

## БИОЛОГИЯ

УДК 550.361+551.525

*Е.А. Дюкарев*

### АМПЛИТУДА СУТОЧНОГО ХОДА ТЕМПЕРАТУРЫ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЫ

Приводятся результаты мониторинга температуры торфяной почвы болота, расположенного в зоне южной тайги Западной Сибири. Проведен анализ амплитуды суточного хода температуры почвы на разных глубинах в теплое время года и времени наступления максимумов и минимумов температуры в суточном ходе. По затуханию амплитуды суточного хода температуры с глубиной рассчитан эффективный коэффициент теплопроводности почвы.

**Ключевые слова:** температура почвы; амплитуда суточного хода; торфяная почва; болотные экосистемы; температуропроводность почвы.

Температура почвы и амплитуда ее суточного хода являются важными показателями, воздействующими на процессы, протекающие в почве [1–3]. Температура является результирующей характеристикой интенсивности энергетических процессов, таких как перераспределение приходящей солнечной радиации, транспирации и конденсации влаги и потока тепла в почву. Характер распределения температуры в верхнем слое почвы очень важен для жизни растений и почвенной фауны. Наибольшие колебания температуры и влажности наблюдаются именно в поверхностном – корнеобитаемом слое [4, 5], где плотность почвенных бактерий и грибов максимальна. Изучение теплового режима почв возможно при организации специальных наблюдений с использованием автоматических измерителей, что дает возможность получать ряды температуры с высоким временным разрешением за длительный срок в естественных условиях [6–8].

Температурный режим торфяных почв существенно отличается от температурного режима минеральных почв [3, 5, 9, 11]. Торфяная почва имеет сглаженную динамику температуры, по сравнению с минеральной. По среднемесячным данным, в теплое время года верхние слои торфяной почвы холоднее минеральной, а в холодное время – теплее. Повышенная тепловая инерция торфяной почвы препятствует как ее нагреву, так и охлаждению. Глубина промерзания на болоте почти в три раза меньше, чем на суходоле [3, 8, 11].

В настоящей работе представлены результаты инструментальных исследований температурного режима торфяной почвы болота, расположенного в зоне Южной Тайги Западной Сибири, по данным автоматических измерений, а также результаты определения коэффициента эффективной температуропроводности почвы по затуханию естественных температурных волн в почве.

#### Объект исследования

Исследование температурного режима торфяной почвы проводилось в олиготрофном сосново-кустарничково-сфагновом биогеоценозе (низком рьяме), на территории стационара «Васюганье» (ИМКЭС СО РАН) в пределах Бакcharского района Томской области [10, 12]. 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 [12].

Торфяная залежь низкого рьяма в месте расположения датчиков температуры достигает мощности 2 м и имеет верховой топяной вид строения. Влажность верхнего метрового слоя торфа варьирует в диапазоне 93–96%, глубже влажность составляет 85–90%. Зольность, как и плотность, увеличивается с глубиной. Плотность верхних слоев мохового очеса очень мала (0,017–0,04 г/см<sup>3</sup>) – почти в 100 раз ниже, чем плотность минеральных почв [6]. Низкая плотность, высокая влажность и близкое к поверхности расположение уровня грунтовых (болотных) вод формируют совершенно особый тепловой режим почвы.

#### Измерительная аппаратура

Мониторинг температуры почвы выполнялся автономным измерителем температуры, разработанным в ИГМ СО РАН [7, 8]. Датчики температуры находились на восьми глубинах (2, 5, 10, 15, 25, 40, 60 и 80 см). Измерения проводились в течение 1898 дней (или 62 месяцев) с 28 июня 2005 г. по 6 сентября 2010 г. с временным шагом 15 мин в летнее время (май – сентябрь) и 1 ч зимой (октябрь – апрель). Некоторые результаты анализа суточного хода температур почвы на разных глубинах за период 2005–2007 гг. представлены в работе [8]. В работе [11] на основании среднемесячных значений подробно описаны особенности годового хода температуры, а также проведено сравнение температурных режимов торфяной почвы и минеральной почвы на суходоле.

