

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОСФЕРЕ

УДК 551.578.42 + 551.525

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И СНЕЖНОГО ПОКРОВА  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЗОННОМЕРЗЛОГО СЛОЯ ПОЧВОГРУНТОВ**

**Е.А. Дюкарев**

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
634055, Томск, пр. Академический, 10/3, Россия; egor@imces.ru*

Исследованы особенности динамики сезонномерзлого слоя по среднесуточным данным температуры почвы на метеостанции Бакчар за период с 1963 по 2011 г. и показана связь характеристик сезонного промерзания с температурой воздуха и динамикой снежного покрова.

*Температура почвы, сезонномерзлый слой, снежный покров, температура воздуха, глубина промерзания*

**INFLUENCE OF AIR TEMPERATURE AND SNOW COVER  
ON CHARACTERISTICS OF SEASONALLY FROZEN SOIL LAYER**

**E.A. Dyukarev**

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS,  
634055, Tomsk, Akademicheskii pr., 10/3, Russia; egor@imces.ru*

Peculiarities of the regime of seasonally-frozen layer of soil are described using Bakchar (Tomsk oblast) meteorological station daily records for 1963–2011. Relations between seasonally-frozen layer, air temperature and snow cover characteristics are given.

*Soil temperature, seasonally frozen layer, snow cover, air temperature, depth of freezing*

**ВВЕДЕНИЕ**

Температура почвы является чувствительным показателем климата, интегрирующим изменения в температуре приземного воздуха, атмосферных осадков и т. д. Она играет важную роль во всех физических, биологических и микробиологических процессах, происходящих в почве. Реакция температуры почвогрунтов на современное потепление климата в значительной мере зависит от ландшафтных условий территории наблюдаемых объектов [Павлов, 2008].

Исследованию изменений температуры верхних и глубинных слоев почвогрунтов в период потепления климата в конце XX в. посвящено большое количество работ, в которых в качестве исходных данных для анализа используются наблюдения метеорологических станций [Гиличинский и др., 2000; Васильев и др., 2008; Шерстюков, 2008; Трофимова, Балыбина, 2012] и архивы реанализов – динамически согласованных глобальных полей, характеризующих состояние земной поверхности и атмосферы [Золотов и др., 2011]. Тренды среднегодовых значений температуры почвогрунтов на

глубине 320 см составляют 0.1–0.8 °С/10 лет [Павлов, 2008; Шерстюков, 2008; Золотов и др., 2011; Балыбина, Трофимова, 2013; Дичков, 2006]. Тенденции изменения температуры почвогрунтов в верхних слоях достаточно сложны и связаны с изменениями температуры воздуха, режима атмосферных осадков, характеристик снежного покрова [Попова, Полякова, 2013; Шмакин и др., 2013; Zang et al., 2005].

Для южной части Западной Сибири обнаружена статистически значимая обратная корреляция между сроками разрушения снега и температурой приземного воздуха в марте [Попова, Полякова, 2013], что говорит об устойчивом влиянии потепления в начале весны на сроки снеготаяния. В районах арктических морей севернее 70° с.ш. отмечается тренд к более позднему образованию снежного покрова и более раннему разрушению [Радионон и др., 2013].

Изменение характеристик снежного покрова и колебания температуры воздуха в холодный период непосредственно воздействуют на развитие и

деградацию сезонномерзлого слоя [Максютова, Густокашина, 2009]. Изучение многолетней динамики характеристик климата в холодный период года и температуры почвогрунтов позволит выявить факторы, определяющие развитие и деградацию сезонномерзлого слоя.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе исследуются особенности динамики сезонномерзлого слоя по данным наблюдений на метеостанции Бакчар (Томская область) за период 1963–2011 гг. и связь характеристик сезонного промерзания с температурой воздуха и высотой снежного покрова. Среднесуточные данные по температуре воздуха, сумме атмосферных осадков, высоте снежного покрова и температуре почвы на метеостанции получены из массива данных ВНИИГМИ–МЦД (<http://www.meteo.ru/climate>) [Шерстюков, 2012].

Для описания температурного режима холодного периода года применялись следующие параметры: среднемесячная температура воздуха и средняя температура холодного периода (с ноября по март), даты первого и последнего мороза и даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С весной и осенью.

Для характеристики снежного покрова использовались: высота снежного покрова; даты появления и схода снежного покрова, образования и разрушения устойчивого снежного покрова; число дней в году со снежным покровом и максимальная его высота за зиму [Методы..., 1957]. Высота снежного покрова возрастает в течение зимнего периода и убывает в конце зимы настолько быстро, что по среднемесячным значениям невозможно следить за его динамикой. В связи с этим используются суточные данные.

