

ПРОГНОЗ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ПОЧВЫ С ПОМОЩЬЮ ПРОСТЕЙШЕЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

Исследованы особенности динамики сезонно-мерзлого слоя и климатических характеристик холодного периода года по данным наблюдений на метеостанции Бакчар (Томская область) за период с 1963 по 2011 г. Анализ временного хода среднемесячных значений метеорологических характеристик позволил выявить, что статистически значимые тенденции роста температуры обнаружены для октября ($0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет), февраля ($0,93^{\circ}\text{C}/10$ лет), марта ($0,7^{\circ}\text{C}/10$ лет) и мая ($0,55^{\circ}\text{C}/10$ лет). Значимых тенденций в суммах месячных осадков не обнаружено. Высота снежного покрова увеличивается с февраля по апрель и снижается в начале холодного периода (в октябре и ноябре). Предложенный метод прогноза глубины промерзания грунта с помощью регрессионных соотношений может использоваться для определения средних значений глубины промерзания почвогрунтов.

Ключевые слова: температура почвы; сезонно-мерзлый слой; снежный покров; температура воздуха; глубина промерзания.

Температура почвы является ключевым фактором, контролирующим многие биотические и абиотические процессы, протекающие в почвах. Температурный режим почв формируется под влиянием современных климатических условий и факторов, характеризующих условия теплового взаимодействия почвы с атмосферой [1]. Современные изменения в температуре приземного воздуха и режиме атмосферных осадков вызывают соответствующие изменения температуры почвы в верхних слоях [2–4]. Температура почвы определяет глубину развития сезонно-мерзлого или сезонно-талого слоя (в зоне залегания многолетнемерзлых пород) [5]. Реакция грунтов на потепление климата в значительной мере зависит от ландшафтных условий территории [1]. Современный рост снегонакоплений в Сибири создает частичную изоляцию почвогрунтов от температурных изменений воздуха в зимнее время [3]. Тенденция изменений температуры почвы не всегда повторяет динамику температуры воздуха, более того, они могут быть разнонаправленными во времени и пространстве [6]. Исследование связей между характеристиками сезонно-мерзлого слоя и состоянием окружающей среды является важной задачей.

В данной работе исследованы особенности динамики сезонно-мерзлого слоя и климатических характеристик холодного периода года по данным наблюдений на метеостанции Бакчар (Томская область) за период с 1963 по 2011 г. Показаны тенденции изменения этих характеристик и предложен метод прогноза глубины промерзания грунта с помощью регрессионных соотношений по среднемесячным значениям температуры воздуха и высоты снежного покрова.

Среднесуточные данные по температуре воздуха, сумме атмосферных осадков, высоте снежного покрова и температуре почвы на глубинах 20, 40, 80, 160 и 320 см на метеостанции получены из массива данных ВНИИГМИ-МЦД (<http://www.meteo.ru/climate>). Расчетная глубина промерзания определялась по глубине проникновения температуры 0°C в почву [7] путем линейной интерполяции температур почвы между двумя соседними слоями при условии, что в одном из слоев температура отрицательна. По среднесуточным данным рассчитаны среднемесячные значения, которые и использовались для дальнейшего анализа.

Метеорологические характеристики. По данным метеостанции Бакчар, среднегодовая температура воздуха за 1963–2011 гг. составляет $-0,2^{\circ}\text{C}$, амплитуда годового хода $-39,8^{\circ}\text{C}$ (рис. 1). Самый теплый месяц – июль ($18,3^{\circ}\text{C}$), самый холодный – январь ($-19,2^{\circ}\text{C}$). Самым теплым месяцем был июль 1969 г. (средняя температура $22,6^{\circ}\text{C}$). В среднем за 1963–2011 гг. отрицательные значения среднемесячной температуры воздуха на метеостанции наблюдаются с ноября ($-9,0^{\circ}\text{C}$) по март ($-8,9^{\circ}\text{C}$). В отдельные годы отрицательные температуры отмечены в октябре ($-5,6^{\circ}\text{C}$ в 1976 г.) и апреле ($-6,5^{\circ}\text{C}$ в 1983 г.). В январе температура опускается до $-19,2^{\circ}\text{C}$. Самой холодной была зима 1968–1969 гг., когда средние месячные температуры ноября ($-18,4^{\circ}\text{C}$), декабря ($-26,3^{\circ}\text{C}$) и февраля ($-29,7^{\circ}\text{C}$) были минимальными за период исследования. Средняя температура холодного периода (с ноября по март) в 1968–1969 гг. составила $-23,4^{\circ}\text{C}$, в то время как средняя многолетняя величина равна $-14,1^{\circ}\text{C}$. Минимальная температура января ($-31,8^{\circ}\text{C}$) наблюдалась в 2006 г., что на один градус ниже, чем в 1968 г. Самые сильные положительные аномалии в зимние месяцы наблюдаются в конце исследуемого периода: ноябрь ($-2,8^{\circ}\text{C}$) – 2008 г.; декабрь ($-7,4^{\circ}\text{C}$) – 2006 г.; январь ($-9,3^{\circ}\text{C}$); февраль ($-8,1^{\circ}\text{C}$) – 2002 г.