#### Годовой ход температуры почвы

Результаты наблюдений за температурой почвы показывают существование годового хода температуры на всех исследованных глубинах. Годовой цикл температуры имеет два периода: нагревания, сопровождаемый в начальной стадии оттаиванием мерзлых слоев почвы, и охлаждения, сопровождаемый сезонным промерзанием. Максимальные температуры на всех глубинах в годовом ходе положительны, наблюдаются в июле – сентяб-

ре и формируются под влиянием тепла, поступающего к поверхности, выпадающими осадками и колебаниями уровня болотных вод. Изменение среднемесячных значений температуры воздуха и почвы за 2005–2010 гг. приведено на рис. 1. Максимальная температура самого верхнего слоя (2 см) наблюдалась в июле и изменялась

от 12,7 в 2006 г. до 18,6°С в 2007 г. Наибольшая температура почвы в аэрируемом слое (на глубинах 10, 15 и 25 см) может приходиться как на июль (2007, 2008 гг.), так и на август (2005, 2006, 2009, 2010 гг.). В глубоких слоях максимум температуры в годовом ходе приходится на август – сентябрь.

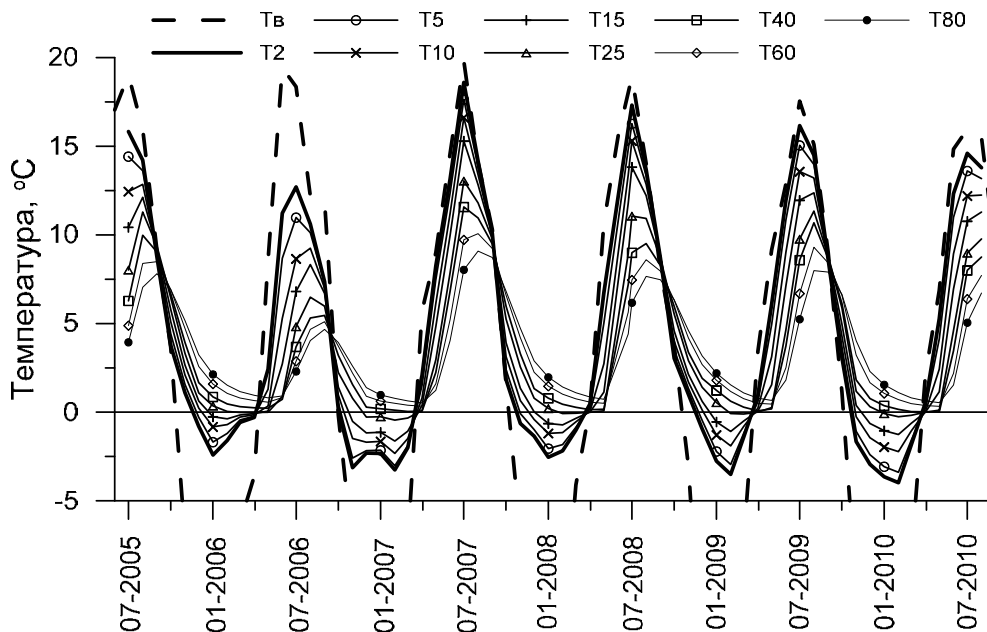


Рис. 1. Изменение среднемесячных значений температуры воздуха ( $T_{\text{в}}$ ) и температуры почвы на разных глубинах (2, 5, 10, 15, 25, 40, 60 и 80 см) за 2005–2010 гг. (Для температуры воздуха не показаны зимние температуры, достигающие  $-32^{\circ}\text{C}$ )