Расчетная глубина промерзания определялась по глубине проникновения температуры 0 °С в почву [Методы..., 1957]. Глубина промерзания рассчитывалась путем линейной интерполяции температур почвы между двумя соседними слоями при условии, что в одном из слоев температура отрицательная. Для определения глубины промерзания использовались суточные данные о температуре почвы на глубинах 20, 40, 80, 160 и 320 см с 1963 по 2011 г. Поскольку данные измерений температуры в слое 0–20 см от поверхности отсутствуют, оценки развития сезонномерзлого слоя не включают верхний 20-сантиметровый слой почвы.

Метеостанция Бакчар расположена на террасе р. Бакчар. Почва в месте расположения метеостанции дерново-глеевая тяжелосуглинистая. Среднегодовая температура воздуха за 1963–2011 гг. составляет –0.2 °С. Самый теплый месяц – июль (18.3 °С), самый холодный – январь (–19.2 °С). Сумма годовых осадков 471 мм, из них

43 % приходится на летние месяцы и 14 % на зимние.

Максимальная среднемесячная температура почвы на глубине 20 см отмечается в июле (17 °С), минимальная (–2.4 °С) – в феврале. С глубиной наблюдается уменьшение амплитуды годового хода температуры и запаздывание наступления максимальных и минимальных значений температуры почвогрунтов. На глубине 320 см амплитуда составляет 4.4 °С, максимум (7.3 °С) – в октябре, минимум (2.8 °С) – в мае. Средняя годовая температура в слое почвы от 20 до 320 см равна 4.9 °С.

### ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД

В среднем за 1963–2011 гг. отрицательные значения среднемесячной температуры воздуха на метеостанции наблюдаются с ноября (–9.0 °С) по март (–8.9 °С). В отдельные годы отрицательные температуры отмечены в октябре (до –6.5 °С) и апреле (до –5.6 °С). В середине зимы (январь) температура опускается до –19.2 °С. Самой холодной была зима 1968/69 г., когда средние месячные температуры ноября (–18.4 °С), декабря (–26.3 °С) и февраля (–29.7 °С) были минимальными за период исследования. Средняя температура холодного периода (с ноября по март) в 1968/69 г. составила –23.4 °С, в то время как средняя многолетняя величина равна –14.1 °С. Минимальная температура января (–31.8 °С) была в 2006 г., что на один градус ниже, чем в 1968 г. Положительные аномалии в зимние месяцы чаще наблюдаются в конце исследуемого периода: для ноября (с температурой –2.8 °С) – в 2008 г., декабря (–7.4 °С) – в 2006 г., января (–9.3 °С) и февраля (–8.1 °С) – в 2002 г.

Скорость увеличения среднегодовой температуры воздуха составляет 0.33 °С/10 лет. Значимые тенденции роста температуры обнаружены для октября (0.6 °С/10 лет), февраля (0.93 °С/10 лет), марта (0.7 °С/10 лет) и мая (0.55 °С/10 лет). В остальные месяцы также есть тенденции к потеплению, но незначимые. Исключение составляют январь и июль с незначимыми трендами уменьшения температуры. Таким образом, современное потепление климата [IPCC, 2007] проявляется преимущественно в месяцы установления и таяния снежного покрова и интенсивного развития/деградации сезонномерзлого слоя.

На развитие мерзлоты также могут влиять даты наступления морозов и устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С. Даты первых и последних морозов, обычно называемых заморозками, связаны с ночным выхолаживанием и определяются по показаниям минимального термометра [Методы..., 1957]. Средняя многолетняя дата первого мороза приходится на 19 сентября, варьирова в широких пределах – от 19 августа (2007 г.)

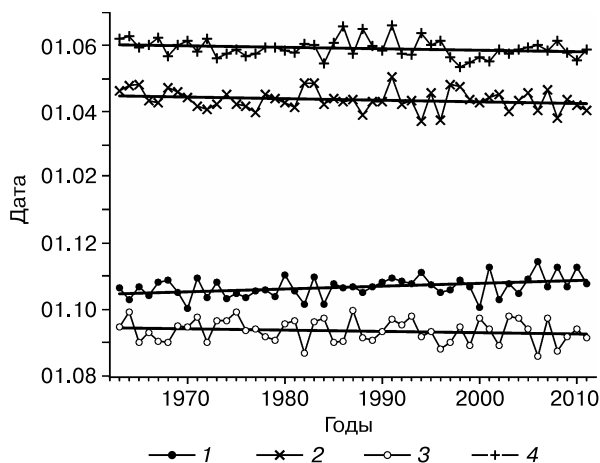


Рис. 1. Даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °С.

