

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 574.4.001.57:581.526.533

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ УГЛЕРОДНЫХ ПОТОКОВ В ТУНДРОВЫХ ЛАНДШАФТАХ

Д. Г. Замолодчиков*, Д. В. Карелин*^{***}, А. И. Иващенко**

* *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, 117418, Новочеремушкинская ул., 69, Россия*

* *Московский государственный университет, биологический ф-т, 119899, Москва, Воробьевы горы, Россия*

Для характеристики углеродного цикла ландшафта типичной тундры Северо-Западного Таймыра использован геоинформационный подход. Основными частями построенной ГИС являются: 1) компьютерная карта границ тундровых биогеоценозов, 2) база данных по суточным погодным параметрам, 3) модель сезонной динамики надземной фитомассы, 4) имитационная модель углеродных потоков. Оценены сезонные углеродные потоки (валовое дыхание, валовая продукция, чистый поток) для слагающих ландшафт биогеоценозов. Сезонный углеродный баланс (июнь—сентябрь) ландшафта охарактеризован как близкий к нулевому. Проведен компьютерный эксперимент, имитирующий влияние изменений температуры и облачности на углеродный баланс ландшафта типичных тундр.

Углеродный цикл, тундра, ландшафт, геоинформационная система, глобальные изменения

GEOINFORMATION-APPROACH TO INVESTIGATION OF CARBON FLUXES IN TUNDRA LANDSCAPES

D. G. Zamolodchikov*, D. V. Karelin*^{***}, A. I. Ivashchenko**

* *Center for problems of ecology and productivity of forests, RAS, 117418, Moscow Novocheryomushkinskaya, 69, Russia*

** *Moscow State University, Department Biological, 119899, Moscow, Vorobjovy Gory, Russia*

GIS-approach is used for the estimation of the carbon balance of the typical subarctic tundra landscape. Main parts of the created GIS are: 1) a computer map of tundra ecosystems borders, 2) database on diurnal weather parameters, 3) a model of aboveground plant biomass dynamics, 4) a simulation model of carbon fluxes. Seasonal carbon fluxes (gross respiration, gross primary production, net flux) are estimated for ecosystems of the tundra landscape. Seasonal carbon balance (June—September) of the landscape is found to be close to zero. Computer experiment simulated the influence of temperature and cloudiness changes on carbon balance of the typical subarctic tundra landscape.

Carbon balance, tundra, landscape, geographic-information system, global change

ВВЕДЕНИЕ

Геоинформационный подход в науках о Земле, как правило, используется при интеграции карт и баз данных для крупных регионов, например, стран или природных зон. Однако указанный подход может быть полезным и в исследованиях ландшафтного уровня. Известно, что разные типы тундровых биогеоценозов имеют различные параметры углеродного баланса в пределах одного ландшафта. Биогеоценозы с бугорковым и кочкарным микрорельефом часто выступают в качестве источника углерода для атмосферы, в то время как заболоченные депрессии и ложбины — его стока. Таким образом, характеристика углеродного баланса ландшафта невозможна без учета пространственной пред-

ставленности слагающих его биогеоценозов (за исключением проведения прямых определений углеродного баланса ландшафта микрометеорологическими или аэродинамическими методами).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В теплый период 1993 и 1994 гг. нами были проведены полевые исследования потоков углекислого газа в различных типах биогеоценозов типичных тундр в окрестностях бывшего Таймырского биологического стационара (Тарей, 73°15' N, 90°36' E). В каждом исследуемом биогеоценозе располагалось от 1 до 4 пробных пло-

шадей (в среднем 3), на которых с интервалом 7—15 дней проводились измерения потоков CO₂ камерным методом с применением портативного инфракрасного газоанализатора LiCor-6200. За сутки на каждой пробной площади производилось около 24 замеров, интегрированием мгновенных величин рассчитывали суточные величины потоков. Растительный покров при измерениях не срезался, таким образом, регистрировались чистый поток углерода (NF) в прозрачной камере, валовое дыхание биогеоценоза (GR) в затемненной камере и по их разности рассчитывалась валовая первичная продукция (GPP). Поскольку GR и GPP являются разнонаправленными потоками, им были присвоены разные знаки, а именно, знак „плюс“ — дыханию, и „минус“ — продукции. Величина NF может иметь разный знак, являясь отрицательной для стока углерода и положительной для его источника. Суточные углеродные потоки для каждой измеренной пробной площади рассчитывались интегрированием данных по суточной динамике (не менее 20 замеров за сутки). Комплекс полевых работ включал в себя также регистрацию погодных характеристик, динамики глубины активного слоя, определения надземной фитомассы, влажности почвы и прочих экологических параметров.