Сумма годовых осадков составляет 471 мм, из них 43% приходится на летние месяцы и 14% – на зимние. Наибольшее количество месячных осадков было зарегистрировано в июле 1996 г. (184 мм). Минимум осадков в годовом ходе наблюдается в феврале (15 мм).

Снежный покров появляется 10 октября. Он обычно сходит под влиянием последующих оттепелей, и только после устойчивого понижения температуры устанавливается на зиму. Установление снежного покрова происходит, в среднем, к 30 октября. Максимальная высота снега за зиму наблюдается в марте (58 см) в среднем за 1963–2011 гг. Зимой 1967–1968 гг. наибольшая высота снега за зиму не превышала 21 см. В марте 1990 г. снежный покров достигал 98 см. Разрушение устойчивого снежного покрова происходит к 21 апреля (рис. 1).

Максимальная температура почвы на глубине 20 см – в июле (17°C). Минимальная ($-2,4^{\circ}\text{C}$) в годовом ходе температура почвы на этой глубине приходится на февраль.

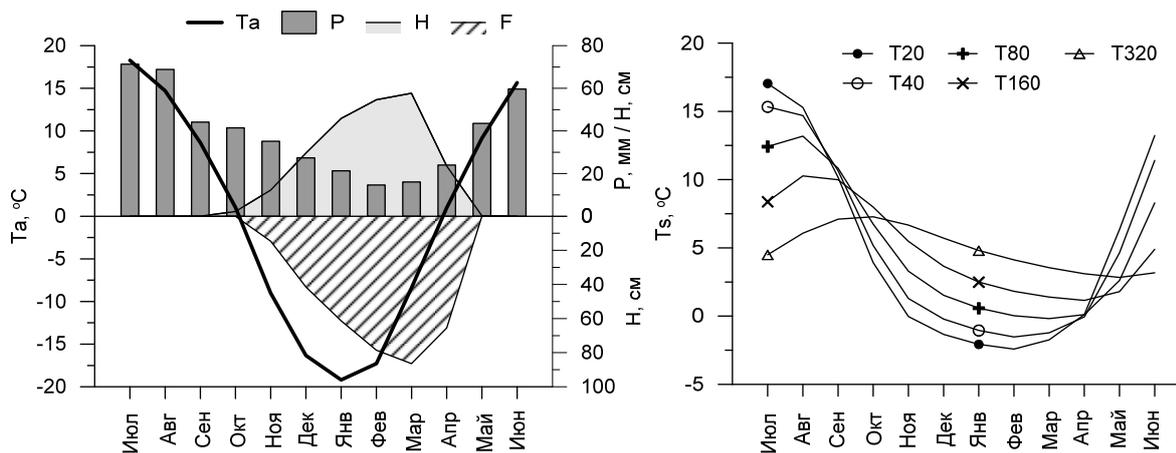


Рис. 1. Годовой ход среднемесячных значений температуры воздуха (Ta), сумм осадков (P), высоты снежного покрова (H), глубины промерзания почвы (F) и температуры почвы (Ts) на глубинах 20, 40, 80, 160 и 320 см

С глубиной амплитуда годового хода температуры уменьшается и составляет 13,4°C на глубине 80 см и 4,4°C – на глубине 320 см. Также с глубиной происходит запаздывание наступления максимальных и минимальных значений температуры почвы. Так, на глубине 320 см максимум наблюдается в октябре и составляет 7,3°C, а минимум (2,8°C) – в мае. Средняя годовая температура в слое от 20 до 320 см равна 4,9°C.

