

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ БАКЧАРСКОГО БОЛОТА (Западная Сибирь)

Е.А. Дюкарев, Е.А. Головацкая, А.Д. Дучков*, С.А. Казанцев*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634055, Томск, просп. Академический, 10/3, Россия*

**Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

Приводятся результаты непрерывного мониторинга температуры метрового слоя торфяной почвы в течение 812 дней (с 28 июня 2005 г. по 26 сентября 2007 г.) с шагом измерений 1 час в зимнее и 15 мин в летнее время. Показано, что температурный режим торфяных почв как в течение года, так и в течение суток во многом определяется гидрологическими и погодными условиями. Глубина промерзания почвы зависит от времени установления устойчивого снежного покрова и влажностного режима торфяной почвы. На время оттаивания сезонной мерзлоты кроме температуры воздуха и поверхностных слоев торфа также существенное влияние оказывает влажность торфа и уровень болотных вод. Впервые выявлены случаи интенсивного прогрева торфяной почвы при инфильтрации дождевой влаги в дневное и ночное время. Этот прогрев почвы и фазовые переходы при становлении и разрушении сезонно-мерзлого слоя объясняют особенности формирования теплового поля торфяной почвы.

Температурный режим торфяных почв, сезонно-мерзлый слой, инфильтрация дождевых осадков, аппаратура для мониторинга температуры, Бакчарское болото.

TEMPERATURE MONITORING IN BAKCHAR BOG (West Siberia)

E.A. Dyukarev, E.A. Golovatskaya, A.D. Duchkov, and S.A. Kazantsev

We report the results of continuous temperature monitoring (812 days, from 28 June 2005 to 26 September 2007) in a 80 cm layer of peat soil in Bakchar bog (West Siberia), at sampling rates of 60 min in wintertime and 15 min in summertime. Both annual and daily temperature patterns are controlled by water table position and weather conditions. Wintertime soil temperature patterns are disturbed by the formation of a seasonal frozen layer with its thickness (freezing depth) depending on the time when steady snow cover sets up and on soil moisture. During the period of frozen layer thawing, the temperature of peat becomes sensitive to peat moisture and water table position as well as to the air and peat surface temperature. The warm-season soil temperature patterns bear effects of peat warming by rainwater percolation, both in night- and daytime. The patterns with soil warming during rainfall and phase change during seasonal freezing-thawing cycles record disturbances to conductive heat transfer.

Soil temperature patterns, autonomous digital temperature recorder, peatland soil, seasonal frozen layer, rainwater percolation, Bakchar bog

ВВЕДЕНИЕ

Температура почвы является ключевым фактором, контролирующим многие протекающие в почвах биотические и абиотические процессы: рост и продуктивность растительности, разложение и минерализация органического вещества почв, эмиссия парниковых газов [Moore, Dalva, 1993; Вомперский, 1994; Головацкая и др., 2008], выделение растворенного органического углерода [Прокушкин, Гуггенбергер, 2007] и др. Температурный режим почв формируется под влиянием современных климатических условий, внешних факторов (астрономических и общегеографических) и факторов, характеризующих условия теплового взаимодействия почвы с атмосферой (геоботанических, геоморфологических) [Павлов, 1979]. Установление отрицательных температур воздуха в зимний период приводит к образованию в почвах сезонно-мерзлого слоя и соответственно особого теплового режима. Мерзлый слой увеличивает поверхностный сток воды в период снеготаяния и при выпадении осадков и препятствует фильтрации влаги в глубь почвенного профиля.

Тепловые режимы торфяных и минеральных почв существенно различаются. Торфяная залежь представляет собой сложную органоминеральную систему, обладающую специфическими свойствами: высокой обводненностью и пористостью, содержанием большого количества малоразложившегося органического вещества [Романов, 1961]. Почвы являются одним из главных источников CO₂, CH₄ и N₂O,

увеличивающаяся атмосферная концентрация которых относится к числу наиболее широко обсуждаемых, но пока недостаточно изученных причин климатических изменений [Большое Васюганское болото, 2000; Семенов, 2004]. Парниковые газы являются продуктами метаболизма микробов, который регулируется температурой [Lafleur et al., 2005; Глаголев и др., 2007; Головацкая и др., 2008]. Потепление климата приводит к увеличению температуры почвы, что, в свою очередь, обеспечивает рост эмиссии парниковых газов. Продуцирование CO_2 и CH_4 и их эмиссия через сезонно-мерзлый слой и снежный покров происходит и в зимнее время [Pannikov, Dedysch, 2000].

Изучение температурного режима торфяных почв (ТП) является актуальной задачей, поскольку наибольшие скорости современного потепления приходится на северные широты [Climate Change, 2001; Ипполитов и др., 2007], где и расположены основные запасы торфа (и углерода). По разным оценкам болотные экосистемы содержат 120—455 млрд т углерода [Gorham, 1991; Вомперский, 1994]. В России запасы углерода в виде торфа оцениваются в 215 млрд т [Botch et al., 1995]. Болота Западной Сибири содержат до 70 млрд т углерода [Sheng et al., 2004]. Столь значительный резервуар углерода в результате изменения климата или антропогенного воздействия потенциально может частично перейти в атмосферу в виде CO_2 или CH_4 и внести значительный вклад в углеродный баланс атмосферы.

Необходимо также подчеркнуть, что детальный мониторинг температуры почвенного слоя представляет уникальный экспериментальный материал для изучения сложных процессов передачи тепла от приземного слоя атмосферы в горные породы.

В настоящем сообщении рассмотрены аппаратура и результаты мониторинга температуры торфяной почвы в одном из районов Васюганского болота в южной части Западной Сибири. Предварительные результаты этого исследования обсуждались в работе [Дюкарев и др., 2006].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Исследования температурного режима ТП проводились на олиготрофном сосново-кустарничково-сфагновом биогеоценозе (низком ряме), расположенном на территории стационара «Васюгань» в пределах Бакcharского района Томской области. Микрорельеф низкого рьяма представлен высокими (до 30—50 см) плоскими сфагновыми подушками, занимающими около 70 % поверхности, и узкими понижениями шириной до 2 м.

