

# ПОДЗЕМНЫЕ ЛЬДЫ И НАЛЕДИ

УДК 551.583:624.131.435

doi:10.15356/2076-6734-2016-2-207-220

## Влияние климатических изменений на глубину промерзания почв в бассейне р. Волга

© 2016 г. И.Л. Калюжный\*, С.А. Лавров

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург

\*hfl@mail.ru

## Effect of climate changes on the soil freezing depth in the Volga River basin

I.L. Kalyuzhny\*, S.A. Lavrov

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

\*hfl@mail.ru

Article accepted for publication on August 4, 2015

**Keywords:** *depth of soil freezing, freeze-up forecast, snow cover, the river Volga basin.*

### Summary

It is established that the climate warming leads to decrease in depth of soil freezing in the whole area basin of the River Volga. This effect is observed since 1978. Depths of soil freezing averaged over the whole basin decreased relative to values measured during the period of stable climate conditions by 34 cm, i.e. from 92 up to 58 cm, or by 37%. In the Northern part of the basin, the depths have decreased by 49%, in the Western, Eastern, and Southern areas – 39, 24 and 38%, respectively. The spatial variability of the depths is estimated by the example of the river Vyatka, the large tributary of the Volga with area of 124 000 km<sup>2</sup> and the site «Log Usadjevsky» with area of 2.0 km<sup>2</sup> (a part of experimental polygon of the Valdai water-balance station). It is shown that the coefficient of variation of the freezing depth decreases when the depth increases. When the depth becomes smaller 60 cm plots of thawed soil appear that significantly increases the infiltration ability of the basin. The technique of estimating the soil freezing depth under change of climate characteristics is proposed.

*Статья принята к печати 4 августа 2015 г.*

**Ключевые слова:** *бассейн реки Волга, глубина промерзания почвы, прогноз промерзания, снежный покров.*

Рассмотрена временная изменчивость глубин промерзания почвы, обусловленная вариабельностью климатических характеристик в бассейне р. Волга. Показано, что изменение глубин промерзания наблюдается во всём бассейне реки, но имеются определённые отличия в каждой из её географических зон. Оценены пространственная изменчивость глубин промерзания на примере бассейна р. Вятка и водосборов малых рек, а также возможность прогноза промерзания почв при климатических изменениях.

### Введение

Промерзание почвы – достаточно сложный многофакторный процесс, изменяющий физические свойства деятельного горизонта почв речных водосборов. При промерзании протекают структурные изменения почвы: её пористости, плотности, водопроницаемости и теплофизических характеристик [5]. К основным факторам, определяющим процесс промерзания почвы, относятся: температура приземного слоя воздуха, начальная влажность промерзающего слоя почвы, её основные водно- и теплофизические характеристики, теплоизолирующие свойства снежного покрова. Анализ результатов многолетних наблюдений за промерзанием почвы на сети

станций Росгидромета показывает, что в зимний сезон интенсивность её промерзания существенно изменяется. В первую половину зимы (декабрь и январь) процесс промерзания наиболее интенсивен. В этот период толщина снежного покрова в бассейне Волги относительно невелика – в пределах 15–25 см – и серьёзно не влияет на промерзание. Интенсивность промерзания в данный период зависит от интенсивности нарастания отрицательной температуры воздуха. Глубина промерзания в первую половину зимы в основном определяется январскими морозами.

При достижении наибольших запасов воды в снеге, что соответствует максимальным теплоизолирующим возможностям снежного покрова, процесс охлаждения почвы значительно за-

медляется и промерзание почвы практически прекращается или глубина промерзания изменяется крайне незначительно. Этому способствует то обстоятельство, что с увеличением глубины промерзания затрудняется отток тепла, выделяющегося при фазовых превращениях влаги. Глубина промерзания почвы речных водосборов — один из факторов, существенно влияющих на формирование зимнего стока [4]. Она влияет на регулируемую функцию перераспределения запасов почвенной влаги между талым и мёрзлым слоями почвы. Запасы влаги в талом слое почвы расходуются на зимний сток; в мёрзлом слое — на формирование талого стока. Глубины промерзания почвы за период климатических изменений существенно уменьшились, что вызывает увеличение как зимнего стока, так и потерь талого стока. Отсюда возникает проблема оценки временной и пространственной изменчивости глубин промерзания почвы при современных климатических изменениях в бассейне Волги.

### Исходная информация

В качестве исходной информации о глубинах промерзания почвы и сопутствующих метеорологических элементах использованы многолетние наблюдения за этими характеристиками на сети метеорологических и агрометеорологических станций (ГМС) Росгидромета [11–14]. Промерзания почв в бассейне Волги анализировались по 61 пункту наблюдений, относительно равномерно расположенных в пределах бассейна и его окрестностей. Наблюдения охватывают два периода: с 1955–1960 по 1977 г. и с 1978 по 2012 г. Используются также материалы наблюдений водно-балансовой станции Росгидромета «Подмосковная» (бассейн р. Медвенка) и водосборов Валдайского филиала Государственного гидрологического института (ГГИ): «Лог Усадьевский», поверхность которого представлена полем, и лесного водосбора — «Лог Таёжный». Лесной участок занимает спелый хвойный лес (более 80–100 лет), произрастающий на лёгких суглинках; полевой участок — луговая растительность также на лёгких суглинках.

Оценка пространственной изменчивости глубин промерзания выполнена Вятской экспедицией института в 1974–1978 гг. в бассейне

р. Вятка по наблюдениям в 35 пунктах. Площадь бассейна реки — 124 тыс. км<sup>2</sup>, преобладают в основном суглинистые почвы [3]. Для поставленной цели глубины промерзания определялись в 15–20 пунктах по 3-километровым маршрутам на полевых и лесных участках, в остальных случаях длина маршрута была в пределах 1,5 км. Число пунктов при каждой съёмке, на которых измерялась глубина промерзания почв, составляла 180–200 пунктов в лесу и 200 — в поле.

Основным прибором, которым измерялась глубина промерзания почв, был мерзлотомер системы Данилина I типа. Погрешность определения составляет  $\pm 1$  см. Методика проведения наблюдений регламентирована Наставлением гидрометеорологическим станциям [7, 8]. Полученный объём информации достаточен для оценки временной и пространственной изменчивости промерзания почвы в бассейне р. Волга.

### Временная изменчивость глубин промерзания почвы в бассейне р. Волга

Издание Справочников по климату СССР (1964 г.) [11–14] дало первое представление о систематических измерениях глубин промерзания, выполненных в бассейне Волги с предвоенных лет до 1962 г. Приведённые в данном справочнике результаты по 30 пунктам наблюдений показывают существенную пространственную изменчивость этой характеристики в пределах бассейна. Так, средняя глубина промерзания в бассейне Волги была равна 82 см и изменялась от 33 см на юге бассейна до 115 см на востоке. Наибольшие глубины промерзания достигали 150–170 см. Средняя наименьшая глубина промерзания в бассейне была равной 41 см. Сравнения глубин промерзания, наблюдаемых с 1977 по 2010–2012 гг., показывает значительное временное изменение этих характеристик по сравнению с предыдущим периодом, результаты за который даны в Справочниках (табл. 1). Так, средняя глубина промерзания за этот период уменьшилась на 33% и составила 55 см, изменяясь от 20 до 114 см. Наибольшие глубины промерзания в отдельные годы достигали 148–177 см, а средняя наименьшая глубина понизилась до 13 см; в ряде случаев промерзание в бассейне не наблюдалось. Ана-

Таблица 1. Сравнительные характеристики глубин промерзания почвы по ряду пунктов наблюдений в бассейне р. Волга в период стабилизации климата, приведённые в Справочниках по климату СССР и в период с 1977 по 2012 г.