Рельеф, климат, растительность и почвы района исследований детально описаны в ряде известных работ [Биогеоценозы ..., 1971; Матвеева, 1977 и др.]. Остановимся подробнее на растительности биогеоценозов, в которых измерялись потоки CO₂, а именно, дриадово-осоково-моховой мелкобугорковой тундры и полигонального тундрово-болотного комплекса. Растительные ассоциации этих биогеоценозов разделяются на микрогруппировки, приуроченные к формам микро рельефа [Матвеева, 1977]. Бугорки покрыты кустарничково-мохово-лишайниковыми сообществами, западины между ними заняты осоково-моховыми ассоциациями. Полигональный комплекс состоит из трех частей, включающих кустарничково-травяно-моховую ассоциацию в центральных частях полигонов, закраины вокруг центральных частей полигонов, поросшие кустарником, и осоково-пушицевой-

моховую ассоциацию в заболоченных трещинах вокруг полигонов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полевые исследования. Проведенные полевые работы позволили получить данные по балансу CO₂ для основных типов тундровых биогеоценозов со следующими растительными группировками: кустарничковой, кустарничково-осоковой, пушицевой-осоковой, осоковой и пушицево-осоковой. В табл. 1 приведены величины суточных углеродных потоков, усредненные по всем пробным площадям, измеренным за два полевых сезона в данном биогеоценозе (период измерений составлен из краевых дат измерений без учета года). Можно отметить, что разные биогеоценозы характеризуются различными измеренными величинами валового дыхания, валовой продукции и чистого потока.

Геоинформационный подход. Для ландшафтной характеристики углеродного цикла был использован геоинформационный подход. Основными частями построенной ГИС являлись: 1) компьютерная карта границ тундровых биогеоценозов; 2) база данных по суточным погодным параметрам; 3) модель сезонной динамики надземной фитомассы; 4) имитационная модель углеродных потоков.

В качестве топографической основы для компьютерной карты послужила опубликованная Н. В. Матвеевой (1978) геоботаническая карта растительных ассоциаций (биогеоценозов) окрестностей Таймырского стационара. Карта охватывает площадь 23,5 км² и включает границы биогеоценозов, озер и рек. Сопоставление с нынешними (1994 г.) границами ассоциаций показало отсутствие существенных изменений и пригодность карты для современных оценок. Компьютерное отображение карты было осуществлено в системе IDRISI.

Исходный вариант карты включает 36 типов растительных ассоциаций. Однако подавляющее большинство из них являются комплексными и могут быть представлены как комбинации небольшого числа более простых гомогенных ассоциаций. Пять из этих простейших ассоциаций

Таблица 1. Средние величины потоков углекислого газа в различных формах микро рельефа ландшафта тундровой тундры (Северо-Западный Таймыр) в 1993—1994 гг.

Форма микро рельефа	Группировка растительности	Период измерений	Кол-во пробных площадей	Потоки CO ₂ , гC·м ⁻² ·сут ⁻¹		
				валовое дыхание	валовая продукция	чистый поток
Бугорки	Кустарничковая	10.VII—14.IX	22	1,066	-0,747	0,319
Низины	Осоковая	10.VII—14.IX	24	1,598	-1,899	-0,300
Центры полигонов	Кустарничково-травяная	27.VII—11.IX	16	1,829	-2,186	-0,357
Закраины полигонов	Кустарничковая	27.VII—11.IX	6	1,670	-1,807	-0,137
Трещины	Осоково-пушицевая	23.VII—11.IX	10	1,702	-2,543	-0,841

(кустарниковая, кустарничковая, кустарничково-травяная, осоковая и пушицево-осоковая) формируют практически все разнообразие экосистем типичной субарктической тундры в районе Тарей. Подробности методики пересчета состава 36 типов биогеоценозов через простейшие ассоциации приведены в специальной работе [Карелин и др., 1996].