1 – начало зимы; 2 – конец зимы; 3 – первый мороз; 4 – последний мороз.

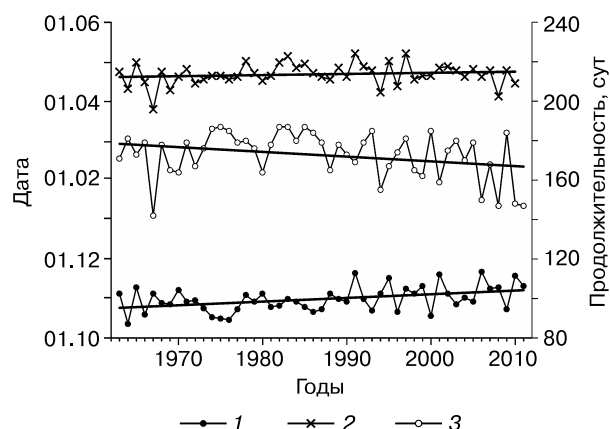


Рис. 2. Даты образования (1) и исчезновения (2) устойчивого снежного покрова и его продолжительность (3).

до 30 сентября (1987 г.). Последний мороз отмечается в пределах от 12 мая (1999 г.) до 19 июня (1992 г.) при средней дате 29 мая. Следовательно, период, когда в течение суток могут наблюдаться отрицательные температуры воздуха, составляет 260 дней (среднеквадратическое отклонение СКО = 15.3). С 1963 по 2011 г. происходило смещение дат как первого, так и последнего мороза на более ранние сроки со скоростью 1.2–1.3 сут/10 лет, однако тенденция не является значимой, поскольку разброс дат от года к году очень велик (рис. 1).

Даты устойчивого перехода через 0 °С определялись по ежедневным среднесуточным температурам воздуха [Кельчевская, 1971]. Период с отрицательными суточными температурами воздуха продолжается в среднем 172 дня – с 21 октября по 11 апреля. Дата наступления отрицательных температур осенью сдвигается со скоростью 2.6 сут/10 лет на поздние сроки, а дата наступления положительных температур весной – со скоростью 1.5 сут/10 лет на более ранние сроки. В результате продолжительность периода с отрицательными температурами сокращается со скоростью 4.1 сут/10 лет (см. рис. 1).

### СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ

Появившийся в первый раз снежный покров обычно сходит под влиянием последующих оттепелей и только после устойчивого понижения температуры устанавливается на зиму. В среднем за 1963–2011 гг. снежный покров появляется 10 октября. Среднеквадратическое отклонение этой даты составляет 10 сут. Самая ранняя дата появления снежного покрова – 3 сентября 1968 г., самая

поздняя – 10 ноября 2010 г. После появления снежного покрова его установление наблюдается в среднем через 21 день, однако в четырех случаях первый снег не исчезал. По данным наблюдений на метеостанции не зарегистрировано ни одного года, когда устойчивый снежный покров отсутствовал.

Средняя дата образования устойчивого снежного покрова приходится на 30 октября (СКО = 10 сут). Самое раннее образование снежного покрова произошло 12 октября (1964 г.), самое позднее – 21 ноября (2006 г.). Динамика дат образования и разрушения снежного покрова приведена на рис. 2. Следует отметить, что в течение исследуемого периода наблюдается смещение даты образования устойчивого снежного покрова на более поздний срок. Величина линейного тренда, характеризующего данное изменение, составляет 2.8 сут за 10 лет (коэффициент детерминации линейной регрессии  $r^2 = 0.18$ ).

Разрушение устойчивого снежного покрова происходит к 21 апреля (СКО = 8 сут). Самое раннее освобождение от снега было 26 марта (1968 г.), самое позднее – 8 мая (1992, 1998 гг.). Таким образом, продолжительность залегания устойчивого снежного покрова, по данным метеостанции Бакчар, составляет 173 дня и варьирует от 142 дней в 1967 г. до 187 дней в 1975, 1982, 1983 и 1985 гг. (см. рис. 2).