Растительность низкого рьяма относится к сосново-кустарничково-сфагновой ассоциации с низкой сосной. Угнетенный древесный ярус представлен *Pinus silvestris f. litwinowii*. Средняя высота древостоя — 2—3 м, средний диаметр стволов 3 см. Проективное покрытие древесного яруса составляет 30 %. Кустарничковый ярус развит обильно на микроповышениях, его общее проективное покрытие — 60—70 %. Сложен он *Chamaedaphne calyculata* Linnaeus, *Andromeda polifolia* и *Vaccinium uliginosum*, также на вершинах кочек встречается *Ledum palustre* L. и клюква мелкоплодная (*Oxycoccus microcarpus*). Травяной ярус имеет покрытие менее 5 % и представлен куртинами *Eriophorum vaginatum* L., *Rubus chamaemorus* L. и *Drosera rotundifolia*. В моховом покрове на повышениях доминирует *Sphagnum fuscum* Klinggr. (95 %), кроме того, на межкочковых понижениях встречаются *Sph. angustifolium* и *Sph. magellanicum* [Головацкая, Порохина, 2005].

Торфяная залежь низкого рьяма достигает мощности 2 м и имеет смешанный топяной вид строения. В ее основании слой низинного торфа, который перекрывается мощным (до 1.5 м) слоем верхового торфа двух видов — магелланикум со средней степенью разложения и фукум с низкой степенью разложения. На контакте низинного и верхового пластов располагается тонкая прослойка переходного древесно-сфагнового торфа [Васюганское болото..., 2003].

Таблица 1. Технические данные автономного измерителя температуры

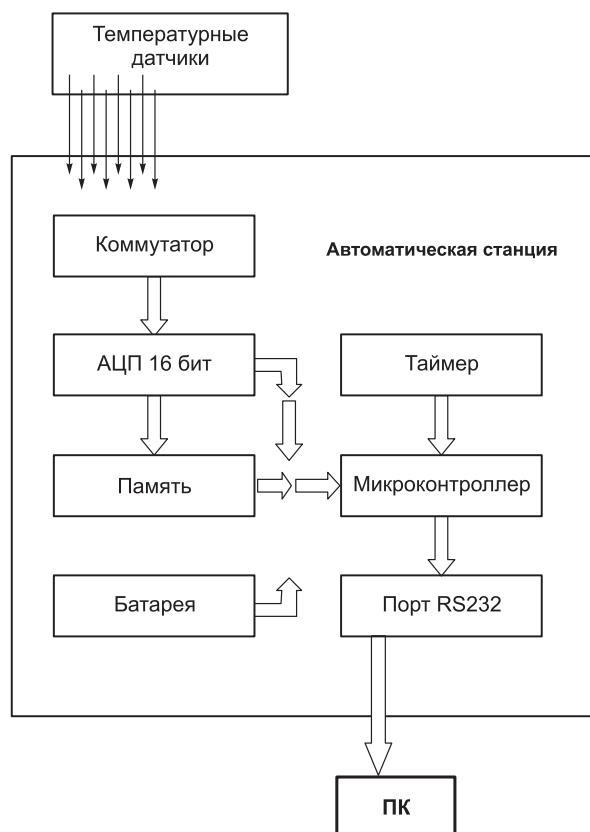
Элемент конструкции	Параметр
Число датчиков	от 1 до 16 (базовый вариант)
Разрядность АЦП	16 бит
Точность по температуре	до 0.02 °C
Чувствительность по температуре	до 0.002 °C
Диапазон рабочих температур	от -20 до +60 °C
Память	энергонезависимая, до 20 000 8-канальных сессий
Источник питания	литиевая батарея 3—6 В
Считывание информации	через порт USB или RS232
Длительность автономной работы	до 12 месяцев
Размеры; вес (во влагозащитном корпусе)	Ø = 40 мм, L = 200 мм; 1 кг

Измерения температуры воздуха (T_a) выполнялись автоматическим измерителем температуры и давления «НОВО Water Level Logger» производства Onset corporation (USA) с периодичностью 15 мин.

Измерения температуры почвы (T_s) ТП на восьми глубинах выполнялись автономным измерителем температуры (АИТ), разработанным в ИНГИГФ СО РАН [Казанцев, Дучков, 1992; Дучков и др., 2005]. Структурная схема измерителя приведена на рис. 1, его технические данные — в табл. 1. Основой прибора являются 16-разрядный амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП) и микроконтроллер (одно-

Рис. 1. Функциональная схема автономного измерителя температуры.

кристалльная микроЭВМ), управляющий как работой АЦП, так и операциями по переключению датчиков, записью результатов в память и обменом информацией с внешней ЭВМ. Сигналы с температурных датчиков (в нашем случае — терморезисторы ММТ-6) через коммутатор поступают на АЦП, преобразуются в цифровой код и записываются в память. Базовый вариант измерителя имеет восемь каналов. Используется энергонезависимая (технология Flash) память, объемом до 20 тыс. 8-канальных измерительных сессий. Время старта и интервал между измерениями задается программно с клавиатуры компьютера и может изменяться от секунд до десятков часов. После снятия показаний со всех датчиков, предварительной обработки и записи результатов в память микроконтроллер переводит АИТ в дежурный, спящий, режим. Питание измерителя осуществляется от литиевой батареи напряжением три вольта. В режиме измерения энергопотребление прибора составляет около 20 мА, в дежурном режиме — порядка 50 мкА. Для считывания информации АИТ подключается к персональному компьютеру. Программно определяется объем заполнения памяти, считывается и сохраняется в виде табличного файла.



Перед запуском измерителя в работу задается время старта, интервал между измерениями. При необходимости память устройства очищается. После отключения компьютера АИТ автоматически переходит в рабочий режим. В качестве датчиков температуры используются терморезисторы ММТ-6 с номинальным сопротивлением 10 кОм. Датчики градуируются относительно ртутных термометров с ценой деления 0.01 °С на специальном лабораторном стенде. Соответственно точность измерения абсолютных значений температуры составляет 0.01—0.02 °С. Опыт показывает, что относительные изменения температуры регистрируются прибором значительно точнее — с разрешением до 0.002—0.003 °С [Дучков и др., 2005].