Как известно, величины потоков CO_2 в значительной степени зависят от погодных условий. Непосредственно для района исследований мы располагали метеоданными только по дням проведения измерений газовых потоков. Для восстановления сезонной динамики были использованы данные Росгидрометцентра по стационарным метеостанциям. Они включали температуры воздуха и показатели облачности (фиксируемые в 4.00, 10.00, 16.00 и 22.00 по местному времени) с 1 мая по 31 октября за 1993—1995 гг.

К сожалению, все метеостанции (мыс Челюскин, мыс Стерлигова, оз. Таймыр, о. Диксон, Хатанга), по которым мы располагали данными, были сильно удалены от района исследований. Для выявления наиболее пригодной из них был проведен сравнительный анализ данных по всем станциям и по нашим наблюдениям. Станция Хатанга (72°0' N, 102°30' E) показала наиболее близкую к измеренной нами динамику погодных параметров.

Сложной вспомогательной задачей оказалась аппроксимация сезонной динамики фотосинтетически-активной радиации (PAR). Показатели облачности в метеосводках варьируют от 0 (отсутствие облаков) до 10 (сплошная облачность) и не могут служить прямой оценкой сезонных вариаций солнечной радиации. Для восстановления динамики PAR нами были использованы методы отечественной метеорологии [Берлянд, 1961; Соколихина, 1994].

Регрессионный анализ показал, что восстановленные и измеренные величины температуры воздуха и PAR изменяются сходным образом, однако свободные члены уравнений являются значимыми. Поэтому прямое использование восстановленных данных в модельных уравнениях, аппроксимированных по исходным погодным данным, могло привести к систематическим ошибкам. Для удаления последних идентификации параметров уравнений, имитирующих величины потоков CO_2 , проводилась с использованием восстановленных значений погодных характеристик.

Восстановление сезонной динамики наземной фитомассы проводилось главным образом на основе наших данных по укосам с пробных площадок. Подробная информация по составу фракций в укосах, описание методов аппроксимации динамики фитомассы и принятых допущений приведены в работе [Карелин и др., 1996]. В

результате были полностью восстановлены кривые динамики основных компонентов фитомассы по всем пяти типам ассоциаций в течение вегетационного („теплого“) сезона 1994 г.

По глубине оттаивания почвы мы располагали достаточной информацией во всех ассоциациях за период полевых работ в 1994 г. Момент начала оттаивания почвы был определен по климатическим данным. Последние измерения глубины оттаивания были выполнены в начале промерзания поверхности почвы (около 10 сентября). Средняя глубина оттаивания почвы в это время составляла 41 см.

Мы не располагали достаточной информацией по динамике фитомассы и глубины оттаивания в 1993 и 1995 гг. и поэтому использовали данные 1994 г., изменив на основе метеоданных даты начала и конца теплого сезона. Очевидно, что точность восстановления динамики в этом случае ниже, чем для 1994 г. В большей степени это касается глубины оттаивания, для которой характерны значительные межгодовые флуктуации.

Уравнения потоков CO_2 были идентифицированы на основе эмпирических значений потоков CO_2 (GR , GPP , NF , $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$), фитомассы (GV — листва сосудистых растений, WSH — древесная часть кустарников и кустарничков, MM — масса мхов, ML — масса лишайников; $\text{г сухого вещества} \cdot \text{м}^{-2}$), и глубин оттаивания (TD , см), а также восстановленных значений средней, минимальной и максимальной температуры воздуха за сутки (T_{cp} , T_{min} , T_{max} , °C) и PAR ($\text{МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$). Подробное рассмотрение методики и результатов регрессионного анализа осуществлено в работе [Замолотчиков и др., 1997]. Поэтому здесь мы приведем лишь итоговые формы уравнений, полученные на основе анализа парных взаимодействий каждой из независимых переменных с GV или TD при использовании пошаговой регрессии с уровнем значимости 0,2:

