолетний анализ NEE тундровой станции «Чокурдах» показывает тенденцию повышения годового стока углерода (северо-восток Якутии) по сравнению с лесными биомами (Центральная Якутия) (рис. 3).

И напротив, в лесной экосистеме Якутии наблюдается отрицательная тенденция понижения стока углерода в результате усиления крио-

генных процессов (увеличения сезонноталого слоя на 70–80 см), сукцессионного изменения видового разнообразия – большим отпадом деревьев, увеличением численности и доминирования травянистых растений в подстилке леса вместо предыдущих полукустарничковых видов. При временной аппроксимации существующих негативных и положительных тенденций годового аккумулирования углерода лесных и тундровых экосистем возможно нивелирование этих величин к 2030–2040 гг.

Заключение

В настоящее время тундровые экосистемы являются слабыми стоками углерода по сравнению с мерзлотными лесными экосистемами Северо-Востока России. Аппроксимация многолетних данных едди-ковариации указывает на положительный тренд увеличения стока углерода в будущем в тундровых экосистемах вследствие изменения климата и расширения ареала произрастания кустарниковых видов.

Для количественного прогноза смещения баланса углерода в тундровых экосистемах Северо-Востока России при глобальном изменении климата необходимы длительные измерения аккумулирующей способности тундр на постоянных станциях наблюдений и разработка адекватных моделей регионального и глобального баланса углерода в растительных сообществах.

Результаты этих исследований могут быть использованы в качестве фактического материала для верификации и оценки углеродного пула России, что будет способствовать разработке мероприятий по адаптации и смягчению последствий глобального изменения климата и являться дополнительным стимулом для охраны мерзлотных экосистем.

Литература

1. *Van der Molen M.K., van Huissteden J., Parmentier Frans-Jan, Petrescu A.M.R., Dolman A.J., Maximov T.C., Kononov A.V., Karsanaev S.V., Suzdalov D.A.* The growing season greenhouse gas balance of a continental tundra site in the Indigirka lowlands, NE Siberia // Biogeosciences. 2007. V. 4(6). P. 985–1003.

2. *Parmentier F-J.W., van Huissteden J., van Der Molen M.K., Schaepman-Strub G., Karsanaev S.A., Maximov T.C., Dolman A.J.* Spatial and temporal dynamics in eddy covariance observations of methane fluxes at a tundra site in northeastern Siberia // Journal of Geophysical Research. 2011. V. 116(3). P. G03016. DOI: 10.1029/2010JG001637.

3. *IPCC*: 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.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.

4. *Максимов Т.Х.* Круговорот углерода в лиственничных лесах якутского сектора криолитозоны: Дис. … д-ра биол. наук. Красноярск, 2007. 303 с.

5. *Максимов Т.Х., Долман А.Й., Муре Э.Й., Ота Т., Сугимото А., Иванов Б.И.* Параметры круговоротов углерода и воды в лесных экосистемах криолитозоны // Докл. РАН. 2005. Т. 404, вып. 8. С. 684–686.

6. *Анисимов О.А., Шерстюков А.Б.* Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли. 2016. Т. XX, вып. 2. С. 90–99.

7. *Zimov N.S., Zimov S.A., Zimova A.E., Zimova G.M., Chuprynin V.I., Chapin III F.S.* Carbon storage in permafrost and soils of the mammoth tundra-steppe biome: Role in the global carbon budget // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. P. L02502. DOI: 10.1029/2008GL036332.

8. *Nauta A.L., Heijmans M.P.D., Blok D., Limpens J., Elberling B., Gallagher A., Li B., Petrov R.E., Maximov T.C., van Huissteden J., Berendse F.* Permafrost collapse after shrub removal shifts tundra ecosystem to a methane source // Nature Climate Change. 2015. V. 5. P. 67–70. DOI: 10.1038/nclimate2446.

9. *Blok D., Heijmans M.M.P.D., Schaepman-Strub G., Kononov A.V., Maximov T.C., Berendse F.* Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra // Global Change Biology. 2010. V. 16. P. 1296–1305. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02110.x.

10. *Van Huissteden J., Dolman A.J.* Soil carbon in the Arctic and the permafrost carbon feedback // Current Opinion in Environmental Sustainability. 2012. V. 4(5). P. 545–551. DOI: 10.1016/j.cosust.2012.09.008.

11. *Kwon H.-J., Oechel W.C., Zulueta R.C., Hastings S.J.* Effects of climate variability on carbon sequestration among adjacent wet sedge tundra and moist tussock tundra ecosystems // Journal of Geophysical Research. 2006. V. 111. P. G03014. DOI: 10.1029/2005JG000036.

12. *Iwahana G., Takano S., Petrov R.E., Tei S., Shingubara R., Maximov T.C., Fedorov A.N., Desyatkin A.R., Desyatkin R.V., Nikolaev A.N.* Geocryological characteristics of the upper permafrost in tundra-forest transition of the Indigirka River Valley, Russia // Polar Science. 2014. V. 8. P. 96–113. DOI: 10.1016/j.polar.2014.01.005.