Максимальная высота снежного покрова за зиму наблюдается в середине марта и составляет 64.8 см в среднем за 1963–2011 гг. (СКО = 19.5 см). В малоснежную зиму 1967 г. максимальная высота снега не превышала 23 см, а в 1990 г. снежный покров достигал 111 см.

Для даты разрушения снежного покрова также наблюдается тенденция к сдвигу на более поздний срок. Линейный тренд этого изменения составляет всего 0.4 сут/10 лет, и поскольку дата установления сдвигается быстрее, чем дата разрушения, происходит уменьшение продолжительности залегания снежного покрова со скоростью 2.4 сут/10 лет. В течение исследуемого периода времени наблюдаются разнонаправленные тенденции изменения максимальной высоты снежного покрова за зиму. В первую половину периода происходит рост максимальной высоты снежного покрова со скоростью 16.1 см/10 лет, а в период с 1987 по 2011 г. – снижение высоты снега со скоростью 11.9 см/10 лет.

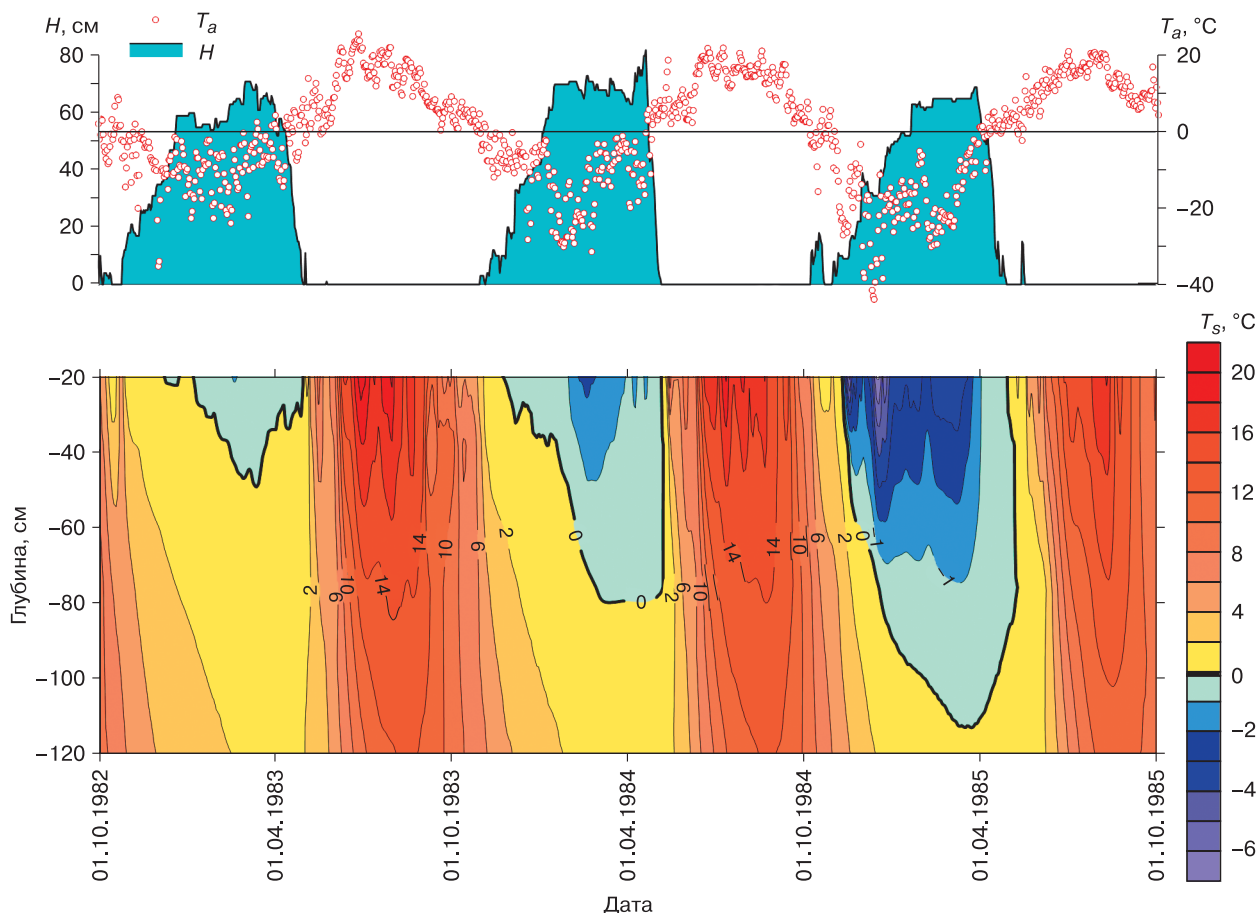
В Восточной Сибири в период с 1961 по 2010 г. наблюдается увеличение толщины снега со скоростями 0.6–6.0 см за 10 лет [Максютова, 2013]. Увеличение высоты снежного покрова создает дополнительную изоляцию почвы от изменений температуры воздуха и способствует сохранению зимой тепла, накопленного летом, что при-

водит к дополнительному повышению среднегодовой температуры почвогрунтов и ускоренному ее росту по сравнению с темпами потепления в атмосфере. Потепление почвогрунтов, безусловно, должно сказаться на режиме их промерзания.