Для постановки температурных датчиков в ТП был использован специальный зонд, состоящий из небольшого герметичного контейнера (диаметр 40 мм, длина 200 мм) с присоединенной стальной трубкой длиной 1 м. В контейнере размещалась электронная аппаратура, а в трубке — восемь терморезисторов на разном расстоянии от контейнера. Зонд был установлен на невысокой кочке, соответствующей средней поверхности низкого рьяма. При этом датчики температуры находились на глубинах 2, 5, 10, 15, 25, 40, 60 и 80 см от поверхности кочки. Микрорельеф волнистый с понижениями в межкочковых пространствах до 30 см и возвышениями на больших кочках до 20 см относительно средней поверхности. Измерения температуры торфяной залежи проводились в течение 812 дней (с 28 июня 2005 по 26 сентября 2007 г.). В зимнее время года шаг измерений составлял один час, в летнее, когда изменение температуры верхнего слоя более динамично, температура регистрировалась каждые 15 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЫ

Среднесуточные данные. Приведены графики, иллюстрирующие временной ход среднесуточных значений температуры воздуха и ТП на разных глубинах (рис. 2). Зимние периоды исследуемых лет существенно различались по погодным условиям. Зима 2005—2006 гг. была экстремально холодной. Среднесуточная температура воздуха 13.01.2006 г. опускалась до -44.1 °С. Максимальная высота снежного покрова (56 см) наблюдалась 04.04.2006 г., полное его разрушение завершилось 26.04.2006 г. Зимний период 2006—2007 гг. был аномально теплым. Температура воздуха в декабре—январе не опускалась ниже -25 °С. Существенное снижение температуры (до -31.3 °С) наблюдалось только в феврале (22.02.2007 г.). Устойчивый снежный покров сохранялся с 21.11.2006 г. по 11.04.2007 г., наибольшая его глубина (74 см) зарегистрирована 19.03.2007 г.

Лето 2006 г. было аномально теплым, с максимальной суточной температурой 27.5 °С (наблюдалась 23.06.2006 г.). Летние сезоны 2005 и 2007 года по температуре были близки к климатической норме. Однако количество осадков летом 2007 г. (416 мм) было значительно больше по сравнению со средними

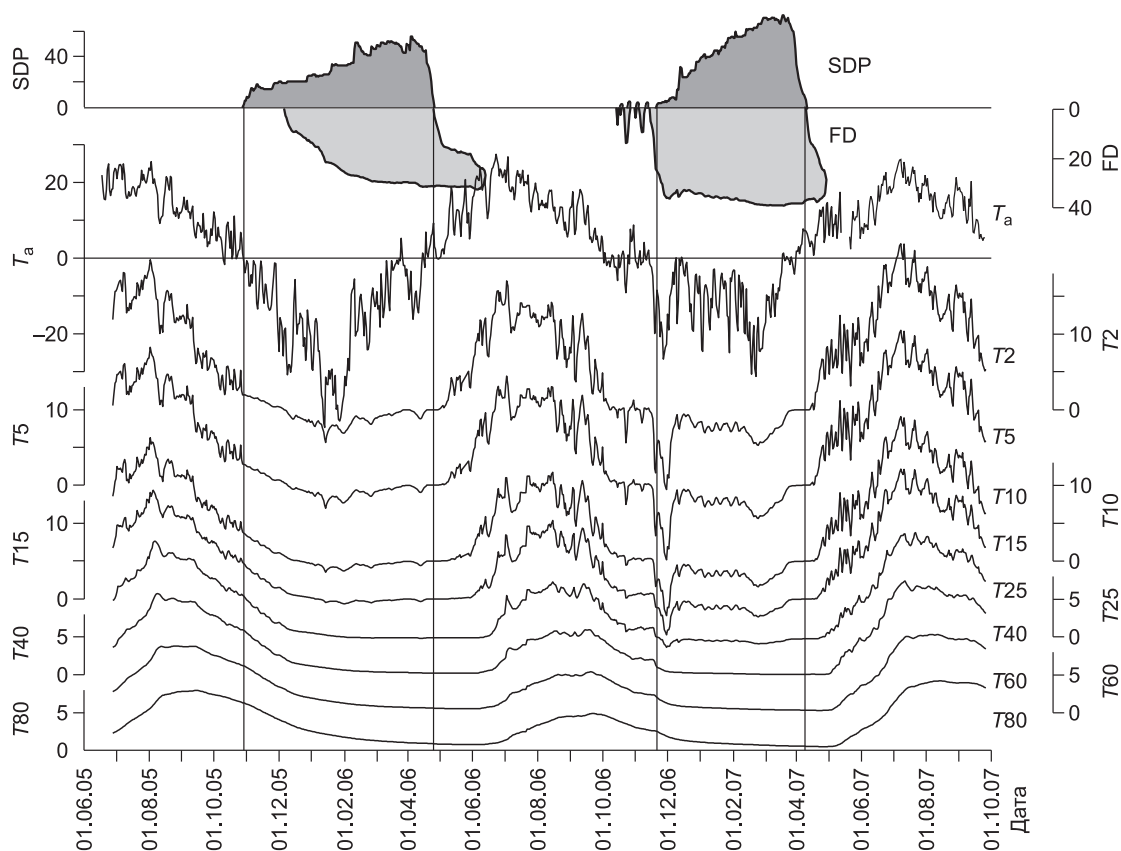


Рис. 2. Временной ход среднесуточных значений:

T_a — температуры воздуха, T_s — температуры почвы на глубинах 2—80 см (T_2 , T_5 , T_{10} , T_{15} , T_{25} , T_{40} , T_{60} , T_{80}), SDP — глубины снежного покрова (см), FD — глубины промерзания почвы (см).

многолетними значениями (285 мм), что привело к формированию аномально высокого уровня болотных вод в течение всего теплого периода.

Анализ результатов измерений (см. рис. 2) показал, что изменения температуры ТП на разных глубинах в целом повторяют годовой ход температуры воздуха. Летом поверхность почвы нагревается под воздействием лучистой энергии солнца, тепло передается в верхние, а затем и в более глубокие слои. С увеличением глубины наблюдается затухание в первую очередь высокочастотных колебаний температуры.