На формирование минимальных температур почвы в годовом цикле, кроме температуры поверхности, влияют: фазовые переходы при замерзании влаги в торфе, высота снежного покрова и величина тепла, аккумулированного торфяной залежью в течение теплого периода. Остывание верхних слоев начинается уже в августе, а в октябре охватывает верхний метровый слой почвы. В октябре после установления отрицательных температур воздуха начинается замерзание почвы, и в ноябре средняя месячная температура почвы на глубинах 2 и 5 см – отрицательна. Минимальные в годовом ходе среднемесячные температуры на глубинах 2, 5, 10 и 15 см наблюдаются в январе – феврале. Глубина 25 см является предельной глубиной, на которой были отрицательные температуры. Здесь наименьшая температура ( $-0,47^{\circ}\text{C}$ ) наблюдалась в феврале 2007 г. Минимальная температура почвы на глубине 40 см в зависимости от условий года может наблюдаться с марта ( $0,04^{\circ}\text{C}$  – 2007 г.) по май. Она колеблется в диапазоне от  $0,0^{\circ}\text{C}$  (май 2010 г.) до  $0,2^{\circ}\text{C}$  (май 2006 г.). Наименьшие значения температуры на глубинах 60 и 80 см наблюдались в апреле 2007 г. и мае 2010 г. и составили  $0,3$  и  $0,5^{\circ}\text{C}$  соответственно. Годовая амплитуда температуры в верхнем слое почвы (2 см) составляет  $18,8^{\circ}\text{C}$ . С глубиной годовая амплитуда уменьшается до величины  $6-6^{\circ}\text{C}$  на глубине 80 см.

#### Амплитуда суточного хода

Известно, что температура почвы в верхних слоях имеет годовой и суточный ход. Суточный ход темпера-

туры, осредненный за достаточно большой промежуток времени, представляет собой периодические колебания с одним максимумом и одним минимумом температуры [1, 3, 8]. Заметные внутрисуточные вариации температуры почвы появляются весной (в конце апреля) после исчезновения снежного покрова и начала прогрева торфяной толщи [8]. На рис. 2 приведены суточные изменения температуры почвы на глубинах 2, 5, 10, 15 и 25 см, осредненные за месяцы теплого периода 2009 г. (апрель – октябрь). Внутрисуточное распределение температуры в другие годы имеет подобный характер и здесь подробно не рассматривается. На глубинах 40, 60 и 80 см суточные колебания отсутствуют в течение всего года. В апреле 2009 г. суточный ход температуры регистрируется в верхних 15 см торфяной залежи. Его амплитуда уменьшается от  $2,8^{\circ}\text{C}$  на глубине 2 см до  $0,2^{\circ}\text{C}$  на глубине 15 см. На глубине 25 см температура стабильна в течение суток и составляет  $-0,37^{\circ}\text{C}$ . В мае 2009 г. суточные колебания в диапазоне от  $-0,2$  до  $-0,02^{\circ}\text{C}$  наблюдаются на глубине 25 см. В верхнем слое почвы (2 см) амплитуда суточного хода составляет  $7,4^{\circ}\text{C}$ , а на глубине 15 см –  $1,1^{\circ}\text{C}$ . В июне – июле 2009 г. амплитуда суточных вариаций температуры наибольшая в течение года на всех глубинах (рис. 2). Ее значения достигают величин  $8,9^{\circ}\text{C}$  в поверхностном слое (глубина 2 см) и  $0-3^{\circ}\text{C}$  на глубине 25 см. К сентябрю амплитуда температуры снижается до значений  $6,1^{\circ}\text{C}$  в слое 2 см и  $0,2^{\circ}\text{C}$  на глубине 25 см (см. рис. 2).

Представленные на рис. 2 амплитуды суточного хода являются результатом статистического осреднения

значений за все дни месяца одного года из всего периода наблюдений. Амплитуды, наблюдаемые в отдельные дни месяца, варьируют от нулевых значений (в пасмурные и дождливые дни) до максимальных (при ясной безоблачной погоде). Так, наибольшая амплитуда суточного хода за 2007–2010 гг. в верхних слоях почвы (2 и 5 см) была 15 мая 2008 г. и составила 18,8 и 12,9°C соответственно. Максимальные значения ам-

плитуды на глубине 10 см (6,7°C) зафиксированы 16 мая 2008 г. и 30 мая 2009 г. На глубине 15 см наибольшие амплитуды наблюдались в 2007 г., причем значения 3,5–3,6°C были зафиксированы 9 дней за теплый сезон, и первая дата с такой амплитудой пришлась на 12 мая, а последняя – на 30 июля. Максимальная амплитуда в слое 25 см (1,4°C) наблюдалась 17 июля 2007 г.