$$GR = 0,001 TD (66,825 - 0,028 ML + 0,140 GV - 1,661 TD + 2,173 T_{\text{min}} + 2,126 PAR),$$

$$R^2 = 0,940, n = 82, P < 0,001; \quad (1)$$

$$GPP = 0,001 GV (-37,253 + 0,107 WSH + 0,012 MM + 0,092 ML + 0,163 GV - 1,704 T_{\text{min}} + 3,453 T_{\text{max}} - 4,064 PAR),$$

$$R^2 = 0,912, n = 82, p < 0,001; \quad (2)$$

$$NF = 0,001 GV (0,120 WSH + 0,018 MM + 0,096 ML + 2,809 T_{\text{max}} - 3,187 PAR),$$

$$R^2 = 0,649, n = 82, p < 0,001. \quad (3)$$

Как видим, значения R^2 для уравнений, описывающих валовое дыхание и GPP , очень

высоки, и объясняют более 90 % вариации исходных данных. Показатель R^2 для уравнения чистого потока намного ниже, что объективно отражает большую комплексность этой величины.

Для всех независимых переменных была восстановлена посуточная динамика с 1 мая по 31 октября за 1993—1995 гг. Это позволило вычислить суточные значения дыхания и продукции с помощью уравнений (1) и (2). Чистый поток может быть оценен с помощью уравнения (3) или как сумма дыхания и продукции. В период, когда почва находится в замерзшем состоянии (середина октября—начало июня), значения потоков были приравнены нулю.

При проверке расчетная динамика потоков углерода по имитационной модели показала удовлетворительное соответствие эмпирическим данным. Адекватность модели оценена на основе коэффициента несовпадения [Tyler, 1971]. Этот коэффициент варьирует от 0 в случае полного совпадения до 1 при полном несовпадении. Значения коэффициента несовпадения оказались равными 0,127 для дыхания, 0,101 для GPP и 0,198 — для чистого потока. Очевидно, что модель хорошо описывает процессы валового дыхания и валовой первичной продукции, при удовлетворительном описании чистого потока углерода.

Модель позволила рассчитать суммарные сезонные потоки CO_2 (от снеготаяния до полного промерзания почвы) для каждого из исследованных биогеоценозов (табл. 2). Чистый сезонный поток варьировал между ассоциациями от -51 (сток углерода; заболоченные трещины) до $+57$ (источник углерода; бугорки) $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$. Следует отметить несовпадение последовательности расположения биогеоценозов по убыванию величин дыхания и продукции в табл. 1 и 2. Это объясняется тем, что в табл. 1 представлены средние величины, оцененные по ограниченной случайной выборке измерений. Погодные и сезонные условия существенно варьировали в дни измерений, смещая в различные стороны средние величины. Величины табл. 2 представляются более устойчивыми, поскольку включают типовой расчет по всем биогеоценозам для всех суток теплого сезона.

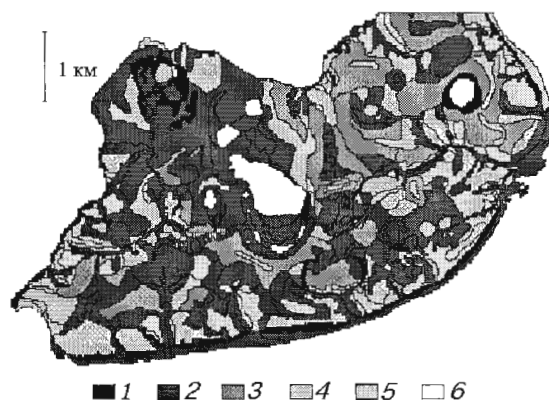


Рис. 1. Карта сезонного чистого потока CO_2 в ландшафте типичной субарктической тундры Северо-Западного Таймыра.

Градации чистого потока ($\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сезон}^{-1}$): 1 — -55 — -30 ; 2 — -30 — -5 ; 3 — -5 — 5 ; 4 — 5 — 30 ; 5 — 30 — 55 ; 6 — озера.