Глубина промерзания определялась по глубине проникновения нулевой изотермы. Промерзание почвы начинается в конце ноября, приблизительно через месяц после установления отрицательных температур воздуха и образования устойчивого снежного покрова. Максимум глубины промерзания достигается в марте и составляет 86 см. Наибольшая глубина промерзания (160 см) была зафиксирована в феврале 1968 г. на фоне аномально низкой высоты снега (21 см) и умеренно теплой зимы (температура января –20°C). Наименьшая глубина промерзания наблюдалась зимой 1982–1983 гг., когда она составила 43 см (в марте), при этом снежный покров достигал высоты

60 см (в феврале), а температура опускалась всего до –12°C (в феврале), что на 5,1°C выше многолетней нормы. В отдельные годы (1969–1972 гг.) мерзлый слой наблюдался в мае на значительной глубине (88–110 см).

Тенденции изменения метеорологических характеристик. Анализ временного хода среднемесячных значений метеорологических характеристик позволил выявить значимые тенденции их изменения. Величины линейных трендов приведены в табл. 1. Скорость увеличения среднегодовой температуры воздуха составляет 0,33°C/10 лет. Значимые тенденции роста температуры обнаружены для октября (0,6°C/10 лет), февраля (0,93°C/10 лет), марта (0,7°C/10 лет) и мая (0,55°C/10 лет). В остальные месяцы также обнаружены тенденции к потеплению, которые не являются статистически значимыми. Исключение составляют январь и июль, когда проявляются незначимые тренды уменьшения температуры.

Статистически значимых тенденций в суммах месячных осадков не обнаружено (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты линейного тренда температуры воздуха (aTa, °C/10 лет), сумм осадков (aP, мм/10 лет), высоты снежного покрова (aH, см/10 лет) и глубины промерзания почвы (aF, см/10 лет) в разные месяцы

Месяц	aTa	aP	aH	aF
Январь	-0,07	-1,06	2,39	-3,62
Февраль	0,93	0,03	4,34	-7,24
Март	0,70	1,49	5,93	-10,28
Апрель	0,44	-1,01	2,96	-13,00
Май	0,55	-3,41	-	-
Июнь	0,19	4,07	-	-
Июль	-0,16	4,78	-	-
Август	0,16	-0,09	-	-
Сентябрь	0,07	2,33	-	-
Октябрь	0,60	0,96	-0,46	-0,03
Ноябрь	0,37	-1,05	-1,68	1,48
Декабрь	0,22	2,24	-0,19	0,91
Год	0,33	9,28	-	-

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены коэффициенты, значимые на уровне 0,05.

Высота снежного покрова за 1963–2011 гг. увеличивается с февраля по апрель и снижается в начале холодного периода (в октябре и ноябре).

Обнаруженные тенденции увеличения температуры воздуха в зимние месяцы и высоты снежного по-

крова приводят к появлению направленных изменений в температуре почвы и, следовательно, глубине промерзания почвы. Тенденция к снижению глубины промерзания получена для февраля, марта и апреля (см. табл. 1). В октябре одновременный рост темпера-

туры воздуха (что несколько уменьшает промерзание) и снижение высоты снежного покрова (что способствует увеличению глубины промерзания) не приводят к изменениям глубины промерзания почвы.

Прогноз глубины промерзания. Для выявления факторов, влияющих на глубину промерзания почвы, был проведен корреляционный анализ. Значимые связи существуют между глубиной промерзания и температурой воздуха в ноябре (коэффициент корреляции $R = -0,55$) и марте ($R = -0,38$), а между глубиной промерзания и высотой снежного покрова – в декабре ($R = -0,30$), январе ($R = -0,39$), феврале ($R = -0,53$) и марте ($R = -0,54$). Увеличение температуры воздуха и высоты снежного покрова приводит к росту температуры почвы и, соответственно, уменьшению глубины промерзания. В начале развития сезонно-мерзлого слоя температура воздуха играет ведущую роль в промерзании почвы. В зимние месяцы роль управляющего фактора играет глубина снежного покрова.