Пункт наблюдений	Глубина промерзания в период стабилизации климата, см [11–14]	Глубина промерзания в период изменения климатических характеристик с 1977 по 2012 г., см
Йошкар-Ола	92*/136/57	64*/96/20
Чулпаново	101/128/74	92/147/15
Астрахань	59/98/36	51/95/0
Самара	86/145/50	32/82/3
Безенчук	105/150/60	54/115/12
Киров	69/135/32	24/68/6
Юрьев-Польский	72/129/51	66/109/47
Бугуруслан	104/161/48	94/116/10
Чебоксары	100/165/5	93/155/26
Бугульма	84/124/43	71/118/19
Лысково	91/170/32	59/112/24
Кострома	99/160/21	38/90/2
Солигалич	52/128/26	20/46/1
Красные Баки	74/98/38	43/80/5
Арзамас	93/156/34	50/108/15

\*Средняя/наибольшая/наименьшая.

Таблица 2. Изменение глубин промерзания почвы в географических зонах бассейна р. Волга в разные периоды

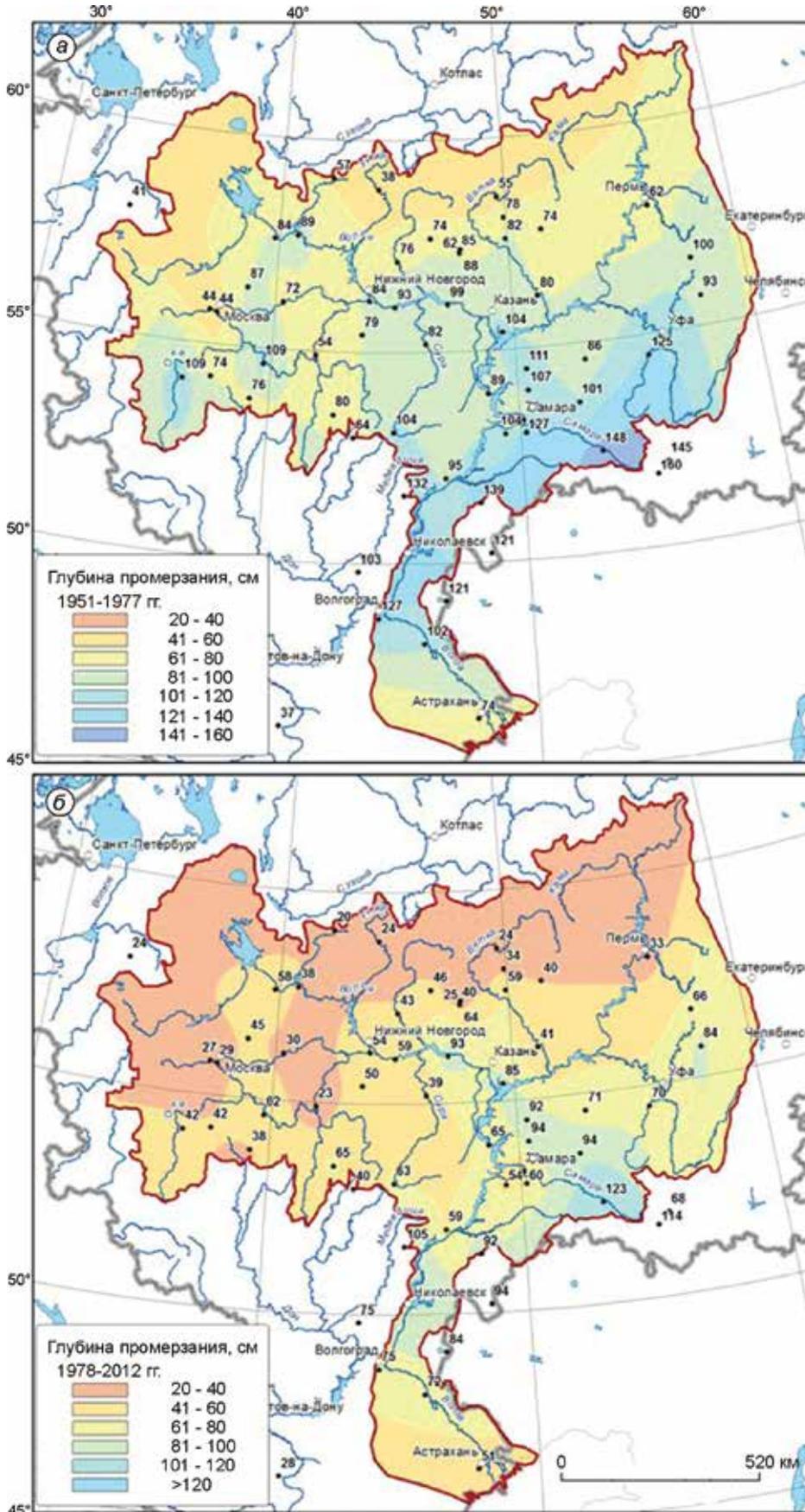
Зоны бассейна	Число пунктов наблюдений	Средняя глубина промерзания, см	Уменьшение глубины промерзания, см (%)
Северная	11	77*/39	38 (49)
Северо-западная	4	100/72	28 (28)
Западная	10	70/43	27 (39)
Центральная	17	87/56	31 (36)
Южная	12	115/71	44 (38)
Восточная	8	111/84	27 (24)
<i>Среднее по бассейну</i>	62	92/58	34 (37)

\*В числителе – до 1977 г., в знаменателе – с 1977 по 2012 г.

лиз результатов многолетних наблюдений за промерзанием почвы указывает на существование тренда уменьшения глубины промерзания почвы во времени.