Как отмечалось выше, тундровые биогеоценозы исследуемого района были представлены как комбинации простейших ассоциаций, что дало возможность оценить суточные и сезонные ландшафтные потоки CO_2 на основе имитационных моделей и компьютерной карты границ биогеоценозов. Реконструированный таким образом ландшафт типичной субарктической тундры оказался представленным участками, имеющими устойчивый положительный, либо отрицательный сезонный углеродный баланс (рис. 1).

Участки, имеющие отрицательный баланс, заняты болотами и тундрово-болотными полигональными комплексами; участки с положительным сезонным балансом — это главным образом зональные тундровые экосистемы с мелкобугорковым или кочкарным микрорельефом, расположенные на локальных повышениях. ГИС дает возможность построить карты сезонных величин валового дыхания и валовой продукции, а также суточного распределения этих характеристик. Суммарные сезонные потоки (июнь—сентябрь) для 1994 г. составили (в $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$): валовая первичная продукция -149 , валовое дыхание $+145$,

Таблица 2. Суммарные сезонные углеродные потоки в биогеоценозах типичной субарктической тундры по результатам моделирования (Таймырский стационар; начало июня—начало октября 1994 г.)

Растительная группировка биогеоценоза	Потоки CO_2 , $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$		
	валовое дыхание	валовая продукция	чистый поток
Кустарничковая	134	-77	57
Кустарничково-осоковая	157	-184	-26
Осоковая	159	-180	-21
Кустарниковая	165	-161	4
Осоково-пушицевая	182	-233	-51

чистый поток -4 . Таким образом, для этого периода потоки CO_2 в ландшафте типичных тундр Таймыра были сбалансированы.

Модель позволила рассчитать величины баланса CO_2 в 1993 и 1995 гг., равные для GR : $+154$ и $+175$, для GPP : -162 и -176 , для NF : -8 и $+1$ $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$ соответственно. За три года отмечается небольшой тренд чистого потока углерода от стока в 1993 г. к его источнику в 1995 г., который совпадает с трендом к увеличению средних температур теплого сезона (июнь—август) за то же время: $7,5$, $8,2$ и $9,8$ $^\circ\text{C}$. Однако короткий период имитации не дает возможности сделать заключение о многолетних тенденциях в динамике баланса CO_2 тундр Таймыра.

Компьютерный эксперимент. Одной из особенностей примененного подхода является то, что мы не использовали никаких исходных постулатов относительно формы влияния различных факторов. Полученные уравнения (1)—(3) отражают связь между углеродными потоками и реально действующими экологическими факторами. Это позволяет обратиться к компьютерным экспериментам с моделями, изменяя входные данные. Ответ модели при этом не будет тривиальным или predetermined начальная формой уравнений.

Нами был проведен компьютерный эксперимент, имитирующий одновременное изменение температуры и облачности. В эксперименте

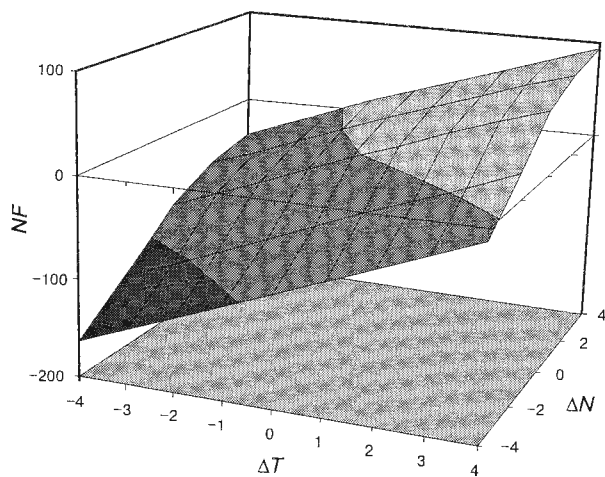


Рис. 2. Компьютерная имитация влияния климатических изменений (температуры воздуха и облачность) на чистый сезонный поток CO_2 в ландшафте типичной тундры Таймыра.

ΔT — изменение среднесезонной температуры воздуха ($^\circ\text{C}$), ΔN — изменение среднесезонной облачности (баллы), NF — чистый поток ($\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сезон}^{-1}$).