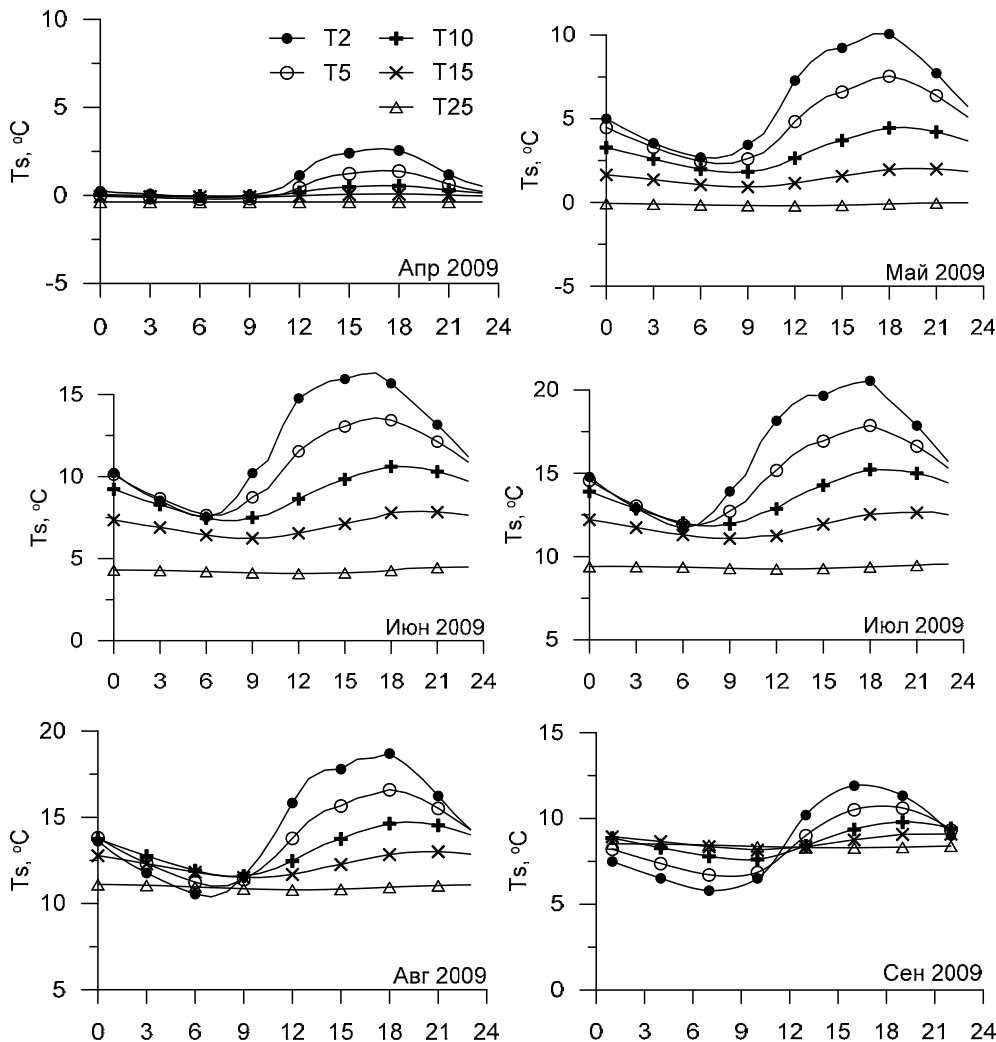


Рис. 2. Суточный ход температуры почвы на глубинах 2, 5, 10, 15 и 25 см, осредненный за месяцы