Развитие сезонно-мерзлого слоя в течение зимы идет постепенно. Очевидно, что толщина мерзлого слоя текущего месяца связана с толщиной мерзлоты предыдущего месяца. Коэффициенты корреляции

глубины промерзания в соседние месяцы имеют высокие значения ($R = 0,81 \div 0,93$).

Поскольку на развитие сезонной мерзлоты в разные месяцы оказывают влияние различные факторы, нами была предложена множественная регрессионная модель для прогноза среднемесячной толщины мерзлого слоя. В общем виде в качестве независимых переменных модель включает среднемесячную температуру воздуха и высоту снежного покрова текущего и предыдущего месяца, а также глубину промерзания предыдущего месяца.

$F_m = a_0 + a_1 \cdot F_{m-1} + a_2 \cdot T_{m-1} + a_3 \cdot T_m + a_4 \cdot S_{m-1} + a_5 \cdot S_m$, (1)
где a_0 – a_5 – параметры модели; m – номер месяца (от ноября до апреля); F_m , T_m , S_m – глубина промерзания, температура воздуха и высота снежного покрова месяца m ; F_{m-1} , T_{m-1} , S_{m-1} – те же характеристики для предыдущего месяца ($m-1$). Параметры модели определены с помощью программного комплекса Statistica 8.0 по имеющимся данным среднемесячных значений глубин промерзания, температур воздуха и высоты снежного покрова за 1963–2011 гг. Значения параметров и величина коэффициента детерминации модели приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты регрессионной модели (1) для разных месяцев

Месяц	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	R^2
Ноябрь	3,08	–	–	–2,44	–	–0,85	0,51
Декабрь	31,80	0,71	–2,17	–	–1,67	–	0,79
Январь	32,98	0,95	–	–0,64	–	–0,50	0,83
Февраль	17,30	0,86	–0,66	–0,62	0,65	–0,82	0,95
Март	–14,95	0,93	–0,79	–1,75	–	–	0,93
Апрель	–42,47	1,10	–1,90	–3,00	–	–	0,89

Набор независимых переменных определялся для каждого месяца индивидуально. Например, глубина промерзания ноября зависит только от температуры воздуха и высоты снежного покрова в ноябре. Мерзлый слой в предыдущий месяц (октябрь) наблюдается только в отдельные годы, а температура воздуха и снежный покров в октябре не имеют значимого влияния на промерзание (см. знак «–» в табл. 2). Наилучший набор параметров для прогноза глубины промерзания в декабре содержит глубину мерзлого слоя, температуру воздуха и высоту снега в ноябре и не включает температуру и высоту снега декабря. Эти характеристики декабря не входят и в регрессионное соотношение для января. Получено, что в марте и апреле температуры воздуха и глубины промерзания в предыдущий месяц достаточно для описания изменений глубины промерзания. Вклад снежного покрова в эти месяцы не является значимым.

Регрессионные модели для декабря – апреля имеют высокие коэффициенты детерминации ($R^2 = 0,79 \div 0,95$). Несколько хуже показатели для ноября ($R^2 = 0,51$), когда средняя за месяц глубина промерзания будет в первую очередь определяться временем установления отрицательных температур и датой начала промерзания.

Как упоминалось выше, в отдельные годы мерзлый слой наблюдается на значительной глубине в мае, однако в последние годы освобождение почвы от мерзлоты сдвигается на более ранние сроки. Так, во второй половине исследуемого периода (1987–2011)

мерзлота в мае была зафиксирована только в 7 случаях. Поэтому описанный выше способ прогноза толщины мерзлого слоя для мая не использовался.

Для расчета многолетнего хода глубины промерзания сначала определялась глубина промерзания почвы в ноябре по известным значениям температуры воздуха и высоты снежного покрова. Затем последовательно рассчитывались глубины промерзания для каждого месяца с декабря по март (F_m) по соотношению (1). Причем в качестве независимой переменной F_{m-1} использовалась расчетная глубина промерзания предыдущего месяца. Для температуры воздуха и высоты снежного покрова использовались фактические среднемесячные значения, полученные по данным измерений на метеостанции.

Использование расчетной глубины промерзания для вычисления толщины мерзлого слоя в последующие месяцы приводит к последовательному накоплению ошибок. Средняя ошибка аппроксимации в течение зимы возрастает от 7 см в ноябре до 15 см в марте и 19 см в апреле. Тем не менее результаты расчетов удовлетворительно совпадают с данными фактических измерений. Корреляционная связь между рядами значений измеренной и расчетной глубины промерзания высокая ($R = 0,89$; $R^2 = 0,79$).