изменяли на фиксированную величину значения исходных погодных параметров (т. е. среднесуточной температуры и облачности), и далее проводили расчет для всего теплого периода по новым значениям. Имитация показывает (рис. 2), что рост среднесуточной температуры воздуха теплого периода на 1 $^\circ\text{C}$ при неизменной облачности ведет к отклонению углеродного баланса в положительную область приблизительно на 20 $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2}$. Однако одновременное понижение облачности на 1 балл полностью компенсирует отмеченное влияние температуры. В то же время одновременное повышение облачности на один балл и температуры на один градус приводит к потере уже 27 $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Результаты компьютерной имитации подтверждают известную гипотезу о положительной обратной связи между потеплением климата и превращением тундр в источник углерода для атмосферы. Это положение подкреплено многочисленными наблюдениями и в других регионах мировой тундры [Зимов и др., 1991; Замолодчиков и др., 1996; Oechel et al., 1993; 1995]. Следует отметить, что выводы компьютерного эксперимента справедливы только в том случае, если не происходит изменений структуры и функций биогеоценозов, а также площадных соотношений между ними. В ходе реального потепления некоторые процессы (увеличение заболоченных площадей за счет термокарста, зарастание озерных мелководий, изменение видовой структуры сообществ в процессе сукцессий и др.) могут привести и к противоположным результатам.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем исследовании мы моделировали суммарный сезонный поток углерода для периода от начала снеготаяния до полного промерзания почвы. Строго говоря, эта величина не полностью соответствует годичному потоку, поскольку в ней не учтена эмиссия CO_2 из почвы в холодный период года [Зимов и др., 1991; Зимов et al., 1993; Oechel et al., 1995]. Для оценки величины „зимнего“ потока углерода можно вновь обратиться к данным по влажной осоковой тундре на Аляске. Объем эмиссии CO_2 в течение холодного сезона (включая период промерзания почвы) здесь составляет 19 $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Величина, равная 10 $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, уже была включена нами в общий сезонный показатель для периода промерзания почвы. Поэтому неучтенная величина эмиссии также составляет около 10 $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Отсюда общий годичный баланс углерода в ландшафтах типичной субарктической тундры следует оценивать как близкий к динамическому равновесию в 1993 г. и положительный — в 1994 и 1995 гг. Существенно более низкие зимние температуры на Таймыре

должны способствовать и более низким значениям эмиссии CO_2 по сравнению с Аляской. Однако окончательную ясность могут внести только прямые измерения потоков CO_2 на Таймыре в зимний период.

Полученные в результате моделирования оценки не противоречат данным по влажной осоковой тундре северного побережья Аляски (США), которой посвящено большое количество работ [Coyne et al., 1975; 1978; Miller et al., 1976; Oechel et al., 1993; 1995; и др.]. Например, GPP осоковой тундры оценена как $160 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [Miller et al., 1976], что хорошо согласуется с нашей аналогичной ландшафтной оценкой ($149 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Диапазон вариации чистого потока CO_2 по цитируемым работам в среднем составляет от -40 до $+34 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [Coyne et al., 1975; Miller et al., 1983; Oechel et al., 1993; 1995] с максимумом для стока $-109 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [Chapin et al., 1980]. Этот диапазон близок к полученному нами для различных ассоциаций (см. табл. 2).

Будущее работы прочно связано с использованием геоинформационного подхода, позволяющего получить целостную ландшафтную оценку характера углеродного баланса. Модельные значения углеродных потоков существенно варьируют в различных биогеоценозах (см. табл. 2). Если бы измерения газовых потоков проводились только на бугорках, то в результате мы получили бы эмиссию (источник) углерода из тундры в атмосферу, а в случае исследования только полигонов — сток углерода. Геоинформационная система, созданная на основе компьютерной карты основных растительных сообществ, позволяет избежать таких неточностей и корректно оценить углеродный баланс ландшафта в целом.

Работа выполнена в рамках программы проекта 4.3.3 ГНТП 18 „Глобальные изменения природной среды и климата“. Полевые работы финансировались грантами R7 Государственного департамента СА и MSG000 Международного научного фонда.