Дневной режим температуры в приземном слое воздуха и почвы определяется главным образом количеством поглощаемой подстилающей поверхностью коротковолновой радиации. Ночью в отсутствие коротковолновой радиации в результате непрерывных потерь энергии за счет эффективного длинноволнового излучения деятельной поверхности происходит охлаждение прилегающих слоев воздуха и почвы [2]. Для дальнейшего анализа были отобраны только те дни, в которые суточные колебания температуры наблюдаются в явном виде и имеют «правильный» суточный ход. Данные дни определялись по наличию амплитуды температуры более 2°C на глубине 5 см и с минимумом температуры в ночное время и максимумом – после полудня. Из рассмотрения также были исключены дни с существенными осадками, поскольку инфильтрация воды через рыхлые слои торфа и мохового очеса и по-

следующий подъем уровня болотных вод существенно меняют распределение температуры в почве [8]. Данные дни хорошо определяются по стремительному росту температуры на 0,5–2°C на глубине 40 см в течение нескольких часов.

Число дней с явно выраженным суточным ходом температуры почвы слабо меняется в течение года и с мая по сентябрь составляет 21–23 дня в месяц (табл. 1). В отдельные годы суточные колебания температуры могут наблюдаться и в последние 4–5 дней апреля. Значения амплитуды суточного хода температуры почвы приведены в табл. 1. Особенностью торфяных почв являются высокие температурные колебания в самом верхнем слое почвы. Нижележащие слои торфа пропитаны водой и, как и большие водоемы, аккумулируют тепло, сглаживая температурные колебания. На глубине 25 см суточная амплитуда температуры в сере-

дине лета не превышает  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Отсутствие конвективных движений воды также способствует повышению

тепловой инерции слоев торфяной почвы, находящихся ниже уровня воды.

Т а б л и ц а 1

Амплитуда суточного хода температуры почвы в разные месяцы на глубинах 2, 5, 10, 15 и 25 см

Месяц	n	2 см	5 см	10 см	15 см	25 см
Май	23	$10,24 \pm 3,14$	$6,97 \pm 2,24$	$3,61 \pm 1,26$	$1,61 \pm 0,66$	$0,25 \pm 0,14$
Июнь	21	$10,18 \pm 3,11$	$6,8 \pm 2,14$	$3,92 \pm 1,19$	$2,12 \pm 0,6$	$0,53 \pm 0,17$
Июль	23	$9,71 \pm 2,14$	$6,4 \pm 1,49$	$3,84 \pm 0,93$	$2,05 \pm 0,48$	$0,5 \pm 0,16$
Август	23	$8,52 \pm 2,06$	$5,65 \pm 1,39$	$3,35 \pm 0,85$	$1,82 \pm 0,47$	$0,47 \pm 0,16$
Сентябрь	22	$5,92 \pm 1,97$	$3,96 \pm 1,43$	$2,25 \pm 0,88$	$1,22 \pm 0,44$	$0,36 \pm 0,19$

Примечание. Среднее ( $^{\circ}\text{C}$ ) за 2007–2010 гг.  $\pm$  среднеквадратичное отклонение. n – число дней в месяце с явно выраженным суточным ходом.

### Запаздывание тепловой волны

Исследование суточного распределения температуры показало, что максимум температуры почвы на глубине 2 см наблюдается приблизительно в 16 ч местного времени (табл. 2) в мае – июне, а к сентябрю время наступления максимума сдвигается на 16:30. С глубиной максимальная температура в суточном ходе

уменьшается, а время ее наступления наблюдается позже.

Так, в июне – июле на глубине 5 см максимум наблюдается в 17 ч, на глубине 10 см – в 18 ч, на глубине 15 см – в 20 ч (см. табл. 2). На глубине 25 см от поверхности максимум температуры выражен слабо и время его наступления запаздывает относительно времени наступления на глубине 2 см более чем на 5 ч.

Т а б л и ц а 2

Время наступления максимума и минимума в суточном ходе температуры почвы в разные месяцы на глубинах 2, 5, 10, 15 и 25 см, среднее (час:мин местного времени) за 2007–2010 гг.