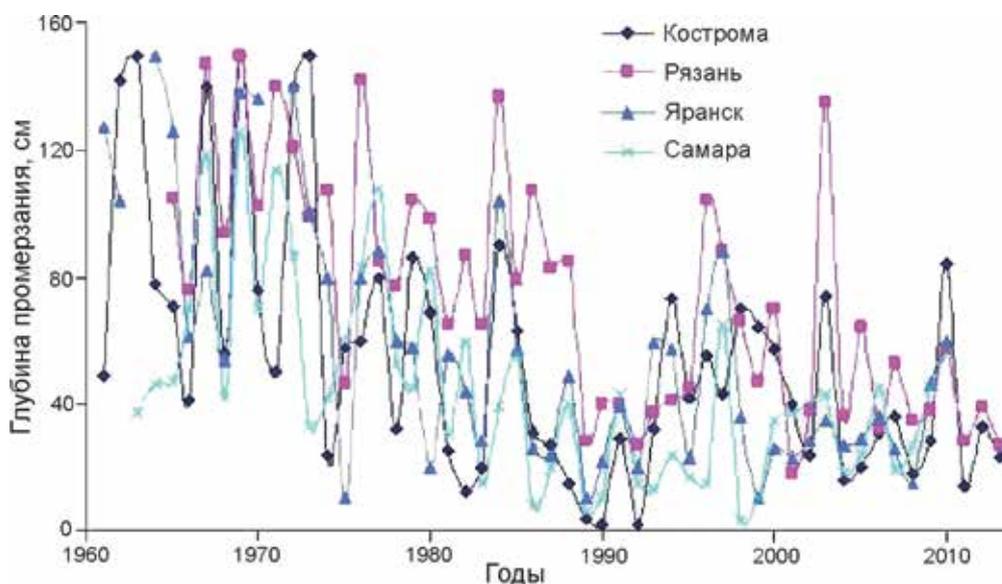
К сожалению, эти данные не дают полного представления о глубинах промерзания, их пространственной и временной изменчивости в бассейне Волги. С целью повышения достоверности получаемых выводов далее мы рассмотрим результаты многолетних наблюдений, выполненных с 1936–1960 до 2010–2012 гг. В табл. 2 приведены осреднённые глубины промерзания почв по географическим зонам бассейна Волги за период до 1977 г. и в последующие годы до 2010–2012 гг.

Карты глубин промерзания почвы (рис. 1) позволяют получить общее представление о временной и пространственной их изменчивости в бассейне Волги за два рассматриваемых периода: до 1977 г. – период стабилизации климатических характеристик и с 1978 по 2012 г. – период климатических изменений. Первый период характеризуется значительной изменчивостью глубин промерзания почвы. Средние, из максимальных за год, глубины промерзания почвы за этот период изменяются от 140–160 см на востоке бассейна, в степной зоне, до 40–55 см в западной, лесной зоне. Этому способствует относительно небольшая толщина снежного покрова на востоке бассейна, обусловленная не-



**Рис. 1.** Средние глубины промерзания почв (см) бассейна р. Волга в 1951–1977 (а) и в 1978–2012 гг. (б)

**Fig. 1.** Mean depths of soil freezing (cm) within the Volga basin for 1951–1977 (a) and for 1978–2012 (b)



**Рис. 2.** Динамика наибольших глубин промерзания в бассейне р. Волга по наблюдениям на ГМС Кострома, Рязань, Яранск, Самара в 1961–2012 гг.

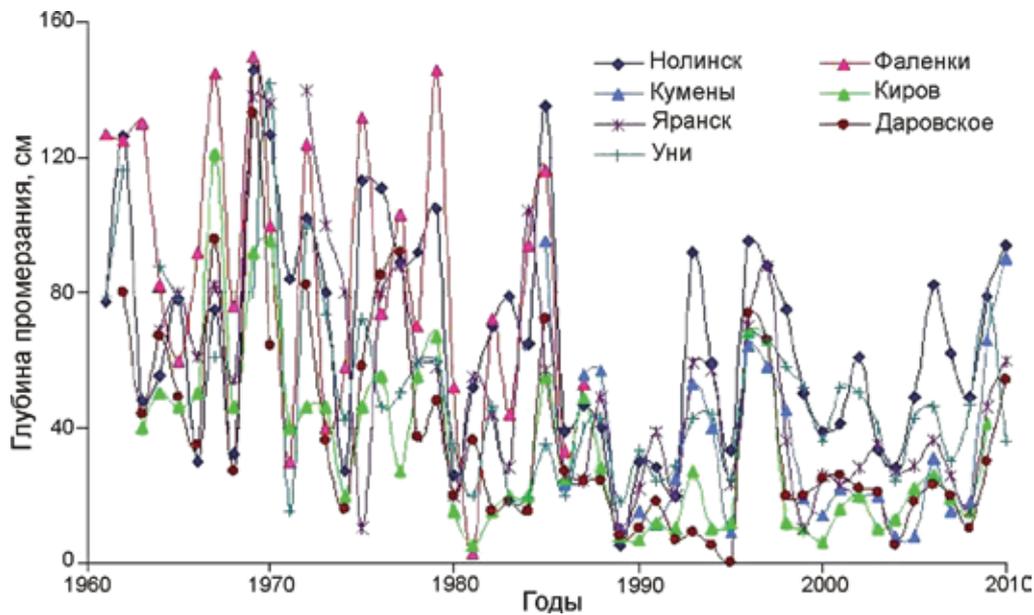
**Fig. 2.** Dynamics of maximal freezing depth within the Volga basin for 1961–2012 according to observations from Kostroma, Ryazan, Yaransk, and Samara

большими зимними осадками, значительным метелевым переносом снега и наличием снежного покрова до 60–80 см в лесной зоне бассейна. При изменении климатических характеристик за второй период уменьшение глубин промерзания наблюдается во всем бассейне Волги. В качестве примера на рис. 2 приведены результаты наблюдений наибольших глубин промерзания по ряду метеостанций в бассейне Волги. На нём хорошо прослеживается тренд уменьшения глубины промерзания вне зависимости от расположения пункта наблюдений: в северной части бассейна (ГМС Яранск, р. Вятка), в центральной части бассейна (ГМС Кострома и Рязань) или в районе юго-восточной части (ГМС Самара).

Уменьшение глубин промерзания почвы обусловлено повышением температуры воздуха в бассейне Волги за зимний период в среднем на 1,0 °С. Средние глубины промерзания в целом по бассейну, по отношению к периоду стабилизации климатических характеристик, уменьшились на 34 см – от 92 до 58 см, или на 37%. Северная часть бассейна, расположенная в лесной зоне европейской части страны, по сравнению с другими географическими зонами в первый период имела относительно небольшие глубины промерзания – в среднем 71 см, аналогичные значения и в западной части бассейна – 70 см.

Объясняется это тем, что в северной и западной частях бассейна толща снежного покрова велика, она отличается высокими теплоизоляционными свойствами. Средняя толщина снега достигает 50–64 см, а в отдельные годы – 100 см и более.

В период с 1978 по 2012 г., при изменении климатических характеристик, в северной части бассейна средняя глубина промерзания сократилась на 38 см и составила 39 см, т.е. уменьшилось на 49% средней глубины первоначального периода. При этом средняя толщина снега изменилась незначительно. На рис. 3 показано изменение глубин промерзания в северной части бассейна Волги на примере пунктов наблюдений, расположенных в пределах бассейна р. Вятка. При этом температура воздуха по данным наблюдений на ГМС Киров повысилась за 30-летний период с –9,7 до –8,6 °С, т.е. в среднем на 1,1 °С. Во временном ходе глубин промерзания хорошо просматривается как первый период, в котором в отдельные годы глубины промерзания достигали 100–150 см, так и второй период, когда они уменьшилась до 90 см и ниже. Хорошо просматривается синхронность хода глубин промерзания во всех пунктах наблюдений в бассейне реки. В северо-западной и западной частях бассейна изменение температуры воздуха в среднем на 1,1 °С вызвало уменьшение глубин



**Рис. 3.** Динамика наибольших глубин промерзания по отдельным пунктам наблюдений, расположенным в пределах бассейна р. Вятка

**Fig. 3.** Dynamics of maximal freezing depth within the Vyatka basin according to observations from some stations

промерзания на 27–28 см, что при средней глубине промерзания в этих зонах в первом периоде равно соответственно 100 и 70 см, или в процентном отношении 28 и 39%.