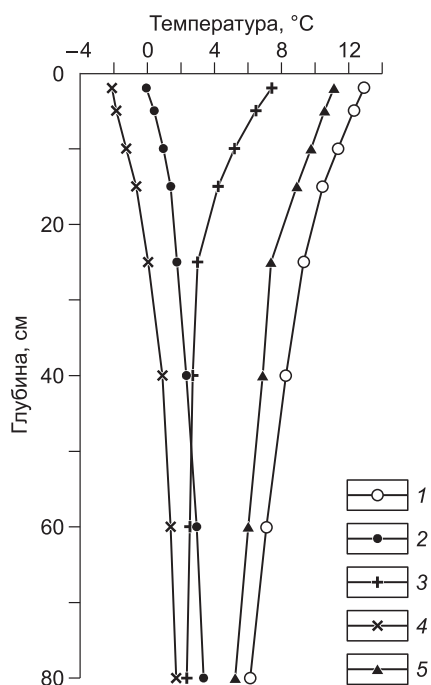
Рыхлые верхние слои мохового очеса из-за своей высокой теплоизолирующей способности существенно снижают амплитуду колебаний температуры в нижележащих слоях торфяной залежи. Кроме того, на глубине 10—20 см от поверхности располагаются болотные воды, и температура в нижележащих слоях насыщенных водой меняется медленнее из-за большой теплоемкости воды. Суточные колебания температуры распространяются в ТП до глубины 15—25 см, в минеральных почвах значительно глубже — до 60—80 см [Павлов, 1979]. Несмотря на малую мощность слоя суточных колебаний температуры, он имеет большое значение для жизнедеятельности растений и микроорганизмов.

При проникновении тепловой волны в глубь ТП происходит уменьшение амплитуды и фазовый сдвиг волны годового хода температуры. Например, амплитуда годового хода температуры воздуха (определенного по разнице среднесуточных температур) в наших условиях составляла 64.6 °С, а годовая амплитуда температуры ТП — 26.4, 19.1, 8.6 и 5.9 °С на глубинах 2, 10, 40 и 80 см соответственно. Максимальная температура воздуха, в среднем за период исследования, достигалась 11 июля, а наибольшая температура ТП на глубинах 2, 10, 40 и 80 см наблюдалась 14, 25 июля, 12 августа и 6 сентября соответственно.

Максимальная глубина прогрева торфяной залежи до 10 °С фиксировалась в первой половине августа и составляла 46, 16 и 66 см в 2005, 2006 и 2007 годах соответственно. Летний период 2006 г. был сухим и жарким. В результате, несмотря на высокую температуру воздуха, сухие верхние слои мохового очеса (из-за низкой теплопроводности) препятствовали прогреву торфяной толщи. Лето 2007 г. отличалось аномально высоким количеством осадков, что способствовало поддержанию уровня болотных вод около поверхности и переувлажнению поверхностных слоев торфа. При таких условиях ТП характери-

Рис. 3. Средние профили распределения температуры (термограммы) за интервалы времени:

1 — 28.06.2005—30.09.2005 г., 2 — 01.10.2005—29.03.2006 г., 3 — 01.04.2006—30.09.2006 г., 4 — 01.10.2006—29.03.2007 г., 5 — 01.04.2007—30.09.2007 г.



зуются более высокой теплопроводностью и, следовательно, имеют место более интенсивный прогрев почвы. На глубине 80 см температура ТП постепенно увеличивалась в течение всего летнего периода, максимального значения достигла в конце сентября и составляла 7,9, 4,8 и 9,2 °C в 2005, 2006 и 2007 годах соответственно.

Профили распределения температуры в ТП (термограммы) показывают, что в летнее время (рис. 3, графики 1, 3 и 5) температура уменьшалась с глубиной, и градиент температуры по глубине принимал отрицательные значения, что соответствует переносу тепла от нагретых поверхностных слоев ТП вглубь. Градиент температуры в верхнем слое мощностью 25 см в это время был значительно выше по абсолютной величине ($-0.17 \dots -0.22$ °C/см), чем в нижележащих слоях ($-0.01 \dots -0.06$ °C/см). В течение теплого периода 2006 г. температура ТП была на 1—6 °C ниже, чем в 2005 и 2007 гг. Начиная с середины лета, температура верхних слоев ТП начала уменьшаться. Градиент температуры в их верхних 25 см изменил свое направление в конце сентября, когда среднесуточная температура воздуха опустилась ниже 8—10 °C. В начале октября на всех глубинах установились положительные градиенты температуры, и началось остывание всей почвенной толщи. Зимой температура ТП увеличивалась с глубиной (см. рис. 3, графики 2, 4). Градиент температуры с глубиной снижался от 0,16 °C/см в слое 2—5 см до 0,02 °C/см в слое 60—80 см. Интересно отметить, что глубинный геотермический градиент в этом районе примерно на 2 порядка ниже и составляет $(0.02 \text{—} 0.03) \cdot 10^{-2}$ °C/см [Тепловое поле..., 1987].

ДИНАМИКА ПРОМЕРЗАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЫ

После формирования устойчивого снежного покрова в 2005 г. (29.10.2005) существенно (в 20 раз) уменьшились колебания температуры на всех исследуемых глубинах, и началось плавное охлаждение торфяной залежи. Благодаря низкой теплопроводности снега и накопленным в течение теплого периода

Таблица 2. Скорость продвижения фронта промерзания/протаивания сезонно-мерзлого слоя (СМС)

Зима	Временной интервал	Скорость, мм/день
2005—2006 г.	Нижняя граница СМС	
	06.12.2005—12.12.2005	12.7
	13.12.2005—27.02.2006	3
	28.02.2006—06.06.2006	0.3
	07.06.2006—13.06.2006*	7.8
	Верхняя граница СМС	
	26.04.2006—05.05.2006	14.3
	06.05.2006—13.06.2006	2.6
2006—2007 г.	Нижняя граница СМС	
	14.11.2006—30.11.2006	22.4
	01.12.2006—20.03.2007	0.6
	21.03.2007—29.04.2007*	1.1
	Верхняя граница СМС	
		10.04.2007—14.04.2007
	15.04.2007—29.04.2007	10.6

* В этот период зафиксировано продвижение нижней границы сезонно-мерзлого слоя вверх (оттаивание снизу).

