

## **Изменчивость глубины промерзания почвы в бассейне р. Волга и ее влияние на процессы формирования зимнего и весеннего стока при изменениях климата**

И. Л. Калюжный\*, С. А. Лавров\*

*Приведены результаты анализа временной и пространственной изменчивости глубины промерзания почвы в бассейне р. Волга. Показано, что средняя глубина промерзания в географических зонах бассейна уменьшилась в широких пределах — от 10—20 до 90—100 см и более. Установлено, что уменьшение глубины промерзания почвы в бассейне р. Волга приводит к увеличению зимнего стока в среднем на 17% (диапазон — от 3 до 42%).*

**Ключевые слова:** глубина промерзания, климатические изменения, процессы формирования стока, зимний и весенний сток.

### **Введение**

В результате глобального потепления климата с конца 1970-х годов в бассейне р. Волга существенно изменились условия формирования речного стока. В частности, наблюдается увеличение зимнего и уменьшение весеннего стока [2].

Установлено [3, 4, 6], что одним из основных факторов, обуславливающих формирование зимнего стока, является глубина промерзания почвы, которая определяет перераспределение запасов влаги между мерзлыми и тальными слоями почвы; запасы аккумулированной влаги в мерзлом слое, не участвующие в формировании зимнего стока; запасы влаги в талом слое, формирующие сток в зимний период; условия для зимней миграции влаги из нижнего талого слоя к фронту промерзания; фильтрационные свойства почвы в весенний период, определяющие потери весеннего талого стока.

Современное потепление климата вызывает повышение температуры почвы [8] и, как следствие, уменьшение глубины ее промерзания. Основными факторами, определяющими процесс промерзания почвы, являются температура приземного слоя воздуха; начальная влажность промерзающего слоя почвы; теплоизолирующие свойства снежного покрова; тип почвы, ее основные водно-физические и теплофизические характеристики. Все эти факторы действуют совместно, изменяясь во времени и пространстве, и обуславливают пространственную и временную изменчивость глубины промерзания почвы.

---

\* Государственный гидрологический институт; e-mail: hfl@mail.ru.

### Временная и пространственная изменчивость глубины промерзания почвы

Исходной информацией о глубине промерзания почвы  $H_{пр}$  и ее временной изменчивости являются данные многолетних наблюдений за этой величиной на сети метеорологических, агрометеорологических и водно-балансовых станций Росгидромета. Глубину промерзания почвы в бассейне р. Волга оценивали в 61 пункте наблюдений, относительно равномерно расположенных в его пределах.

Анализ результатов многолетних наблюдений свидетельствует об уменьшении глубины промерзания почвы с 1977—1978 гг. на территории всего бассейна р. Волга. Весь период инструментальных наблюдений можно представить как два временных отрезка: первый (характеризующийся стабилизацией климатических характеристик) — от начала наблюдений до 1977 г., второй (период изменения климата) — от 1978 до 2012 г. В табл. 1 приведены результаты анализа значимости трендов изменения глубины промерзания почвы и подпочвенных грунтов в климатических зонах бассейна р. Волга.

Оценка значимости линейных трендов проводилась по методике работы [7]. При уровне значимости 5%, что соответствует удвоенной случай-

Таблица 1

#### Статистический анализ значимости трендов изменения глубины промерзания почвы и подпочвенных грунтов в разных климатических зонах бассейна р. Волга

Пункт наблюдений	Период наблюдений	Статистические характеристики			
		$R^2$	$R$		
Лесная зона					
Вятские Поляны	1936—2010	0,354	0,595	0,075	0,150
Нолинск	1961—2012	0,086	0,293	0,127	0,254
Яранск	1961—2010	0,446	0,668	0,056	0,112
Уни	1961—2010	0,198	0,445	0,118	0,236
Таежный, Валдай	1952—2013	0,108	0,328	0,114	0,228
Ройка	1960—2013	0,186	0,430	0,124	0,248
Лесостепная зона					
Чишма	1961—2013	0,331	0,575	0,092	0,184
Кострома	1960—2010	0,350	0,586	0,101	0,202
Подмосковная	1949—2012	0,139	0,373	0,113	0,226
Паишево	1961—2008	0,397	0,630	0,102	0,204
Чулпаново	1961—2009	0,290	0,538	0,120	0,240
Степная зона					
Черный Яр	1963—2013	0,245	0,493	0,107	0,214
Астрахань	1962—2013	0,161	0,401	0,140	0,280
Фролово	1961—2012	0,147	0,383	0,121	0,242
Самара	1963—2010	0,267	0,517	0,107	0,214
Ростоши	1961—2009	0,146	0,382	0,144	0,288
<i>Примечание.</i> Все тренды значимы.					