13. *Van Huissteden J., Maximov T.C., Dolman A.J.* High methane flux from an Arctic floodplain (Indigirka lowlands, Eastern Siberia) // Journal of Geophysical Research. 2005. V. 110. P. G02002. DOI: 10.1029/2005JG000010.

References

1. *Van der Molen M.K., van Huissteden J., Parmentier Frans-Jan, Petrescu A.M.R., Dolman A.J., Maximov T.C., Kononov A.V., Karsanaev S.V., Suzdalov D.A.* The growing season greenhouse gas balance of a continental tundra site in the Indigirka lowlands, NE Siberia // Biogeosciences. 2007. V. 4 (6). P. 985–1003.

2. *Parmentier F-J.W., van Huissteden J., van der Molen M.K., Schaepman-Strub G., Karsanaev S.A., Maximov T.C., Dolman A.J.* Spatial and temporal dynamics in eddy covariance observations of methane fluxes at a tundra site in northeastern Siberia // Journal of Geophysical Research. 2011. V. 116 (3). P. G03016. DOI: 10.1029/2010JG001637.

3. *IPCC*: 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.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.

4. *Maximov T.Kh.* Krugovorot ugleroda v listvennichnykh lesakh yakutskogo sektora kriolitozony: dis. … d-ra biol. nauk. Krasnoyarsk, 2007. 303 s.

5. *Maximov T.Kh., Dolman A.J., Moors E.J., Ohta T., Sugimoto A., Ivanov B.I.* Parametry krugovorotov ugleroda i vody v lesnykh ekosistemakh kriolitozony// Doklady RAN. 2005. T. 404, vyp. 8. S. 684–686.

6. *Anisimov O.A., Sherstyukov A.B.* Otsenka roli prirodno-klimaticheskikh faktorov v izmeneniyakh kriolitozony Rossii // Kriosfera Zemli. 2016, T. XX, vyp. 2. S. 90–99.

7. *Zimov N.S., Zimov S.A., Zimova A.E., Zimova G.M., Chuprynin V.I., Chapin III F.S.* Carbon storage in permafrost and soils of the mammoth tundra-steppe biome: Role in the global carbon budget // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. P. L02502. DOI: 10.1029/2008GL036332.

8. *Nauta A.L., Heijmans M.P.D., Blok D., Limpens J., Elberling B., Gallagher A, Li B., Petrov R.E., Maximov T.C., van Huissteden J., Berendse F.* Permafrost collapse after shrub removal shifts tundra ecosystem to a methane source // Nature Climate Change. 2015. V. 5. P. 67–70. DOI: 10.1038/ nclimate2446.

9. *Blok D., Heijmans M.M.P.D., Schaepman-Strub G., Kononov A.V., Maximov T.C., Berendse F.* Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra // Global Change Biology. 2010. V. 16. P. 1296–1305. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02110.x.

10. *Van Huissteden J., Dolman A.J.* Soil carbon in the Arctic and the permafrost carbon feedback // Current Opinion in Environmental Sustainability. 2012. V. 4 (5). P. 545–551. DOI: 10.1016/j.cosust. 2012.09.008.

11. *Kwon H.-J., Oechel W.C., Zulueta R.C., Hastings S.J.* Effects of climate variability on carbon sequestration among adjacent wet sedge tundra and moist tussock tundra ecosystems // Journal of Geophysical Research. 2006. V. 111. P. G03014. DOI: 10.1029/2005JG000036.

12. *Iwahana G., Takano S., Petrov R.E., Tei S., Shingubara R., Maximov T.C., Fedorov A.N., Desyatkin A.R., Nikolaev A.N., Desyatkin R.V., Sugimoto A.* Geocryological characteristics of the upper permafrost in tundra-forest transition of the Indigirka River Valley, Russia // Polar Science. 2014. V. 8. P. 96–113. DOI: 10.1016/j.polar.2014.01.005.

13. *Van Huissteden J., Maximov T.C., Dolman A.J.* High methane flux from an Arctic floodplain (Indigirka lowlands, Eastern Siberia) // Journal of Geophysical Research. 2005. V. 110. P. G02002. DOI: 10.1029/2005JG000010.

Поступила в редакцию 14.10.2018

Об авторах

ПЕТРОВ Роман Егорович, младший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия,
http://orcid.org/0000-0002-6877-3902, pre2003@mail.ru;
МАКСИМОВ Трофим Христофорович, доктор биологических наук, зав. лабораторией, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия,
http://orcid.org/0000-0001-7003-5653, tcmax@mail.ru;
КАРСАНАЕВ Сергей Валерьевич, лаборант, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия,
biokars@mail.ru.

About the authors

PETROV Roman Egorovich, Junior Researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenin Ave., Yakutsk, 677980, Russia,
http://orcid.org/0000-0002-6877-3902, pre2003@mail.ru;
MAXIMOV Trofim Khristoforovich, Doctor of Biological Sciences, Head of Laboratory, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenin Ave., Yakutsk, 677980, Russia,
http://orcid.org/0000-0001-7003-5653, tcmax@mail.ru;
KARSANAEV Sergey Valer'evich, Assistant, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenin Ave., Yakutsk, 677980, Russia,
biokars@mail.ru.