Месяц	Минимум					Максимум				
	2 см	5 см	10 см	15 см	25 см	2 см	5 см	10 см	15 см	25 см
Май	6:39	7:05	7:49	8:00	9:52	15:52	16:55	17:51	18:56	19:24
Июнь	6:03	6:40	7:38	8:29	11:33	16:15	17:09	18:26	20:32	21:34
Июль	6:02	6:39	7:32	8:39	12:32	15:56	17:06	18:35	20:21	21:41
Август	6:41	7:18	8:11	9:10	13:01	16:14	17:12	18:50	20:28	21:57
Сентябрь	7:29	7:55	8:56	10:00	13:12	16:31	17:18	18:37	20:15	21:50

Минимум температуры поверхности почвы перед восходом солнца является естественным следствием радиационного выхолаживания почвы в ночное время. Моховой покров благодаря малой теплопроводности способствует большому запаздыванию наступления экстремальных температур с увеличением глубины.

В июне – июле минимум температуры почвы в суточном ходе на глубине 2 см наблюдается в 6 ч. На глубине 5 см время запаздывания (относительно минимума температуры на глубине 2 см) составляет 40 мин, на глубине 10 см – 1 ч 30 мин, на глубине 15 см – 2 ч 30 мин и на глубине 25 см – более 5 ч (см. табл. 2).

В мае, августе и сентябре минимум температуры в верхнем 10-сантиметровом слое наблюдается позже, чем в середине лета, на 40–90 мин. В мае наблюдаются минимальные значения (около 3,5 ч) времени запаздывания как минимума, так и максимума на глубине 25 см, вероятно, вследствие иссушения верхнего слоя мохового очеса, располагающегося над мерзлыми слоями.

Максимальная глубина промерзания на болоте составляет 30–40 см и приходится на март. Остаточный мерзлый слой сохраняется в точке наблюдения до июня.

Увлажнение поверхностного слоя мха в летние месяцы увеличивает его тепловую инерцию, и время запаздывания распространения тепловой волны возрастает.

### Определение эффективной теплопроводности

Изменение амплитуды колебаний температуры с известным периодом позволяет определить коэффициент эффективной теплопроводности, который в скрытом виде учитывает передачу тепла не только молекулярной теплопроводностью, но и всеми другими видами теплообмена. Коэффициент теплопроводности характеризует способность среды выравнять свою температуру, которая определяется не только теплопроводностью среды, но и ее объемной теплоемкостью. Коэффициент теплопроводности является производной теплофизической характеристикой. Он численно равен повышению температуры, которое произойдет в единице объема почвы при поступлении в нее тепла, численно равного ее теплопроводности [6]. Эффективный коэффициент теплопроводности зависит от температуры среды, градиента температуры и в значительной мере от процессов переноса влаги и фазовых переходов внутри среды.

Аналитическое решение одномерного уравнения теплопроводности при периодическом ходе температуры на поверхности почвы и постоянных свойствах среды показывает [1], что температура почвы на разных глубинах испытывает периодические колебания такого же периода, как и температура поверхности почвы. Однако при проникновении на глубину амплитуда и фаза колебаний изменяются. Амплитуда колебаний температуры ( $A$ ) убывает с глубиной по экспо-

ненциальному закону  $A = A_0 \exp(-z\sqrt{\pi/a\Pi})$ , где  $\Pi$  и  $A_0$  – период и амплитуда колебаний на поверхности почвы;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $z$  – глубина [1].

Данная формула получена при использовании предположений о постоянстве коэффициента температуропроводности в пространстве и во времени, а также о строго гармонической синусоидальной форме колебаний температуры на поверхности. Предположение об однородности теплофизических свойств является весьма грубым и может приводить к возникновению ошибок определения температуропроводности при использовании данного метода [6].

В табл. 3 приведены регрессионные соотношения, связывающие амплитуду суточного хода температуры почвы с глубиной. Регрессионные соотношения получены по данным, приведенным в табл. 1. Экспоненциальная модель очень хорошо описывает наблюдаемые закономерности, о чем говорят высокие (более 0,99) коэффициенты детерминации модели. Множитель перед экспонентой служит для оценки величины амплитуды поверхности почвы. Амплитуда температуры поверхности снижается от 16°C в мае до 7,5°C в сентябре. Период колебаний температуры на поверхности почвы составляет 24 ч, что дает возможность из вышеприведенного уравнения выразить коэффициент температуропроводности  $a$ . Эффективная температуропроводность верхнего слоя торфяной почвы, рассчитанная по данным мониторинга температуры, составляет 8–9 см<sup>2</sup>/ч с июня по сентябрь. В мае коэффициент температуропроводности ниже (5,05 см<sup>2</sup>/ч) вследствие пониженной влажности поверхностного слоя. Температуропроводность торфяной почвы и мохового оочеса значительно ниже температуропроводности серой лесной

почвы, которая составляет от 5 до 30 см<sup>2</sup>/час в зависимости от влажности [6].