запасам тепла в насыщенных водой глубинных слоях торфа, температура ТП оставалась положительной до 06.12.2005 г. Отопляющее воздействие снежного покрова проявляется в течение всей зимы, за исключением периода таяния. В районах с сезоннопромерзающими породами ведущими факторами теплообмена ТП с атмосферой являются летние климатические факторы [Павлов, 1979]. Это объясняется тем, что в период сезонного промерзания вследствие существования фазовой границы тепловой режим подстилающих талых толщ формируется как бы без участия внешних факторов теплообмена. Только после полного оттаивания сезонно-мерзлого слоя талые породы начинают непосредственно взаимодействовать с атмосферой.

Средняя скорость продвижения фронта промерзания, определенная по проникновению изотермы 0 °C, на начальном этапе составляла 12,7 мм/день и к 12 декабря 2005 г. ТП промерзла на 8 см, после чего скорость промерзания снизилась до 3 мм/день. Минимальная температура на глубине 2 см состави-

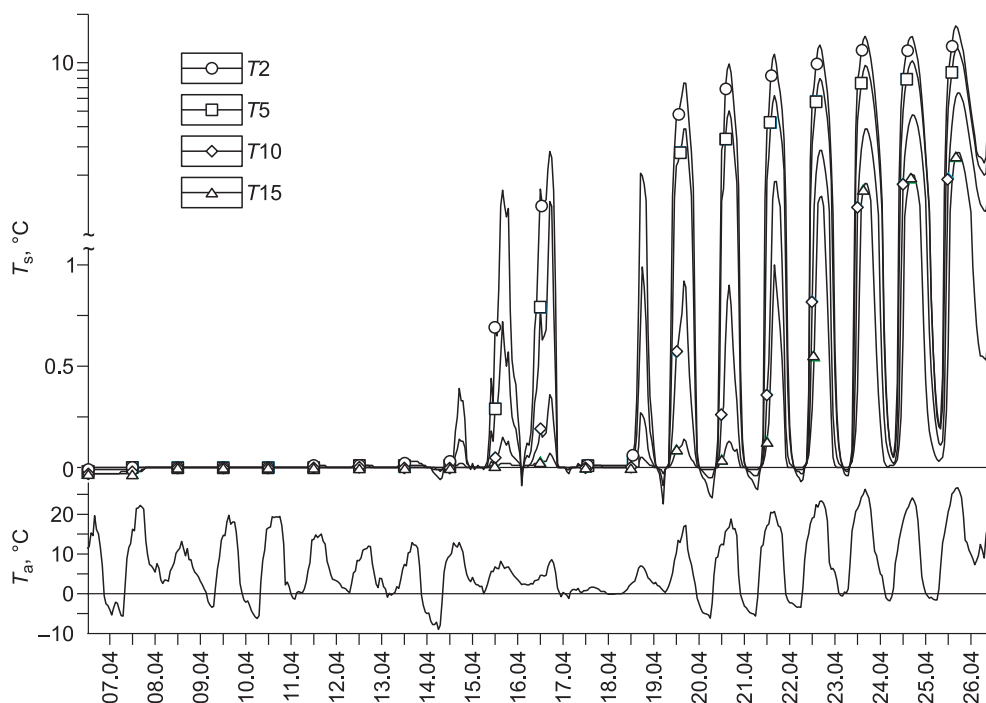


Рис. 4. Временной ход температуры почвы (T_s) на глубинах 2, 5, 10, 15 см и температуры воздуха (T_a) в период таяния сезонно-мерзлого слоя весной 2007 г.

Точки на графиках соответствуют 12:00 каждого дня. Для температур почвы выше 1 °C использована логарифмическая шкала.

ла -4.7 °C (24.02.2006 г.). Скорость промерзания ТП на разных этапах приведена в табл. 2. Освобождение поверхности ТП от снега было зафиксировано 26.04.2006 г., после чего началась быстрая деградация мерзлого слоя. К 05.05.2006 г. ТП протаяла на 15 см, а верхние сухие слои мохового очеса, обладающие высокой теплоизолирующей способностью, способствовали сохранению мерзлого слоя до середины июня. Максимальная глубина промерзания (32.6 см) наблюдалась 06.06.2006 г. Активное разрушение сезонно-мерзлого слоя на нижней границе (со скоростью 7.8 мм/день) началось только после 7 июня.

Начало зимы 2006 г. сопровождалось кратковременными выпадениями тонкого слоя снега, сохранившегося 2—3 дня. Среднесуточная температура воздуха в этот период опускалась до -9 °C. Значительные колебания температуры воздуха и отсутствие снежного покрова привели к быстрому охлаждению торфяной залежи, ее резкому промерзанию на глубину до 15 см, последующему оттаиванию и замерзанию. К моменту установления снежного покрова (21.11.2006 г.) ТП промерзла на 25 см и в течение зимы глубина промерзания менялась медленно. При незначительной толщине снежного покрова и низких среднесуточных температурах воздуха (-23.6 °C) температура в верхнем слое ТП (на глубине 2 см) 30.11.2006 г. кратковременно падала до -10 °C. Максимальная толщина слоя промерзания (39.4 см) наблюдалась 20.03.2007 г.

Наличие практически непрерывных измерений T_a и T_s позволяет детально проследить изменения температурного поля торфяной залежи в процессе ее оттаивания. Рассмотрим динамику оттаивания ТП весной 2007 г. Среднесуточная температура воздуха стала устойчиво положительной уже после 1 апреля 2007 г., но в это время еще сохранялись снежный покров и отрицательные значения температуры ТП. В период с 8 по 10 апреля в верхних 15 см ТП установилась температура 0 °C, в то время как T_a в дневные часы поднималась до 20 °C (рис. 4.). В этот период происходило интенсивное таяние снега на поверхности, сопровождающееся поглощением тепла, что обеспечило стабилизацию температуры в точке замерзания воды (так называемый zero curtain effect) [Outcalt et al., 1990]. После 11 апреля температура на глубине 2 см в дневное время поднялась выше нуля, к этому моменту снежный покров исчез, и началось протаивание ТП. 14—16 апреля днем ТП оттаивала и прогревалась до 1—3 °C, а ночью T_s опускалась до 0 °C. Высокие температуры воздуха в дневное время 19—26 апреля вызвали прогрев верхних слоев ТП до 8—10 °C и достаточно быстрое освобождение их от мерзлоты. В ночные часы ТП кратковременно промерзала на небольшую глубину. К 29.04.2007 г. сезонно-мерзлый слой полностью разрушился, и далее наблюдались только положительные температуры ТП.