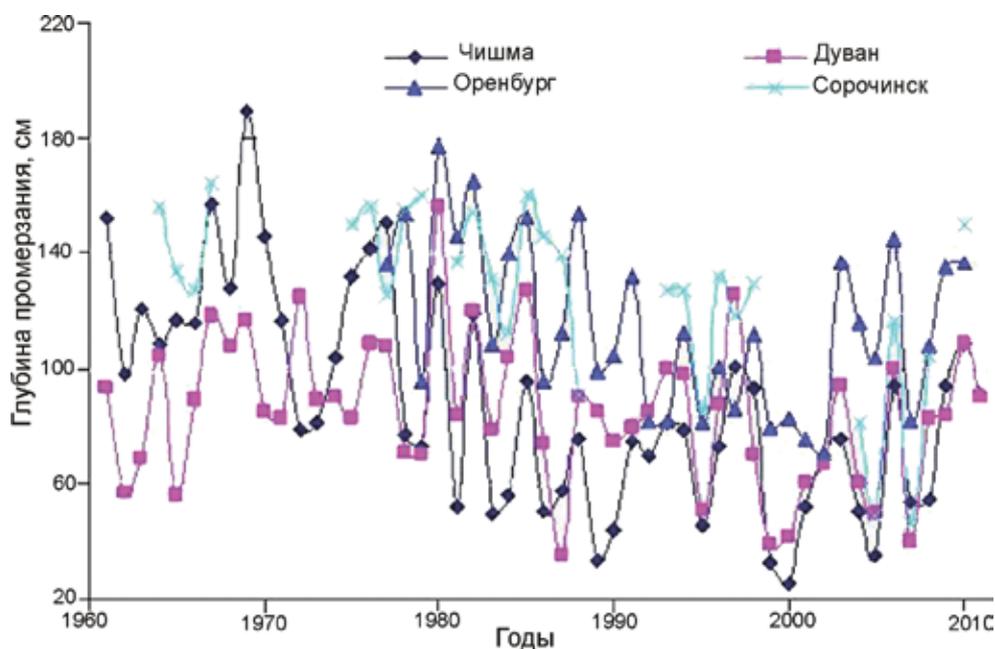
В центральной части бассейна Волги по сравнению с северной отмечаются относительно большие глубины промерзания – в среднем 87 см. Объясняется это тем, что в центральной части бассейна наблюдалась несколько меньшая средняя толщина снежного покрова, которая при его плотности 0,23–0,24 г/см<sup>3</sup> к концу зимы достигала 50–54 см, а в отдельные годы понижалась до 30–40 см. За период с 1978 по 2012 г. средняя глубина промерзания также уменьшилась на 31 см и достигла 56 см. Уменьшение составило 36% средней глубины первоначального периода. В отличие от трендов северной части бассейна для его центральной части характерно более раннее уменьшение глубин промерзания ещё до 1978 г.

Восточная часть бассейна Волги и её северные территории расположены в лесостепной зоне, южные – в степной. Особенность восточной части – большая глубина промерзания почвы, обусловленная низкими зимними температурами при средней толщине снежного покрова 45–55 см в лесостепной зоне и 30–40 см в степной. Средняя глубина промерзания почвы

до 1978 г. была в пределах 100–111 см. В отдельные годы глубины промерзания в степной зоне достигали 140–170 см. Особенно большие глубины промерзания наблюдались в период слабого осеннего увлажнения почвы: менее 0,4–0,5 наименьшей полевой влагоёмкости. Это объясняется тем, что такая почва имеет высокий коэффициент теплопроводности и небольшую теплоёмкость.

В период интенсивных изменений климатических характеристик с 1978 по 2012 г. средняя глубина промерзания уменьшилась в среднем на 27 см, или 24% глубины промерзания первоначального периода, и составила 84 см. На рис. 4 дана динамика хода глубин промерзания в восточной части степной зоны бассейна Волги по ГМС Чишма, Дуван, Сорочинск и Оренбург (бассейн р. Урал).

Южная часть бассейна Волги полностью расположена в степной зоне. Для неё характерны низкие зимние температуры и небольшая толщина снежного покрова. Последний формируется под влиянием метелевого переноса снега, поэтому его плотность к середине зимы достигает 0,28–0,30 г/см<sup>3</sup>, что, наряду с небольшой толщиной снега, до 25–35 см, и низкой влажностью почвы, обуславливает глубокое её промерзание. Средняя глубина промерзания за пери-



**Рис. 4.** Динамика наибольших глубин промерзания почвы восточной части бассейна р. Волга  
**Fig. 4.** Dynamics of maximal depth of soil freezing within eastern part of the Volga basin

од стабилизации климатических характеристик равна 115 см, т.е. практически такая же, как и в восточной части бассейна. Наибольшие глубины промерзания этого периода нередко были больше 140–150 см, а в отдельные годы они снижались до 40–50 см. С 1978 по 2012 г. средняя глубина промерзания уменьшилась на 44 см (38% первоначальной) и составила 71 см. Определённый вклад во временную изменчивость глубин промерзания вносят увеличение числа оттепелей [4, 5] и уменьшение продолжительности зимнего холодного периода. На протяжении последнего тридцатилетия число оттепелей неуклонно возрастало. В бассейне р. Медвенка суммарное число суток с положительной температурой воздуха в январе–феврале за период с 1978 по 2008 г. увеличилось по сравнению с 1958–1977 гг. с 71 до 269, т.е. на 6–7 сут. за год. В качестве примера в табл. 3 приведены результаты анализа роста числа оттепелей и уменьшения продолжительности холодного периода года за последний 30-летний период по сравнению с 1958–1977 г. Анализ показывает, что в северной части бассейна число оттепелей возросло до 3–5 сут. в год, в центральной – до 6–9, на юге – до 10 и более.

Синхронно с увеличением числа оттепелей уменьшается продолжительность холодного пе-

**Таблица 3.** Изменение числа оттепелей и продолжительности холодного периода в бассейне р. Волга с 1978–2012 гг. по отношению к 1950–1977 гг.

Пункт	Увеличение продолжительности оттепелей, сутки (%)	Уменьшение продолжительности холодного периода, сутки
Дуван	2 (50)	5
Никольск	4 (50)	7
Тотьма	4 (44)	7
Яранск	5 (71)	7
Киров	6 (60)	7
Саратов	4 (19)	7
Безенчук	5 (50)	10
Самара	5 (60)	8
Тамбов	7 (50)	13
Рязань	9 (69)	15
Великий Баскунчак	10 (52)	21
Астрахань	12 (31)	21

риода года. В северной части бассейна продолжительность уменьшилась на 5–7 сут., в центральной – на 10–15, а на юге – до 20 и более. Совокупное воздействие этих факторов обуславливает повышение среднесуточной температуры и уменьшает продолжительность её воздействия на деятельный слой почвы, что способствует уменьшению глубины промерзания почвы. Со-

гласно данным по ряду пунктов наблюдений, уменьшение глубины промерзания почвы значительно превосходит изменения при данном росте зимних температур воздуха.