Предложенный метод позволяет оценить глубину промерзания почвы по данным широко распространенных наблюдений за температурой воздуха и снежным покровом. Для метеостанции Бакчар имеются

данные измерений температуры и высоты снежного покрова с 1936 по 2013 г. Использование этих данных и регрессионного уравнения (1) дало возможность реконструировать глубину промерзания за этот период времени для ноября – апреля.

На рис. 2 приведен временной ход глубины промерзания в марте, реконструированный для периода с 1936 по 2013 г. На совпадающих частях рядов согласие между фактической и расчетной глубинами промерзания

достаточно хорошее, особенно в начале и середине интервала. Наибольшие ошибки прогноза характерны для конца исследуемого периода (см. рис. 2). По-видимому, прогноз, основанный на неизменности статистических характеристик рядов, в условиях направленных изменений независимых параметров модели работает плохо. Для качественного прогноза сезонной и многолетней динамики сезонно-мерзлой толщи необходимо использовать модели тепло-массопереноса в почвогрунтах.

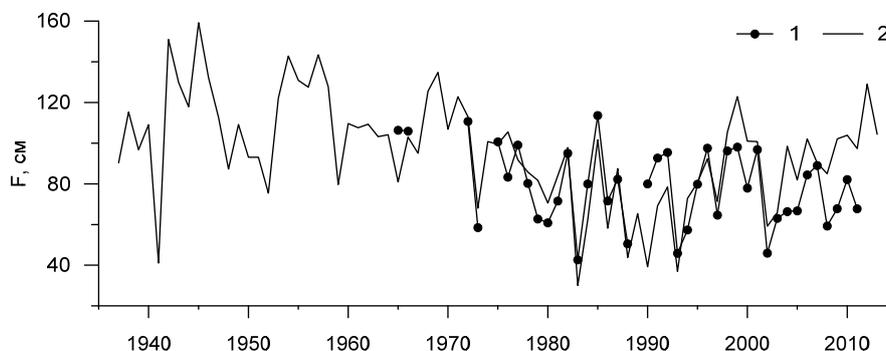


Рис. 2. Фактическая (1) и реконструированная (2) глубина промерзания в марте

В работе исследованы особенности динамики сезонно-мерзлого слоя и климатических характеристик холодного периода года по данным наблюдений на метеостанции Бакчар (Томская область) за 1963–2011 г.

Анализ временного хода среднемесячных значений метеорологических характеристик позволил выявить, что значимые тенденции роста температуры обнаружены для октября ($0,6^{\circ}\text{C}/10$ лет), февраля ($0,93^{\circ}\text{C}/10$ лет), марта ($0,7^{\circ}\text{C}/10$ лет) и мая ($0,55^{\circ}\text{C}/10$ лет). Статистически значимых тенденций в суммах месячных осадков не обнаружено. Высота снежного покрова

за 1963–2011 гг. статистически значимо увеличивается с февраля по апрель и снижается в начале холодного периода (октябрь и ноябрь).

Предложенный метод прогноза глубины промерзания грунта с помощью регрессионных соотношений по среднемесячным значениям температуры воздуха и высоты снежного покрова может использоваться для определения средних значений глубины промерзания за многолетние интервалы. Для качественного прогноза межгодовой динамики сезонно-мерзлой толщи необходимо использовать модели тепло-массопереноса в почвогрунтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск : Гео, 2008. 229 с.
2. Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г. Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата // Криосфера Земли. 2008. Т. 12, № 2. С. 10–18.
3. Шерстюков А.Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова // Криосфера Земли. 2008. Т. 12, № 1. С. 79–87.
4. Трофимова И.Е. Современное состояние и тенденции многолетних изменений мерзлотно-термического режима почв Прибайкалья // География и природные ресурсы. 2006. № 4. С. 38–45.
5. Мельников Е.С., Васильев А.А., Лейбман М.О., Москаленко Н.Г. Динамика сезонноталого слоя в Западной Сибири // Криосфера Земли. 2005. Т. 9, № 2. С. 23–32.
6. Трофимова И.Е., Шеховцов А.И. Оценка термического режима почв котловин Прибайкалья и Северного Забайкалья // География и природные ресурсы. 2011. № 4. С. 100–107.
7. Методы климатологической обработки метеорологических наблюдений / под общ. ред. О.А. Дроздова. Л. : Гидрометеоздат, 1957. 492 с.