### СЕЗОННОМЕРЗЛЫЙ СЛОЙ

**Динамика промерзания–оттаивания.** Данные о глубине проникновения температуры  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  в почву являются важной характеристикой термического режима почвогрунтов в холодный период, определяющей глубину слоя с отрицательными температурами.

Для иллюстрации динамики сезонномерзлого слоя на рис. 3 приведен временной ход среднесуточных значений высоты снежного покрова, температуры воздуха и изотермы температуры почвы с 1 октября 1982 г. по 1 октября 1985 г. Зимние периоды 1982/83 г. и 1984/85 г. показывают различные типы режимов промерзания–оттаивания. Первый – с аномально слабым развитием сезонномерзлого слоя, второй – со значительным промер-



**Рис. 3.** Временной ход среднесуточных значений высоты снежного покрова ( $H$ ), температуры воздуха ( $T_a$ ) и изотермы температуры почвы ( $T_s$ ) в 1982–1985 гг.

Жирная линия – расчетная глубина промерзания ( $T_s = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



занием и наличием талого слоя над мерзлым в весенний период.

Зима 1982/83 г. была умеренно теплой (средняя температура ноября  $-5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) со снежным покровом, установившимся 26 октября, в связи с чем промерзание началось очень поздно. Отрицательная температура на глубине 20 см наблюдалась только после 4 декабря. Средняя температура января 1983 г. ( $-11.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) на  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше средних многолетних значений, что не позволило развиваться мерзлому слою. В результате максимальная глубина промерзания зимой 1982/83 г. составила всего 51 см к 13 марта и в дальнейшем начала уменьшаться за счет оттаивания сезонномерзлого слоя только к концу апреля. Данное значение максимальной глубины промерзания за зиму является наименьшим за исследуемый период. Полное освобождение почвогрунтов от мерзлоты произошло к 30 апреля.

Зимой 1984/85 г. промерзание почвогрунтов началось 6 ноября, после установления снежного покрова 29 октября. Среднемесячная температура воздуха в ноябре 1984 г. составила  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а 30 ноября опускалась до  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что наряду со слабо развитым снежным покровом вызвало стремительное продвижение границы мерзлого слоя вглубь. К 27 декабря 1984 г. подошва мерзлого слоя достигла глубины 90 см, после чего промерзание немного замедлилось. К 11 марта 1985 г. почвогрунты промерзли на 116 см, затем началось оттаивание мерзлого грунта снизу из-за поступления тепла от глубинных слоев. К 26 апреля 1985 г. почвогрунт оттаял до глубины 89 см и тогда же началось протаивание с верхней границы. Далее разрушение мерзлого слоя происходило одновременно сверху и снизу, причем скорость протаивания сверху была существенно выше. Отрицательные температуры дольше всего (до 24 мая 1985 г.) наблюдались на глубине 80 см. Разрушение устойчивого снежного покрова произошло 26 апреля 1985 г.

**Средние многолетние характеристики сезонномерзлого слоя.** Как показано выше, характер развития сезонномерзлого слоя существенно различается даже в соседние годы. Если говорить о средних многолетних значениях, то, по данным наблюдений на метеостанции, промерзание на глубине 20 см регистрируется с 20 ноября (СКО = 16 сут), чему предшествуют первые заморозки (11 сентября) и появление первого снега (10 октября). Переход температуры воздуха к отрицательным значениям происходит 21 октября, после чего устанавливается устойчивый снежный покров (30 октября). В отдельные годы дата начала промерзания может наблюдаться как раньше (2 ноября 1991 г.), так и значительно позже (21 января 1980 г.). Динамика дат образования и разрушения сезонномерзлого слоя приведена на рис. 4.