### Пространственная изменчивость глубин промерзания почвы в бассейне р. Волга

Пространственная изменчивость наибольших глубин промерзания на водосборах в бассейне Волги значительна. Она изменяется как в пределах отдельных больших или малых её бассейнов, так и во всём бассейне большой реки. В северной и западной частях водосбора Волги глубина промерзания соответственно равна 71 и 74 см, в восточной и южной частях – 111 и 112 см, в центральной – 87 см. На эти макрозначения накладываются индивидуальные физические свойства конкретного района, что обуславливает и усиливает пространственную изменчивость глубин промерзания. Гидрофизические процессы, определяющие изменение зимнего и весеннего стоков рек при изменении климатических характеристик, зависят от пространственной изменчивости глубин промерзания и влажности почвы. Пространственная изменчивость этих характеристик определяется местными физико-географическими условиями: типом почвы, формой макро- и микрорельефа, растительностью и неравномерностью выпадения осадков. Один из основных факторов, влияющих на глубину промерзания почвы, – температура воздуха – носит климатический, зональный характер и в пределах средних по площади водосборов (до 50 тыс. км<sup>2</sup>) изменяется незначительно.

Полевые определения глубин промерзания, выполненные в бассейне р. Вятка, позволили установить пространственную изменчивость глубин промерзания почвы в пределах бассейна, оценить распределение их по площади водосбора и найти коэффициенты вариации  $C_V$  глубин промерзания в зависимости от их средних значений в диапазоне от наименьших величин до 100 см и более. Зависимость аппроксимируется степенным уравнением вида

$$C_V = 5,572H^{-0,695},$$

где  $H$  – средняя глубина промерзания почвы, см; коэффициент корреляции равен 0,99.

Полученная зависимость показывает, что наибольшая пространственная изменчивость глубин промерзания наблюдается на слабопромерзших почвах со средними глубинами до 20 см. Если при глубинах до 10 см коэффициент вариации равен 1,3, то при 20 см он понижается до 0,65. Далее, с ростом глубины промерзания пространственная изменчивость этой характеристики плавно уменьшается, и при глубине промерзания 100 см коэффициент вариации достигает значения 0,25 и в дальнейшем практически не изменяется. Влияние пространственной изменчивости глубин промерзания почвы на процесс формирования весеннего половодья проявляется в связи с наличием талых и слабопромерзших почв (промерзших менее 20 см). Так, для «Лога Усадьевский» зависимость доли площади водосбора, занятой слабопромерзшими почвами, от средней глубины промерзания на его водосборе аппроксимируется выражением вида

$$F_{20} = 0,024H^2 - 3,420H + 121,4,$$

где  $F_{20}$  – площадь с глубинами промерзания 20 см и менее, в процентах от общей площади водосбора.

Согласно полученной зависимости, можно сделать вывод, что при глубине промерзания 60 см и более на водосборе полностью отсутствуют слабопромерзшие почвы и весенний сток будет определяться теплофизическим взаимодействием талых вод с мёрзлой почвой [3]. Значительный вклад в формирование пространственной изменчивости глубин промерзания вносит растительность. Её влияние на глубину промерзания почвы выражается в изменении теплоизоляционных свойств снежного покрова, в основном обусловленных толщиной снежного покрова. На лесных участках перенос снега отсутствует и толщина снежного покрова зависит только от характеристик леса: господствующей растительности, высоты и сомкнутости крон. В берёзовых, ольховых и смешанных лесах толщина снежного покрова всегда выше, чем на полевых участках [2, 6].

Особенность формирования снежного покрова в хвойных лесах – фактор задержания снега на кронах, а отсюда – увеличение потерь снега на его испарение, так как в хвойных лесах площадь испаряющей поверхности по сравнению с полем или с лиственным лесом увели-

чивается [2]. Однако если ветровая активность высокая, то толщина снега в лесу не зависит от типа растительности. На лесных полянах или вырубках леса толщина снежного покрова и величина снегозапаса всегда больше, чем в поле [5, 6].

На полевых участках влияние на снегозапасы оказывает метелевый перенос. Он приводит к уменьшению толщины снега и возрастанию его плотности; в результате снегозапасы и теплоизоляционные свойства толщи снижаются. Отношение снегозапасов на лесных участках с различными типами господствующих пород к снегозапасам в полях на водосборах лесной зоны европейской части России для берёзовых лесов изменяется от 1,10 до 1,20, для ольховых – от 1,00 до 1,11, для еловых – от 0,62 до 0,89 и смешанного леса – от 0,91 до 1,13. Поэтому в хвойных лесах почва промерзает вдвое больше, чем в лиственных [5].

Анализ многолетних наблюдений на водосборах водно-балансовых станций показывает, что различия в снегозапасах в поле и в лесу более существенны в зимы с оттепелями. Поэтому рост оттепелей при изменении климатических характеристик способствует увеличению пространственной изменчивости глубин промерзания. На примере результатов многолетних наблюдений рассмотрено соотношение между глубинами промерзания на полевом («Лог Усадьевский») и лесном («Лог Таёжный») участках. Соотношение глубин промерзания аппроксимируется степенной функцией вида

$$H_{\text{поле}} = 3,134 H_{\text{лес}}^{0,819},$$

где  $H_{\text{поле}}$  и  $H_{\text{лес}}$  – глубины промерзания соответственно в поле и в лесу, см; корреляционное отношение равно 0,85.

В условиях Валдайской возвышенности полевой участок промерзает на 36% больше лесного. Подобные зависимости носят индивидуальный характер, но в большинстве случаев в лесу почва промерзает на меньшую глубину. Детальные исследования этих соотношений показали, что при малых глубинах промерзания в лесу почва промерзает в 2–3 раза меньше, а при больших – в 1,3–1,5 раза. Отсюда следует, что при увеличении средней глубины промерзания уменьшается разность в промерзании в системе «лес–поле».

Глубина промерзания существенно зависит и от механического состава почв из-за различий в их водоудерживающей способности. Так, песчаные грунты промерзают больше суглинистых в 1,3–1,8 раза. Микрорельеф поверхности также влияет на пространственную изменчивость глубин промерзания. Участки с пашней промерзают в 1,3–1,5 раза глубже по сравнению с луговой поверхностью. Это объясняется тем, что луговая растительность задерживает снег при метелевом переносе, в результате формируется мощный снежный покров с лучшими теплоизоляционными свойствами по сравнению со снежным покровом пашни.