Таблица 3

Коэффициент эффективной температуропроводности ( $a$ ) верхних 25 см торфяной почвы, среднее (°C) за 2007–2010 гг.

Месяц	Регрессионное уравнение	$R^2$	$a$ , см <sup>2</sup> /ч
Май	$A = 15,96 \exp(-0,161 z)$	0,9929	5,05
Июнь	$A = 13,38 \exp(-0,127 z)$	0,9981	8,12
Июль	$A = 12,86 \exp(-0,128 z)$	0,9966	7,99
Август	$A = 11,08 \exp(-0,124 z)$	0,9978	8,51
Сентябрь	$A = 7,46 \exp(-0,121 z)$	0,9997	8,94

Примечание.  $A$  – амплитуда суточного хода,  $z$  – глубина,  $R^2$  – коэффициент детерминации регрессионного уравнения.

Анализ результатов температуры торфяной почвы с высоким временным разрешением показал, что суточные колебания температуры проникают до глубины 25 см. С увеличением глубины наблюдаются уменьшение амплитуды тепловой волны и запаздывание наступления экстремумов температуры. Амплитуда суточного хода температуры составляет 5,9–10,2°C в поверхностном слое мха и 0,3–0,5°C – на глубине 25 см. Время запаздывания тепловой волны на глубине 25 см составляет более 5 часов с июня по сентябрь. Тепловые колебания в торфяной почве эффективно гасятся: в верхнем слое – вследствие высокой теплоизолирующей способности мохового оочеса, в нижележащих слоях – из-за насыщенности их водой и отсутствия конвективных движений.

Оценка значений коэффициентов эффективной температуропроводности торфяной почвы, проведенная по затуханию амплитуды суточных колебаний температуры, может быть использована для моделирования пространственной и временной динамики температуры верхних слоев почвы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Курс метеорологии (Физика атмосферы) / под ред. П.Н. Тверского. Л. : ГИМИЗ. 1951. 888 с.
2. Слейтер Р., Маклрой И. Практическая микроклиматология. М. : Прогресс, 1964. 308 с.
3. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. М. : Колос, 1972. 360 с.
4. Природные режимы средней тайги Западной Сибири. Новосибирск : Наука, 1977. 302 с.
5. Климатические условия и микроклимат таежных геосистем Сибири. Новосибирск : Наука, 1980. 232 с.
6. Полевые и лабораторные методы исследования физических свойств и режимов почв : метод. руководство / под ред. Е.В. Шеина. М. : Изд-во МГУ, 2001. 200 с.
7. Казанцев С.А., Дучков А.Д. Автономная аппаратура для режимных измерений температуры // Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. Новосибирск : Наука, 1992. С. 365–373.
8. Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Дучков А.Д., Казанцев С.А. Экспериментальное исследование температурного режима торфяной залежи Бакчарского болота (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 6. С. 745–754.
9. Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим. Л. : Гидрометеониздат, 1976. 447 с.
10. Васюганское болото (природные условия, структура и функционирование). 2-е изд. Томск : ЦНТИ, 2003. 212 с.
11. Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А. Особенности температурного режима торфяной залежи олиготрофного болота южной тайги Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2012. № 4 (в печати).
12. Головацкая Е.А., Порохина Е.В. Ботаника с основами фитоценологии: Биологическая продуктивность болотных биогеоценозов : учеб.-метод. пособие / под ред. В.А. Дырина. Томск : Изд-во Том. гос. пед. ун-та, 2005. 64 с.

Статья представлена научной редакцией «Биология» 16 октября 2012 г.