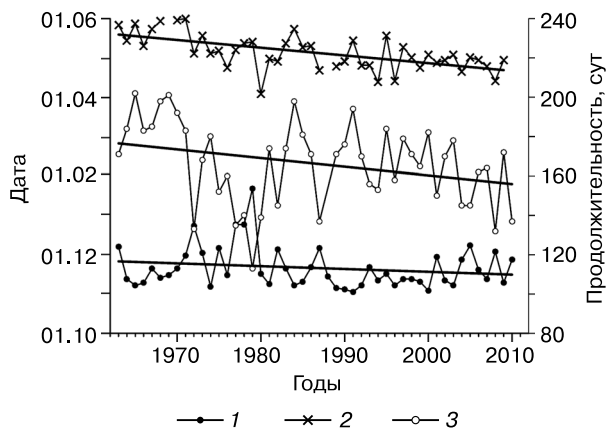


Рис. 4. Дата образования (1) и исчезновения (2) сезонномерзлого слоя и его продолжительность (3).

Характерный процесс разрушения сезонномерзлого слоя начинается после 9 марта с нижней его границы. Приблизительно в эти же сроки происходит уменьшение высоты снежного покрова. После 11 апреля устанавливается положительная температура воздуха и через 7 дней (18 апреля) начинается интенсивное таяние мерзлоты сверху. Скорость деградации мерзлого слоя сверху приблизительно в два раза выше, чем снизу. В среднем к 21 апреля исчезает устойчивый снежный покров, 1 мая наблюдается полное исчезновение снега и к 5 мая (СКО = 15 сут) почва окончательно освобождается от сезонной мерзлоты. Самая ранняя дата исчезновения мерзлого слоя — 4 апреля 1981 г. В 1969–1972 гг. мерзлота сохранялась аномально долго — до 1–4 июня (см. рис. 4).

Продолжительность существования сезонной мерзлоты составляет 166 дней, что всего на 7 дней меньше времени залегания снежного покрова. Анализ дат образования и разрушения мерзлого слоя и снежного покрова показал, что мерзлота на глубине 20 см появляется в среднем на 21 день позже образования устойчивого снежного покрова. В 1965, 1991 и 2006 гг. появление сезонномерзлого слоя зафиксировано раньше, чем устойчивого снежного покрова, на 2, 18 и 2 дня соответственно.

Максимальная глубина промерзания за зиму приходится на 9 марта и составляет 93.4 см в среднем за 1963–2011 гг. (СКО = 26.3 см). Наибольшая глубина промерзания (144 см) отмечена 2 февраля 1968 г. в аномально холодную зиму 1968/69 г. Наименьшая глубина промерзания (51 см) зафиксирована в 1982 г.

Еще одной важной характеристикой развития сезонномерзлого слоя является скорость продвижения границы мерзлоты. В таблице приведена скорость промерзания в течение первых 30 дней после образования мерзлого слоя, второго и треть-

**Скорость продвижения границы сезонномерзлого слоя по данным метеостанции Бакчар**

Период наблюдений	Скорость, см/сут		
	сред.	макс.	СКО
Первые 30 дней	0.84	1.82	0.45
30–60-й день	0.58	1.40	0.42
60–90-й день	0.49	1.76	0.59
Последние 30 дней	–0.86	–2.63	0.57

Примечание. Сред. – среднее многолетнее значение за 1966–2006 гг.; макс. – максимальное значение; СКО – среднеквадратическое отклонение.

его месяцев его существования, а также в течение последних 30 дней существования мерзлоты перед окончательным разрушением. Видно, что по мере развития мерзлого слоя скорость продвижения его границы снижается с 0.84 см/сут в начале периода до 0.49 см/сут в третий месяц существования мерзлого слоя.

В отдельные годы (например, 1998 г.) скорость промерзания возрастает до 1.82 см/сут в первые 30 дней промерзания, когда отрицательные температуры (до  $-10^{\circ}\text{C}$ ) наблюдались при несформировавшемся снежном покрове. Разрушение мерзлоты начинается с подошвы мерзлого слоя со средней скоростью 0.86 см/сут (максимум 2.63 см/сут). Таяние мерзлоты сверху имеет среднюю скорость 2.84 см/сут при максимуме 7.03 см/сут весной 1992 г. Стремительное разрушение мерзлоты в верхних слоях, вероятно, вызвано талой водой с небольшой положительной температурой, фильтрующейся под снежным покровом в приповерхностной части грунта [Шмакин и др., 2013]. Всего за 49 лет наблюдений, данные по которым имелись в нашем распоряжении, оттаивание сверху отсутствовало в 13 случаях, из них 10 приходится на вторую половину исследуемого периода. В эти годы, по-видимому, встреча фронтов протаивания сверху и снизу происходит выше глубины 20 см.