Теплоизоляционные свойства снежного покрова зависят от его толщины и коэффициента теплопроводности, для определения которого существует ряд расчётных формул [9]. Не останавливаясь на их анализе, укажем, что коэффициент теплопроводности в основном зависит от плотности снега и его температуры. Коэффициент теплопроводности снега увеличивается с повышением плотности снега и температуры. Отсюда следует, что в период климатических изменений в первую половину зимы теплоизолирующие свойства снежного покрова будут возрастать, так как в начале зимы толщина снега растёт при небольшой плотности снежного покрова (до 0,10–0,15 г/см<sup>3</sup>) и повышенных отрицательных температурах воздуха, обусловленных климатическими изменениями. В этих условиях промерзание почвы – слабое и неглубокое. Во второй половине зимы – третья декада января и февраль – толщина снежного покрова близка к наибольшей за зиму, а плотность снега возрастает до 0,20–0,23 г/см<sup>3</sup> при более низких температурах. В этот период теплоизоляционная способность снега достигает максимума и промерзание почвы замедляется; в итоге глубина промерзания определяется температурой января и февраля. Однако в период климатических изменений эти температуры более высокие, чем в период стабилизации климата. Отсюда и глубины промерзания при климатических изменениях меньше.

При оттепелях плотность снега увеличивается, его теплоизоляционные свойства снижаются, так как возрастает теплопроводность за счёт уплотнения снега. В северной и западной частях бассейна Волги на пространствен-

ную изменчивость глубин промерзания влияет макрорельеф местности, так как с ним связана глубина залегания грунтовых вод, обуславливающая повышенную влажность почвы в нижних частях склонов; поэтому в нижней части склона глубина промерзания меньше, чем на его середине.

### Математическое моделирование

Для более детального анализа влияния физических факторов на изменение глубины промерзания при климатических изменениях мы использовали физико-математическую модель тепло-влажноперевода в промерзающих почвах [4, 5]. Модель позволяет учесть весь спектр физических свойств почв, а также природное многообразие гидрометеорологических условий, от которых зависят названные процессы. Приведём основные уравнения математической модели:

$$c_{эфф} \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dz} \left( \lambda \frac{dT}{dz} \right) + \rho_B L \frac{dW}{dt} \vartheta \alpha;$$

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dz} \left( K \frac{d\psi}{dz} - K \right);$$

$$c_{эфф} = c + \rho_B L \frac{dW_{НЗ}(T)}{dT} \vartheta;$$

параметр  $\vartheta$  определяется соотношением

$$\vartheta = \begin{cases} 0; & \text{при } T \geq 0 \\ 0; & \text{при } T < 0 \text{ и } W \leq W_{НЗ}(T) \\ 1; & \text{при } T < 0 \text{ и } W > W_{НЗ}(T). \end{cases}$$

Здесь  $T$  – температура почвы, °С;  $W$ ,  $W_{НЗ}$  – общее влагосодержание и содержание незамёрзшей влаги в почве соответственно;  $K$  – коэффициент влагопроводности почв;  $\psi$  – капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги;  $L$  – теплота фазового превращения вода–лёд;  $\rho_B$  – плотность воды;  $\lambda$ ,  $c$  – теплопроводность и теплоёмкость почвы;  $t$ ,  $z$  – время и вертикальная координата, причём поверхность почвы совмещена с уровнем  $z = 0$ , а ось  $z$  направлена вниз; функция  $\alpha = 0$  при  $dW/dt < 0$ , во всех остальных случаях  $\alpha = 1$ .

Для описания процессов формирования снежного покрова и тепло-влажноперевода в снеге использовалась следующая система дифференциальных уравнений [4]:

$$c_c = \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dz} \left( \lambda_c \frac{dT}{dz} + R_c(z) \right) - L \frac{dW_c}{dT} \frac{dT}{dt};$$

$$c_c = \rho_L \Pi_c c_{л} + \rho_B W_c c_B;$$

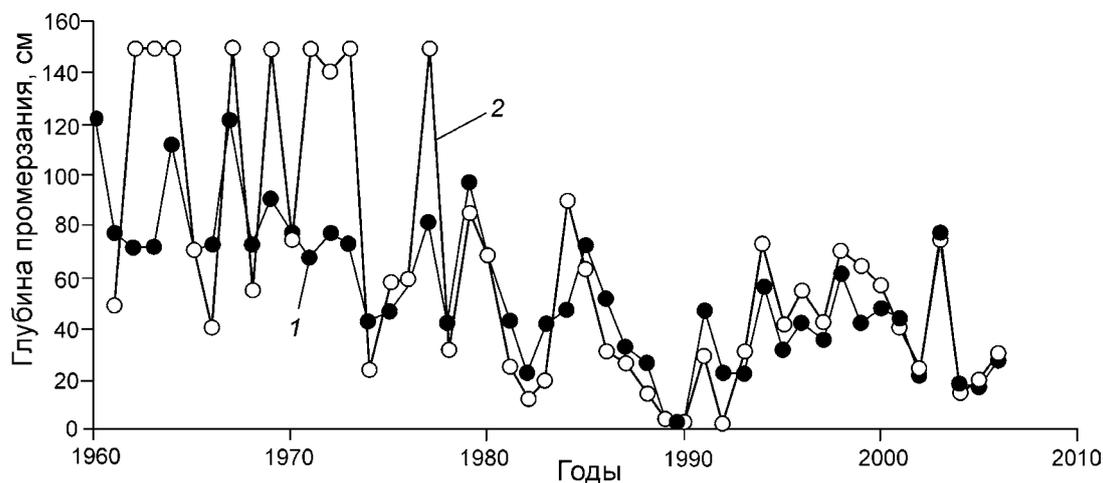
$$\frac{d\Pi_c}{dt} = \frac{P_N}{\eta_c} + \frac{dW_c}{dT} \frac{dT}{dt} + \frac{d}{dz} \left( D_c \frac{d\Pi_c}{dz} \right);$$

$$\frac{dW_c}{dt} = \frac{d}{dz} \left( K_c \frac{d\psi_c}{dz} - K_c \right);$$

где  $T$  – температура снега;  $\Pi_c$ ,  $W_c$  – соответственно объёмное содержание твёрдой и жидкой фаз воды в снеге;  $c_B$ ,  $c_L$ , – соответственно удельные теплоёмкости воды и льда;  $\rho_B$ ,  $\rho_L$ , – соответственно плотность воды и льда;  $\Pi_c$  – концентрация насыщенного пара в снеге;  $P_N$  – давление вышележащих слоёв снега;  $K_c$  – коэффициент влагопроводности снега;  $c_c$ ,  $\lambda_c$  – эффективные теплоёмкость и теплопроводность снега;  $R_c$  – поглощённая снегом радиация;  $\eta_c$  – коэффициент вязкости снега;  $D_c$  – коэффициент диффузии пара в снеге;  $\psi_c$  – капиллярно-сорбционный потенциал снега, под действием которого талая влага передвигается в снежном покрове и который зависит от плотности и структуры снега.