Стабилизация температуры верхних слоев ТП наблюдалась и весной 2006 г. С 19 по 27 апреля 2006 г. температура на глубинах 2, 5, 10 и 15 см не изменялась и была равна 0 °C.

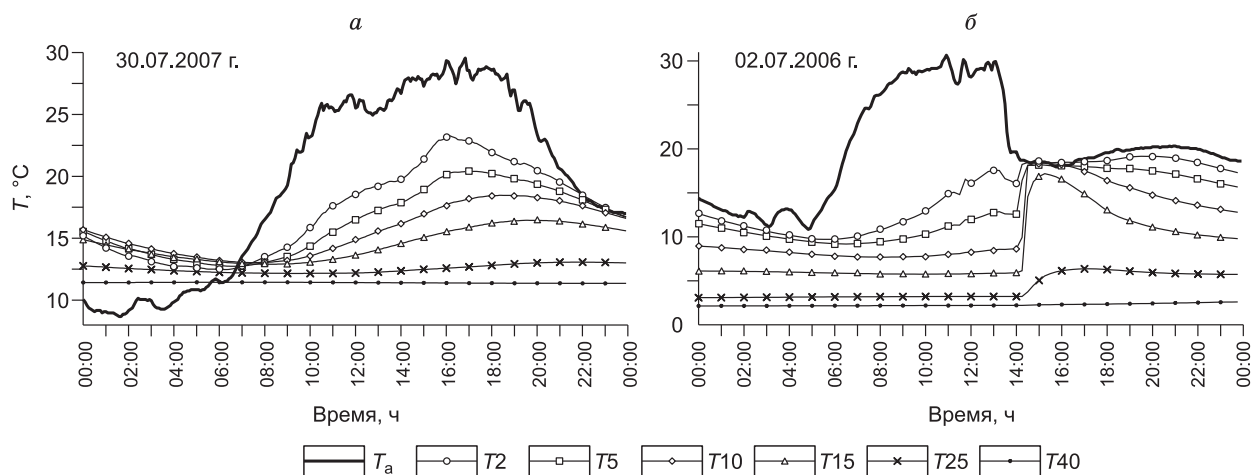


Рис. 5. Временной ход температуры:

T_s — почвы на глубинах 2, 5, 10, 15, 25, 40 см и T_a — воздуха. Шаг по времени — 15 мин, точки на графике с интервалом в 1 ч. а) 30.07.2007 г. — «нормальный» суточный ход температуры; б) 02.07.2006 г. — прогрев почвы при инфильтрации осадков.

ПРОГРЕВ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЫ ПРИ ИНФИЛЬТРАЦИИ ОСАДКОВ

Почва представляет собой многофазную капиллярно-пористую систему, теплопередача внутри которой может осуществляться как кондуктивно, так и в результате переноса влаги (конвективный механизм) [Чудновский, 1976]. Обычно в теплофизике почву рассматривают как квазиоднородное тело, эффективные параметры теплопереноса в котором учитывают совокупность всех возможных механизмов. Однако данное упрощение далеко от реальности в определенных условиях, например, при инфильтрации жидких осадков в почву.

Исследование температуры ТП с высоким временным разрешением (5—15 мин) позволяет выявить особенности прогрева торфяной залежи в летнее время, в том числе и в случае проникновения влаги в ТП. Приведен пример (рис. 5, а) характерного изменения T_a и T_s в верхнем слое ТП в течение суток 30.07.2007 г. Температура воздуха в этот период увеличивалась с 9.2 °С в 4:00 до 29.5 °С в 16:00. Наиболее интенсивно рост T_a происходил в период с 6:30 до 10:30. В течение дня температура варьировала слабо, а с 18:00 до 22:00 она быстро уменьшилась до 17 °С. Температура ТП на глубине 2—15 см была минимальной в 6—7 ч утра. Максимум T_s пришелся на 16:10, 17:00, 18:20, 19:30 и 21:30 для глубин 2, 5, 10, 15 и 25 см. Ход температуры ТП повторяет ход температуры воздуха, но имеет сглаженный и смещенный вид (тепловая волна проникает вглубь с некоторым запаздыванием). Подобное суточное изменение температуры типично для теплого периода года при отсутствии осадков, когда прогрев торфяной толщи идет только за счет кондуктивного теплопереноса.

Таблица 3. **Изменение температуры почвы на разных глубинах при инфильтрации осадков (dt — временной интервал, за который рассчитывалось изменение)**

Дата	Время	dt, мин	Изменение температуры, °С				
			2 см	5 см	10 см	15 см	25 см
02.07.2005	15:30	30	-1.57	1.84	5.53	4.59	0.25
20.07.2005	21:15	30	0.87	1.69	2.87	2.88	0.26
30.07.2005	15:15	45	-1.11	2.33	6.1	4.88	0.21
02.08.2005	01:00	15	1.92	2.38	3.33	2.74	0.13
04.08.2005	18:15	30	-1.37	1.39	4.62	3.5	0.09
13.06.2006	01:30	45	1.08	1.11	1.07	0.62	0.02
25.06.2006	00:45	15	-2.1	-0.23	2.28	1.68	0.13
02.07.2006	14:00	30	2.45	5.61	9.47	8.64	0.53
17.06.2007	19:15	15	-1.9	-0.83	1.58	3.63	2.09
23.06.2007	14:35	10	-0.33	0.9	2.87	4.04	2.12
24.06.2007	21:35	15	-1.34	-0.55	1.13	2.78	0.97
30.06.2007	15:10	15	-1.03	0.78	1.84	0.78	0.02
22.07.2007	17:55	10	-0.29	0.06	0.29	0.14	0.02