Статья представлена научной редакцией «Биология» 24 июня 2014 г.

SOIL FREEZING DEPTH FORECAST USING SIMPLE REGRESSION MODEL

Tomsk State University Journal. No. 387 (2014), 266–270. DOI: 10.17223/15617793/387/39

Dyukarev Egor A. Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS (Tomsk, Russian Federation). E-mail: egor@imces.ru

Keywords: soil temperature; seasonally-frozen soil; snow cover; air temperature; freezing depth.

Features of the dynamics of the seasonally frozen layer and climatic characteristics of the cold period of the year were studied using Bakchar weather station observation data for 1963 – 2011. The analysis of monthly data has shown that significant trends in air temperature found for October ($0.6^{\circ}\text{C}/10$ yr), February ($0.93^{\circ}\text{C}/10$ yr), March ($0.7^{\circ}\text{C}/10$ yr) and May ($0.55^{\circ}\text{C}/10$ yr). Statistically significant trends in monthly precipitation amounts were not found. Snow depth increases from February to April and in October and November. Discovered tendencies in winter temperature and snow cover lead to changes in soil temperature and the depth of soil freezing. Tendency to decrease the depth of freezing was obtained for February, March and April. To identify factors affecting the depth of soil freezing the correlation analysis was performed. Significant relationships exist between the freezing depth and air tem-

perature in November (correlation coefficient $R = -0.55$) and March ($R = -0.38$), and between the freezing and snow depth in December ($R = -0.30$), January ($R = -0.39$), February ($R = -0.53$) and March ($R = -0.54$). Development of the seasonal frozen layer in different months is influenced by different factors, we proposed a multiple regression model for the prediction of average thickness of the frozen layer. In general, the model includes the average monthly air temperature and snow depth of the current and previous month as well as the freezing depth of the previous month. The model parameters were determined using software package Statistica 8.0 using monthly depths of freezing, air temperature and snow depth for 1963-2011. Set of independent variables was determined for each month individually. For example, the depth of freezing in November depends on the air temperature and snow cover in November. Regression models for January – April have high coefficients of determination ($R^2 = 0.79 \div 0.95$). The proposed method for predicting soil freezing depth using regression relations based on monthly air temperature and snow depth can be used to determine the average values of freezing depth for long-term intervals.

REFERENCES

1. Pavlov A.V. *Monitoring kriolitozony* [Cryolithozone monitoring]. Novosibirsk: Geo Publ., 2008. 229 p.
2. Vasil'ev A.A., Drozdov D.S., Moskalenko N.G. Permafrost temperature dynamics of West Siberia in context of climate changes. *Kriosfera Zemli*, 2008, vol. XII, no. 2, pp. 10-18. (In Russian).
3. Sherstyukov A.B. Correlation of soil temperature with air temperature and snow cover depth in Russia. *Kriosfera Zemli*, 2008, vol. XII, no. 1, pp. 79-87. (In Russian).
4. Trofimova I.E. Present state and long-term trends of the permafrost-thermal regime of soils in the Baikal region. *Geografiya i prirodnye resursy – Geography and Natural Resources*, 2006, no. 4, pp. 38-45. (In Russian).
5. Mel'nikov E.S., Vasil'ev A.A., Leybman M.O., Moskalenko N.G. Dinamika sezonnotalogo sloya v Zapadnoy Sibiri [Seasonal layer dynamics in Western Siberia]. *Kriosfera Zemli*, 2005, vol. IX, no. 2, pp. 23-32.
6. Trofimova I.E., Shekhovtsov A.I. Assessing the thermal regime of soils in the depressions of the Prebaikalia and Northern Transbaikalia. *Geografiya i prirodnye resursy – Geography and Natural Resources*, 2011, no. 4, pp. 100-107. (In Russian).
7. Drozdov O.A. (ed.) *Metody klimatologicheskoy obrabotki meteorologicheskikh nablyudeniy* [Methods of climatological processing of meteorological observations]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1957. 492 p.

Received: 24 June 2014