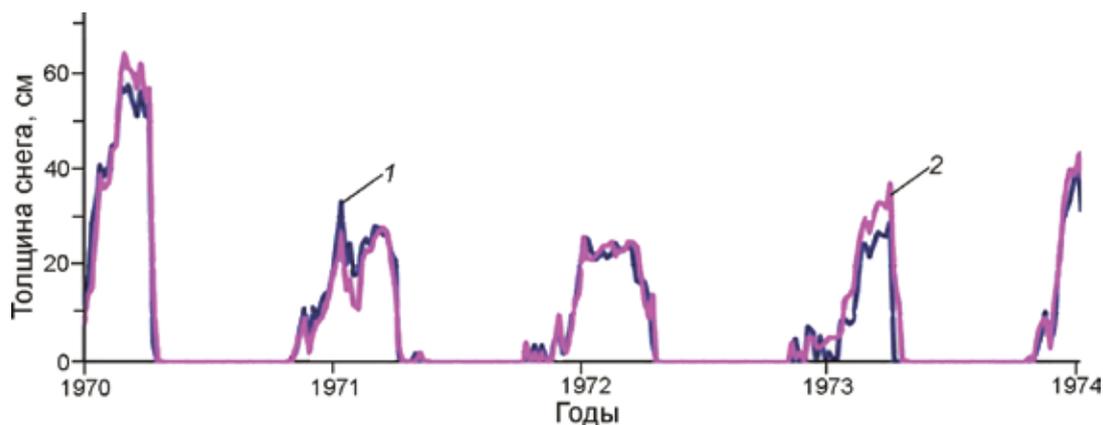
В качестве исходной информации для математического моделирования использовались суточные значения метеозаписей (температура воздуха, осадки, влажность почвы, скорость ветра, влажность воздуха и др.). На рис. 5 представлены результаты сопоставления экспериментальных и расчётных значений глубин промерзания для ГМС Кострома. Видно, что динамика глубины промерзания характеризуется довольно резким её уменьшением в конце 1970-х годов. Детальный анализ изменения метеорологических факторов показал, что средняя зимняя температура воздуха в 1978–2008 гг. выше, чем за предыдущий период. При этом наблюдался и рост максимальной толщины снежного покрова. Подобная динамика метеорологических факторов привела к значительному уменьшению глубины промерзания в конце 1970-х годов.

Для испытания работоспособности блока модели, характеризующего формирование и та-



**Рис. 5.** Сопоставление расчётных (1) и измеренных (2) глубин промерзания по данным наблюдений на ГМС Кострома

**Fig. 5.** Calculated (1) and observed (2) values of freezing depth for the Kostroma station



**Рис. 6.** Сопоставление расчётных (1) и измеренных (2) толщин снежного покрова по данным наблюдений на ГМС Кострома

**Fig. 6.** Calculated (1) and observed (2) values of snow depth for Kostroma station

яние снежного покрова, проведено сопоставление динамики толщины снежного покрова, измеренного на метеостанциях, с расчётными. В качестве исходной информации для расчёта характеристик снежного покрова использовались суточные данные об осадках в зимний период при температуре воздуха  $< 0^{\circ}\text{C}$ . Как видно из рис. 6, наблюдается хорошее совпадение динамики толщины снежного покрова в зимний и весенний периоды, рассчитанной по модели и измеренной на метеостанции. Некоторая погрешность в расчётах обусловлена процессом метелевого переноса снега, при котором изменение толщины снега иногда не связано с выпадающими осадками.

С помощью представленной здесь физико-математической модели мы выполнили численные эксперименты по оценке влияния снежного покрова на глубину промерзания. Проанализировав полученные в результате математического моделирования результаты о соотношении максимальных снегозапасов и глубины промерзания, мы получили обобщённую формулу для оценки влияния снежного покрова на глубину промерзания за многолетний период:

$$H_{\text{пр}}/H_{\text{пр.ср}} = 1,39 - 0,39H_{\text{сн}}/H_{\text{сн.ср}},$$

где  $H_{\text{пр}}$  – глубина промерзания за расчётный период;  $H_{\text{пр.ср}}$  – среднемноголетняя глубина промерзания за наблюдаемый период времени;

$H_{\text{сн}}$  – максимальные снегозапасы на водосборе расчётного периода;  $H_{\text{сн.ср}}$  – средние многолетние максимальные снегозапасы за наблюдаемый период времени.

### Оценка возможности расчёта и прогноза глубины промерзания почвы при изменении климата

В качестве исходной для расчёта глубины промерзания почвы принята методика, изложенная в СНиП 2.02.01–83\* «Основание зданий и сооружений (1995 г.)» [10]. Согласно этому СНиП, нормативную глубину сезонного промерзания грунта при строительстве принимают равной средней из ежегодных максимальных глубин промерзания за период не менее десяти лет при условии, что грунтовые воды располагаются ниже глубины промерзания на открытой оголённой от снега горизонтальной площадке. При отсутствии данных фактических наблюдений, согласно СНиП 2.02.01–83\*, рекомендуется рассчитывать глубину промерзания  $H_{\text{пр}}$  оголённой от снега горизонтальной площадки по формуле

$$H_{\text{пр}} = d(\sum|T|)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $(\sum|T|)^{1/2}$  – квадратный корень из суммы абсолютных среднесуточных значений отрицательных температур;  $d$  – величина, имеющая размерность длины (м), принимаемая равной для супглинков и глин 0,23, а для супесей, мелких и пылеватых песков – 0,30.

Возможность применения этой формулы для почв речных водосборов в бассейне Волги, при естественном залегании снежного покрова, оценивалась по результатам наблюдений на ряде ГМС с 1978 по 1994 г. Результаты расчёта показывают, что различия между вычисленными и измеренными величинами весьма значительны – в 1,5–2 раза и более. Таким образом, в приведённом виде расчётная формула не может удовлетворять требованиям расчётов и прогнозов глубин промерзания при климатических изменениях в условиях естественного залегания снежного покрова. В приведённой формуле коэффициент  $d$  – обобщённая характеристика, которая не несёт индивидуальных факторов, присущих конкретному пункту наблюдений. Для придания коэффициенту индивидуальной ха-

рактеристики ( $d_{\text{оп}}$ ) его необходимо определить обратным путём по известным значениям среднесуточной температуры за холодный период и соответствующего значения глубины промерзания в конкретном пункте. Тогда мы рассчитали по формуле (2) значения  $d_{\text{оп}}$  для средних многолетних значений глубин промерзания и сумм отрицательных температур:

$$d_{\text{оп}} = H_{\text{пр}}/(\sum|T|)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $H_{\text{пр}}$  – средняя многолетняя глубина промерзания почвы, м;  $\sum|T|$  – сумма многолетних абсолютных среднесуточных значений отрицательных температур за зимний период.

Для проверочных расчётов использованы результаты наблюдений за глубиной промерзания, температурой воздуха по ряду пунктов наблюдений с 1978 по 1994 г. (ряд длиной 16 лет). По данным этого ряда рассчитаны значения параметра  $d_{\text{оп}}$ . Проверочные расчёты выполнены по продолжению рядов наблюдения с 1995 по 2011 г. При расчёте принимаем, что средняя продолжительность холодного периода года за эти многолетние периоды не изменяется; величина максимальных снегозапасов тоже не меняется и равна их средней величине. Расчёт выполняется по формуле (2). В табл. 4 приведены результаты проверочных расчётов средних глубин промерзания почвы по 15 пунктам в бассейне Волги при средних снегозапасах. Погрешность расчёта глубины промерзания, определяемая как разность между измеренными и рассчитанными значениями, составляет в среднем 4 см, изменяясь от +14 до –20 см. Величина этой разности, отнесённая к измеренной глубине промерзания, равна в среднем 8%. Коэффициент корреляции составляет 0,94.