**Многолетние изменения характеристик сезонномерзлого слоя.** Анализ динамики дат начала и окончания промерзания (см. рис. 2), продолжительности существования сезонномерзлого слоя (см. рис. 3), а также скоростей его образования и разрушения (см. таблицу) позволил выявить тенденции этих величин с 1963 по 2011 г.

Дата разрушения мерзлого слоя сдвигается на более ранние сроки со скоростью 6.6 сут/10 лет (см. рис. 4). Дата освобождения грунта от мерзлоты определяется условиями начала весны, а также характером развития мерзлого слоя в течение зимы. На дату исчезновения мерзлоты значимое влияние оказывают температура холодного периода (коэффициент корреляции  $r = -0.37$ ), максимальная высота снежного покрова ( $r = -0.45$ ) и

дата устойчивого перехода температур воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  весной ( $r = 0.44$ ). Наблюдаемое потепление в феврале–марте и мае со скоростями от 0.55 до  $0.93^{\circ}\text{C}/10$  лет, а также незначительный сдвиг ( $-1.5$  сут/10 лет) даты перехода через  $0^{\circ}\text{C}$  приводят к указанным изменениям в дате исчезновения мерзлого слоя.

Дата образования мерзлого слоя незначительно сдвигается на более ранние сроки со скоростью 2.2 сут/10 лет. Продолжительность залегания мерзлого слоя уменьшается вследствие смещения даты его разрушения.

Скорости смещения дат начала протаивания мерзлоты сверху и перехода температур воздуха к положительным значениям в течение исследуемого периода практически совпадают и составляют  $-1.5$  сут/10 лет. Дата начала протаивания сверху также связана со средними месячными температурами марта ( $r = -0.34$ ), апреля ( $r = -0.52$ ) и датой исчезновения устойчивого снежного покрова ( $r = 0.36$ ). Значимая корреляционная связь ( $r = 0.38$ ) существует между продолжительностью периода активного разрушения мерзлоты сверху (от даты начала протаивания до даты освобождения от мерзлоты) и скоростью разрушения снежного покрова весной. То есть продолжительность периода протаивания меньше в годы с быстрым таянием снежного покрова, когда стремительное таяние снега и просачивание талых вод в почву способствуют деградации мерзлоты. Продолжительность периода активного разрушения мерзлоты сверху имеет отрицательную корреляцию с датой начала таяния ( $r = -0.44$ ). В годы позднего начала таяния мерзлоты оно протекает быстрее.

Максимальная глубина мерзлого слоя сокращается. Величина линейного тренда уменьшения глубины промерзания составляет 10.4 см/10 лет. Максимальная глубина промерзания за зиму определяется температурным режимом зимних месяцев. Значимое воздействие на данную величину оказывают максимальная высота снежного покрова за зиму ( $r = -0.63$ ), температура воздуха в феврале ( $r = -0.35$ ), марте ( $r = -0.40$ ) и средняя температура холодного периода ( $r = -0.41$ ). Наибольшая глубина промерзания отмечается в наиболее холодные зимы и при слаборазвитом снежном покрове, причем, судя по коэффициентам корреляции, влияние снежного покрова сильнее.

Регрессионный анализ позволил установить количественные характеристики связи глубины промерзания с температурами зимних месяцев и высотой снежного покрова. Так, линейное уравнение, связывающее максимальные за зиму глубину промерзания ( $FD$ , см) и высоту снежного покрова ( $SD$ , см) имеет вид

$$FD = 149.0 - 0.85SD,$$

что может быть интерпретировано как уменьшение глубины промерзания на 8.5 см при увеличении

высоты снега на 10 см. Коэффициенты линейной регрессии, характеризующие связь глубины промерзания и температуры зимних месяцев, варьируют от  $-2.1 \text{ см}/^\circ\text{C}$  (в феврале) до  $-3.4 \text{ см}/^\circ\text{C}$  (в марте).

Скорость продвижения границы мерзлого слоя в первый месяц промерзания уменьшается незначительно (на 4 % за 10 лет), а во второй и третий месяцы снижение скорости составляет 24–25 % за 10 лет. Скорость разрушения мерзлого слоя значимой многолетней тенденции не имеет.