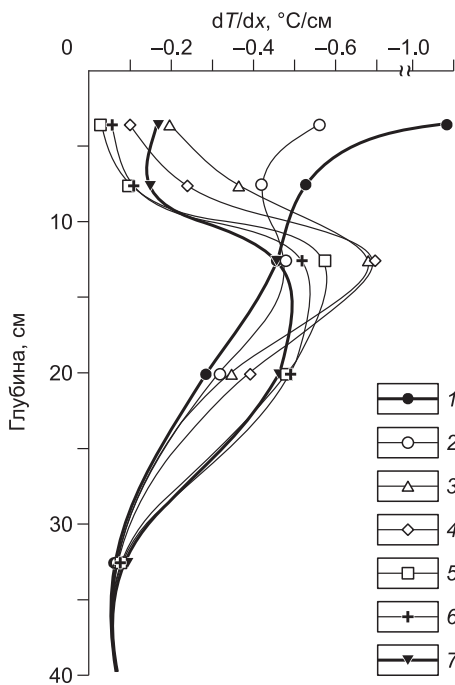


Рис. 6. Графики изменения градиента температуры в почве в разные периоды дождя, прошедшего 30.06.2007.

На оси градиента разрыв от -0.75 до -1 . Время: 1 — 14:00; 2 — 15:15; 3 — 15:20; 4 — 15:25; 5 — 15:35; 6 — 15:40; 7 — 16:00.

Инфильтрация жидких осадков в ТП обычно сопровождалась разнонаправленными нарушениями временного хода температуры воздуха и ТП: T_a резко уменьшалась, а T_s — возрастала. Одна из таких аномалий суточного хода температуры зафиксирована 2 июля 2006 г. (см. рис. 5, б). В полдень температура воздуха в пункте мониторинга достигала $29\text{ }^\circ\text{C}$. Дождь, начавшийся в 13 ч, снизил T_a до $18\text{--}19\text{ }^\circ\text{C}$. Инфильтрация дождевой воды через некоторое время привела к быстрому прогреванию торфяной залежи. Так, уже в 14:00 температура на глубине 10 см выросла на $8.2\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 15 мин. Скачки температуры зафиксированы в это же время и на глубинах 2, 5, 15 и 25 см. На глубине 25 см увеличение температуры происходило в течение нескольких часов и составило $3.1\text{ }^\circ\text{C}$. В поверхностном слое (глубины 2 и 5 см) прирост температуры меньше, чем на больших глубинах. Дождевая вода при инфильтрации в ТП переносит вглубь не только свое тепло, но и поверхностное тепло радиационного происхождения, которое она «снимает» с подстилающей поверхности, просачиваясь через нее вниз.

Данный механизм прогрева глубинных слоев ТП характерен для болотных экосистем в связи с высокой пористостью верхних слоев мха и слаборазложившегося торфа [Романов, 1961]. В течение часа после дождя температура всего верхнего (15 см) слоя ТП, пропитанного дождевой влагой выровнялась и стала равной температуре воздуха. Затем шло плавное снижение температуры до величин, немного превышающих температуру перед дождем. Ниже уровня болотных вод (на глубине 40 см) в насыщенных водой слоях торфа, имеющих большую тепловую инерцию, ход температуры не изменялся.

Всего в течение 2005—2007 гг. было обнаружено 13 событий, когда просачивание дождевой влаги вызывало значительный нагрев верхних слоев ТП. Даты событий и изменение температуры ТП при инфильтрационном прогреве представлены в табл. 3. Как правило, температура на глубине 10—15 см увеличивалась во время дождей в среднем на $3\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 15—30 мин. Рост температуры на глубине 25 см составлял $0.02\text{--}2.1\text{ }^\circ\text{C}$. Температура поверхностного слоя ТП падала на $0.3\text{--}2.1\text{ }^\circ\text{C}$ из-за охлаждения дождем, но в некоторых случаях происходило ее увеличение до $5.6\text{ }^\circ\text{C}$. Это обычно наблюдалось при просачивании осадков в ночное время, когда температура поверхности ниже температуры воздуха.

Анализ распределений по глубине величины градиента температуры, определяющего тепловой поток в почву [Лыков, 1978], показал, что он во время дождя принимает отрицательные значения, т.е. направлен вниз, что соответствует прогреву ТП.

Показаны распределения по глубине градиента температуры (рис. 6), рассчитанного для разных моментов во время дождя, случившегося 30.06.2007 г., иллюстрирующие (вместе с рис. 5, б) динамику изменения температурного поля ТП при инфильтрации дождевой воды. Перед началом дождя (см. рис. 6, кривая 1) минимальные значения градиента наблюдались на глубине 2—5 см, где они достигали $-1.1\text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$. С глубиной величина градиента увеличивалась до $-0.1\text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$, а ниже уровня болотных вод (в интервале 40—80 см) градиент практически не менялся по глубине. С началом дождя градиент температуры в поверхностном слое быстро увеличивался (см. рис. 6, кривые 2—4), а на глубине 10—15 см — уменьшался до $-0.7\text{ }^\circ\text{C}/\text{см}$. Основное количество тепла на начальной стадии дождя рассеивалось именно в этом слое. Через 20 мин (см. рис. 6, кривые 5, 6) фронт прогрева сместился глубже — в слой 15—25 см. Через 45 мин после начала дождя (см. рис. 6, кривая 7) градиент в верхнем слое немного увеличивался, и профиль градиента начинал возвращаться к исходному состоянию.

Волна резкого прогрева рыхлых слоев ТП формировалась не при каждом выпадении осадков. Верхние слои ТП должны быть уже значительно прогреты, а интенсивность дождя должна быть достаточной, чтобы обеспечить быстрое гравитационное просачивание влаги и перенос тепла вглубь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые выполнен непрерывный мониторинг температуры метрового слоя ТП в течение 812 дней (с 28 июня 2005 г. по 26 сентября 2007 г.) с шагом измерений 1 ч в зимнее время и 15 мин в летнее время.