Однако в формуле (2) не учтено влияние снежного покрова на глубину промерзания. Исходя из наших исследований, данный фактор можно учесть следующим образом:

$$\Delta H_{\text{пр}} = H_{\text{пр.ср}}(0,39 - 0,39H_{\text{сн}}/H_{\text{сн.ср}}), \quad (3)$$

где  $\Delta H_{\text{пр}}$  – изменение глубины промерзания вследствие отклонения снегозапасов в расчётный период от их средней величины за последний наблюдаемый период времени (1978–2011 гг.);  $H_{\text{пр.ср}}$  – средняя многолетняя глубина промерзания за последний наблюдаемый период времени (1978–2011 гг.);  $H_{\text{сн}}$  – средние макси-

Таблица 4. Проверочные расчёты средних глубин промерзания почвы по данным ГМС в бассейне р. Волга с 1978 по 2011 г.

ГМС	$d_{оп}$	Глубина промерзания, м		
		измеренная	рассчитанная	разность (в скобках в %)
Киров	0,007	<i>0,25*</i>		
		0,23	0,24	-0,01 (4)
Яранск	0,012	<i>0,43</i>		
		0,36	0,44	-0,08 (22)
Александр Гай	0,029	<i>0,90</i>		
		0,98	0,89	+0,09 (9)
Кострома	0,011	<i>0,36</i>		
		0,42	0,36	+0,06 (14)
Елатьма	0,008	<i>0,24</i>		
		0,21	0,24	-0,03 (14)
Безенчук	0,014	<i>0,47</i>		
		0,61	0,47	+0,14 (23)
Октябрьский Городок	0,034	<i>1,14</i>		
		0,97	1,15	-0,18 (19)
Самара	0,010	<i>0,33</i>		
		0,31	0,33	-0,02 (6)
Пермь	0,008	<i>0,31</i>		
		0,36	0,31	+0,05 (14)
Оренбург	0,033	<i>1,24</i>		
		1,03	1,23	-0,20 (19)
Рязань	0,023	<i>0,71</i>		
		0,56	0,73	-0,17 (30)
Пенза	0,023	<i>0,74</i>		
		0,61	0,74	-0,13 (21)
Ершов	0,026	<i>0,89</i>		
		0,98	0,90	+0,08 (8)
Астрахань	0,029	<i>0,58</i>		
		0,44	0,59	-0,15 (34)
Ростоши	0,021	<i>0,64</i>		
		0,54	0,63	-0,09 (17)
<i>Среднее</i>	0,019			-0,04 (8)

\*Курсивом выделены данные за 1978–1994 гг., прямым шрифтом – за 1995–2011 гг.

мальные снегозапасы на водосборе расчётного периода;  $H_{сн.ср}$  – средние многолетние максимальные снегозапасы за последний наблюдаемый период времени (1978–2011 гг.).

При расчёте  $\Delta H_{пр}$  в качестве характеристик снегозапасов могут быть использованы как сами снегозапасы, так и толщина снежного покрова. В качестве примера приведём расчёт ожидаемых глубин промерзания почвы по ГМС Кострома в условиях естественного залегания снежного покрова. Среднемноголетняя сумма отрица-

тельных температур по данным наблюдений за 1995–2011 гг. составляет  $-1105$  °С. Средняя глубина промерзания за этот период равна 0,42 м. Среднемноголетние максимальные снегозапасы, рассчитанные по осадкам за холодный период, составляют 93 мм. Рассчитанный по данным наблюдений за период 1995–2011 гг. коэффициент  $d_{оп}$  равен 0,012. Прогнозируемые значения на основе ансамблевых расчётов [1] суммы отрицательных температур и снегозапасов за период 2015–2030 гг. равны соответственно  $-1063$  °С

и 106 мм. Расчёт по формуле (2) даёт величину прогнозируемой средней глубины промерзания за период 2015–2030 гг., без учёта влияния снежного покрова, равную 0,39 м. Это на 3 см меньше чем за 1995–2011 гг. С учётом динамики снежного покрова, выполнив расчёт по формуле (3), получим величину изменения глубины промерзания равную –0,02 м, т.е. в сумме уменьшение средней глубины промерзания составит 5 см.

### Выводы

На основе анализа данных многолетних изменений глубин промерзания почвы в бассейне Волги на 61 метеостанции установлено, что потепление климата вызывает уменьшение глубины промерзания почвы во всех климатических зонах бассейна Волги. Уменьшение глубины промерзания обусловлено главным образом ростом температуры в зимний период. Эта тенденция наблюдается с 1978 г., что тесно связано с увеличением числа зимних оттепелей и уменьшением продолжительности холодного периода года, а также с теплоизолирующими свойствами снежного покрова. Тренд глубины промерзания индивидуален для каждой из климатических зон бассейна. Временная изменчивость глубин промерзания зависит в основном от вариаций зимних температур воздуха и толщины снежного покрова. Представлены карты глубины промерзания почв для двух периодов: в условиях стабильных климатических характеристик – до 1977 г.; в период их изменений – с 1978 по 2012 г.

Пространственная изменчивость глубин промерзания обусловлена неоднородностью поверхности бассейна и растительного покрова. Коэффициент вариации глубины промерзания почв возрастает как для больших по площади бассейнов притоков Волги, так и для малых, что связано главным образом с уменьшением глубины промерзания. При глубинах промерзания менее 60 см наблюдаются участки талой почвы, что увеличивает её инфильтрационную способность.

На основании усовершенствованной методики расчёта по формуле СНиП 2.02.01–83\* показана возможность прогноза глубин промерзания почвы с использованием данных о прогнозе характеристик климата в условиях естественного залегания снежного покрова.

### Литература

1. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л. Об оценках изменений климата регионов России в 20 и начале 21 веков по данным наблюдений // Метеорология и гидрология. 2012. № 6. С. 95–107.
2. Калюжный И.Л., Павлова К.К., Попов Б.А. Биогеофизические условия взаимодействия твердых осадков с пологом хвойного леса // Вестн. ЛГУ. 1979. Вып. 4. № 24. С. 82–90.
3. Калюжный И.Л., Павлова К.К. Формирование потерь талого стока. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 160 с.
4. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Основные физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек в условиях формирования климата // Метеорология и гидрология. 2012. № 1. С. 68–81.
5. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Гидрофизические процессы на водосборе. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2012. 615 с.
6. Молчанов А.А. Гидрологическая роль леса. М.: Гидрометеиздат, 1960. 485 с.
7. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 306 с.
8. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 11. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 288 с.
9. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 285 с.
10. СП 22.13330.2011 Свод Правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция. Строительные нормы и Правила. СНиП 2.02.01–83\*. 2011.
11. Справочник по климату СССР. Вып. 8. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 354 с.
12. Справочник по климату СССР. Вып. 12. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 344 с.
13. Справочник по климату СССР. Вып. 13. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 492 с.
14. Справочник по климату СССР. Вып. 29. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 207 с.