Авторы благодарны С. Хастингсу (Сан-Диего, США), Л. А. Колпашникову и С. С. Мамулову (Норильск), В. В. Зеленеву и М. В. Глаголеву (Москва) за помощь в выполнении исследования.

Литература

Берлянд Т. Г. Распределение солнечной радиации на континентах. Л., Гидрометеиздат, 1961, 226 с.

Биогеоценозы Таймырской тундры и их продуктивность / Ред. Б. А. Тихомиров, Л., Наука, 1971, 240 с.

Замолодчиков Д. Г., Карелин Д. В., Иващенко А. И. Обратимый сдвиг углеродного баланса южных тундр в сторону эмиссии CO_2 при краткосрочном повышении суточной температуры // *Фундаментальные исследования криосферы Земли в Арктике и Субарктике (итоги и перспективы)*. Пушино, ПНЦ РАН, 1996, с. 148—151.

Замолодчиков Д. Г., Карелин Д. В., Иващенко А. И. Углеродный баланс тундровых ландшафтов Центральной Сибири: наблюдения и моделирование на геоинформационной основе // *Журн. общ. биологии*, 1997, т. 58, № 2, с. 15—34.

Зимов С. А., Давыдов С. П., Просяников С. Ф. и др. Почвы Севера — генератор углекислоты // *Вестн. АН СССР*, 1991, № 8, с. 71—83.

Карелин Д. В., Иващенко А. И., Замолодчиков Д. Г. Геоинформационный подход в изучении сезонной динамики надземной фитомассы арктических экосистем: мода или необходимость? // *Журн. общ. биологии*, 1996, т. 57, № 5, с. 608—627.

Матвеева Н. В. Растительность окрестностей Таймырского биологического стационара // *Структура и функции биогеоценозов таймырской тундры*. Л., Наука, 1977, с. 72—113.

Соколихина Н. Н. Распределение облачности и оценка ее влияния на приход суммарной радиации в Якутии // *Вестн. МГУ*, сер. 5, география, 1994, № 5, с. 96—101.

Chapin F. S., III, Miller P. C., Billings W. D., Coyne P. I. Carbon and nutrient budgets and their control in coastal tundra // *An Arctic ecosystem: the coastal tundra at Barrow, Alaska* / Eds. J. Brown, P. C. Miller, L. L. Tieszen, F. L. Bunell. Strousberg, Pennsylvania, Dowden, Hutchinson and Ross, 1980, p. 458—482.

Coyne P. I., Kelley J. J. CO_2 exchange over the Alaskan Arctic Tundra: meteorological assessment by an aerodynamic method // *J. Applied Ecology*, 1975, v. 12, p. 587—611.

Coyne P. I., Kelley J. J. Meteorological assessment of CO_2 exchange over an Alaskan Arctic Tundra // *Vegetation and Production Ecology of an Alaskan Arctic Tundra* / Ed. L. L. Tieszen. N.-Y., Springer-Verlag, 1978, p. 299—321.

Miller P. C., Stoner W. A., Tieszen L. L. A model of stand photosynthesis for the wet meadow tundra at Barrow, Alaska // *Ecology*, 1976, v. 57, p. 411—430.

Oechel W. C., Hastings S. J., Jenkins M. et al. Recent change of arctic tundra ecosystems from a carbon sink to a source // *Nature*, 1993, v. 361, p. 520—523.

Oechel W. C., Vourlitis G. L., Hastings S. J., Bochkarev S. A. Change in arctic CO_2 flux over two decades: effects of climate change at Barrow, Alaska // *Ecological Application*, 1995, 5(3), p. 846—855.

Tyler G. Distribution and turnover of organic matter and minerals a shore meadow ecosystem. Studies in the ecology of Baltic sea-shore meadows. IV // *Oikos*, 1971, v. 22, № 3, p. 265—291.

Zimov S. A., Zimova G. M., Davidov S. P. et al. Winter biotic activity and production of CO_2 in Siberian soils: A factor of greenhouse effect // *J. Geophys. Res.*, 1993, v. 98, p. 5017—5023.

Поступила в редакцию
1 июля 1997 г.