Годовая амплитуда температуры по разрезу ТП изменялась от 26.4 °С в поверхностном слое до 5.9 °С на глубине 80 см, суточные колебания температуры проникали в исследуемые породы до глубины 15—25 см. Температурный режим ТП как в течение года, так и в течение суток во многом определялся гидрологическими и погодными условиями. Глубина промерзания ТП зависит от времени установления устойчивого снежного покрова и их влажностного режима. После формирования устойчивого снежного покрова положительные температуры в них сохранялись до середины декабря. Однако при длительном отсутствии снежного покрова и наличии отрицательных температур воздуха (зима 2006—2007 г.) породы эти быстро промерзали. Максимальная глубина промерзания в 2006 и 2007 гг. составила 32.6 и 39.4 см соответственно. Сезонная мерзлота может сохраняться в ТП до середины июня (2006 г.). На время начала оттаивания сезонной мерзлоты кроме температуры воздуха и поверхностных слоев торфа также существенное влияние оказывает влажность торфа и уровень болотных вод.

В результате непрерывного мониторинга выявлены случаи интенсивного прогревания ТП при инфильтрации дождевой влаги в дневное и ночное время. Относительная редкость этих событий и отсутствие регулярных натурных исследований теплового режима ТП с высоким временным разрешением в болотных экосистемах объясняют отсутствие данных наблюдений этих явлений в литературе.

Выявленные в экспериментах интенсивный прогрев ТП при инфильтрации дождевой влаги и фазовые переходы при формировании и разрушении сезонно-мерзлого слоя объясняют особенности формирования теплового поля ТП и наличие значительных возмущений в кондуктивном механизме теплопереноса. Результаты температурного мониторинга могут быть использованы для количественного анализа процессов теплопередачи, взаимодействия солнечного и внутриземного тепловых потоков и, в частности, для определения теплофизических свойств ТП. Так, по этим данным ранее авторами были выполнены оценки эффективного коэффициента температуропроводности торфяной залежи, который в летние месяцы 2005 г. изменялся от 4.1 до 6.7 см²/с [Дюкарев и др., 2006].

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 08-05-00426-а) и интеграционного проекта СО РАН № 27.

ЛИТЕРАТУРА

Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / Ред. М.В. Кабанов. Томск, Изд-во ИОА СО РАН, 2000, 229 с.

Васюганское болото (природные условия, структура и функционирование), 2-е изд. Томск, ЦНТИ, 2003, 212 с.

Вомперский С.Э. Роль болот в круговороте углерода // Биогеоценологические особенности болот и их рациональное использование. М., Наука, 1994, с. 5—37.

Глаголев М.В., Головацкая Е.А., Шнырев Н.А. Эмиссия парниковых газов на территории Западной Сибири // Сиб. экол. журн., 2007, № 2, с. 197—210.

Головацкая Е.А., Порохина Е.В. Ботаника с основами фитоценологии: Биологическая продуктивность болотных биогеоценозов. Учебно-методическое пособие / Ред. В.А. Дырин. Томск, Изд-во Том. ун-та, 2005, 64 с.

Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В. Влияние ландшафтных и гидрометеорологических условий на эмиссию CO₂ в торфоболотных экосистемах // Докл. РАН, 2008, т. 418, № 4, с. 1—4.

Дучков А.Д., Казанцев С.А., Дучков А.А. Экспериментальное изучение вариаций температуры дна глубоководной части Южно-Байкальской впадины // Докл. РАН, 2005, т. 403, № 5, с. 682—684.

Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Дучков А.Д., Казанцев С.А. Экспериментальное исследование теплового режима деятельного слоя торфяной залежи в теплый период года // Материалы V Международного симпозиума «Контроль и реабилитация окружающей среды». Томск, 2006, с. 101—103.

Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Пространственные и временные масштабы наблюдаемого потепления в Сибири // Докл. РАН, 2007, т. 412, № 6, с. 1—5.

Казанцев С.А., Дучков А.Д. Автономная аппаратура для режимных измерений температуры // Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. М., Наука, 1992, с. 365—373.

Лыков А.В. Теплообмен. Справочник. М., Энергия, 1978, 476 с.

Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск, Наука, 1979, 284 с.

Прокушкин А.С., Гуггенбергер Г. Роль климата в выносе растворенного органического вещества с водосборов криолитозоны Средней Сибири // Метеорология и гидрология, 2007, № 6, с. 93—105.

Романов В.В. Гидрофизика болот Л., ГИМИЗ, 1961, 360 с.

Семенов С.М. Парниковые газы и современный климат Земли. М., ИЦ «Метеорология и гидрология», 2004, 175 с.

Тепловое поле недр Сибири / Ред. Э.Э. Фотиади. Новосибирск, Наука, 1987, 190 с.

Чудновский А.Ф. Теплофизика почв. М., Наука, 1976, 352 с.

Botch M.S., Kobak K.I., Vinson T.S., Kolchugina T.P. Carbon pools and accumulation in peatlands of the former Soviet Union // *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, v. 9, № 1, p. 37—46.

Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third assessment report of the Intergovernmental panel on climate change / Eds. J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs et al. Cambridge, Cambridge University Press, 2001, 881 p.

Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecol. Appl.*, 1991, № 1, p. 182—195.

Lafleur P.M., Moore T.R., Roulet N.T., Froking S. Ecosystem respiration in a cool temperate bog depends on peat temperature but not water table // *Ecosystems*, 2005, v. 8, p. 619—629.

Moore T.R., Dalva M. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils // *J. Soil Sci.*, 1993, v. 44, p. 651—664.

Outcalt S.I., Nelson F.E., Hinkel K.M. The zero-curtain effect: heat and mass transfer across an isothermal region in freezing soil // *Water Resources Research*, 1990, v. 26, № 7, p. 1509—1516.

Pannikov N.S., Dedysh S.N. Cold season CH₄ and CO₂ emission from boreal peat bogs (West Siberia): winter fluxes and thaw activation dynamics // *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, v. 14, p. 1071—1080.

Sheng Y., Smith L.C., MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Frey K.E., Velichko A.A., Lee M., Beilman D.W., Dubinin P. A high-resolution GIS-based inventory of the West Siberian peat carbon pool // *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, v. 18, p. GB3004.

*Рекомендована к печати 27 августа 2008 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
10 июня 2008 г.*