### ВЫВОДЫ

Проведенный анализ динамики развития и разрушения сезонномерзлого слоя в период современного глобального потепления дает детальную картину происходящих изменений. На фоне роста температуры воздуха в зимние месяцы проявляются тенденции уменьшения продолжительности залегания снежного покрова, а с 1987 г. наблюдается снижение высоты снега. Даты образования и разрушения мерзлого слоя сдвигаются на более ранние сроки. Продолжительность существования и максимальная глубина мерзлого слоя сокращаются. Величина линейного тренда уменьшения глубины промерзания составляет  $10.4 \text{ см}/10 \text{ лет}$ . Наблюдаемые тенденции изменения сезонномерзлого слоя вызваны изменениями в температуре воздуха в ноябре, феврале–апреле. На максимальную в течение зимы глубину промерзания значительное влияние оказывают максимальная высота снежного покрова и температура воздуха в зимние месяцы, причем, судя по коэффициентам корреляции, влияние снежного покрова сильнее. Характеристики снежного покрова значимого статистического влияния на продолжительность сезонной мерзлоты не оказывают.

### Литература

- Балыбина А.С., Трофимова И.Е.** Дендроиндикация температуры почвы в котловинах байкальского типа // География и природ. ресурсы, 2013, № 2, с. 58–65.
- Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г.** Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 2, с. 10–18.
- Гиличинский Д.А., Быховец С.С., Сороковиков В.А. и др.** Использование данных метеорологических станций для оценки тенденций многолетних изменений температуры почв на территории сезонной и многолетней криолитозоны России // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 3, с. 59–66.
- Золотов С.Ю., Ипполитов И.И., Логинов С.В., Лучицкая И.О., Белая Н.И.** Сравнение данных реанализа NCEP/NCAR профилей температуры почвы с данными измерений сети станций на территории Западной Сибири // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 2, с. 14–20.
- Кельчевская Е.С.** Методы обработки наблюдений в агроклиматологии / Е.С. Кельчевская. Л., Гидрометеиздат, 1971, 215 с.
- Максютова Е.В.** Многолетние колебания толщины снежного покрова и максимальных снегозапасов на территории Предбайкалья // Лед и снег, 2013, № 2 (122), с. 40–47.
- Максютова Е.В., Густокашина Н.Н.** Изменение характеристик климата холодного периода на территории Иркутско-Черемховской равнины // География и природ. ресурсы, 2009, № 4, с. 87–92.
- Методы** климатологической обработки метеорологических наблюдений / Под общ. ред. О.А. Дроздова. Л., Гидрометеиздат, 1957, 492 с.
- Павлов А.В.** Мониторинг криолитозоны / А.В. Павлов. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2008, 229 с.
- Попова В.В., Полякова И.А.** Изменение сроков разрушения устойчивого снежного покрова на севере Евразии в 1936–2008 гг.: влияние глобального потепления и роль крупномасштабной атмосферной циркуляции // Лед и снег, 2013, № 2 (122), с. 29–39.
- Радионов В.Ф., Александров Е.И., Брызгин Н.Н., Деметьев А.А.** Изменения температуры, осадков и снежного покрова в районах арктических морей за 1981–2010 гг. // Лед и снег, 2013, № 1 (121), с. 61–68.
- Трофимова И.Е., Балыбина А.С.** Мониторинг температуры почвы и толщины снежного покрова на территории Иркутской области // Лед и снег, 2012, № 1 (117), с. 62–68.
- Шерстюков А.Б.** Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 1, с. 79–87.
- Шерстюков А.Б.** Массив суточных данных о температуре почвогрунтов на глубинах до 320 см по метеорологическим станциям Российской Федерации // Тр. ФГБУ “ВНИИГМИ–МЦД”, 2012, вып. 176, с. 233–256.
- Шмакин А.Б., Осокин Н.И., Сосновский А.В., Завозская Э.П., Борзенкова А.В.** Влияние снежного покрова на промерзание и протаивание грунта на Западном Шпицбергене // Лед и снег, 2013, № 4 (124), с. 52–59.
- Duchkov A.D.** Characteristics of permafrost in Siberia // Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide. Berlin, Springer Publ., 2006, p. 81–92.
- IPCC, 2007:** Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning et al. Cambridge, U.K.; N.Y., Cambridge Univ. Press, 2007, 996 p.
- Zang Y., Chen W., Smith S.L., Riseborough D.W., Cihlar J.** Soil temperature in Canada during the twentieth century: Complex responses to anthropogenic climate change // J. Geophys. Res., 2005, vol. 110, D03112.

Поступила в редакцию  
25 февраля 2014 г.