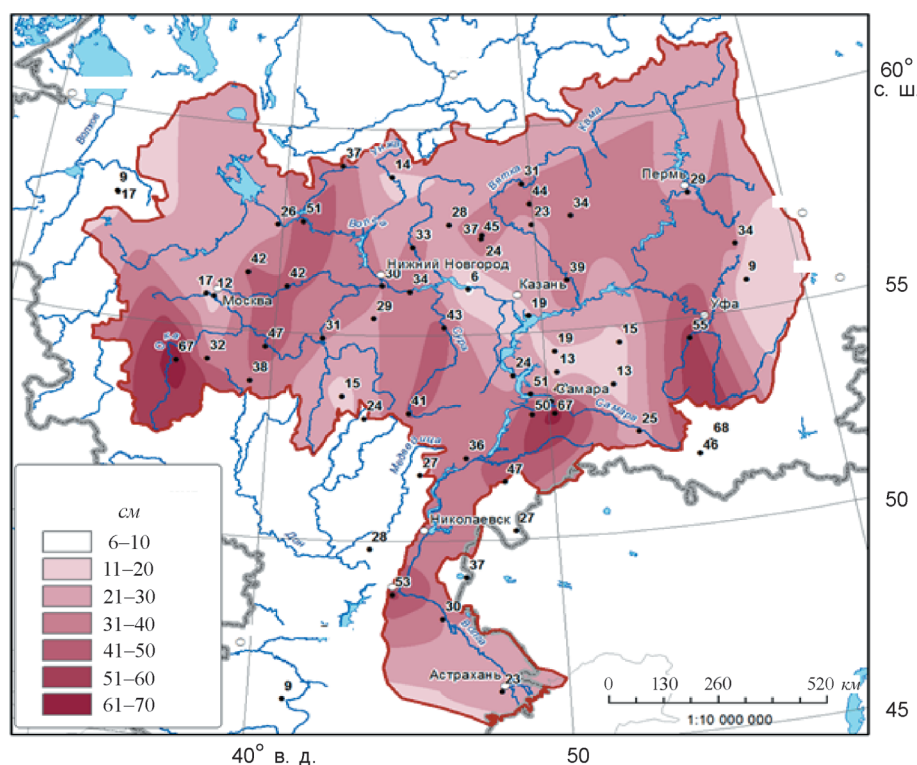


Рис. 1. Изменение средних значений наибольшей глубины промерзания почвы в бассейне р. Волга за период с 1978 по 2013 г. по отношению к периоду с 1950—1963 гг. до 1977 г.

ной средней квадратической ошибке (табл. 1), величина  $2$  меньше коэффициента корреляции  $R$ , на основании чего признается неоднородность рядов наибольшей за год глубины промерзания почвы. Таким образом, тренды глубины промерзания почвы во всех климатических зонах бассейна р. Волга значимы на уровне 95%. На рис. 1 приведена карта изменения глубины промерзания почвы за два периода, дающая общее представление о временной и пространственной изменчивости этих характеристик в пределах бассейна р. Волга. О глубине промерзания почвы на территории речных водосборов в бассейне р. Волга за два рассматриваемых периода можно судить по данным табл. 2, они свидетельствуют о значительном изменении этой характеристики. Так, средняя глубина промерзания (в пределах бассейна р. Волга) за период с 1977 г. по 2010—2012 гг. уменьшилась на 33% и составила 55 см, изменяясь от 20 до 114 см. Наибольшая глубина промерзания почвы в отдельные годы достигала 148—177 см, средняя наименьшая глубина составляла 13 см, а в ряде отдельных пунктов почва не промерзала.

В табл. 3 приведены средние значения глубины промерзания почвы  $\bar{H}_{пр}$  в географических зонах бассейна р. Волга за два рассматриваемых периода и осредненные значения характеристик, определяющих процесс промерзания, — высоты снежного покрова и степени увлажнения почвы. Се-

Таблица 2  
**Сравнительные характеристики глубины промерзания почвы  
 речных водосборов в бассейне р. Волга**

Пункт наблюдений	Глубина промерзания почвы, см					
	в период стабилизации климата*			в период изменения климатических характеристик**		
	средняя	наибольшая	наименьшая	средняя	наибольшая	наименьшая
Йошкар-Ола	92	136	57	64	96	20
Чулпаново	101	128	74	92	147	15
Астрахань	59	98	36	51	95	0
Оренбург	115	141	86	114	177	71
Самара	86	145	50	32	82	3
Безенчук	105	150	60	54	115	12
Ростоши	107	—	—	59	148	6
Эльтон	105	—	—	84	116	20
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
Нолинск	56	—	—	59	135	5
Киров	69	135	32	24	68	6
Юрьев-Польский	72	129	51	66	109	47
Городовиковск	33	58	11	28	61	6
Заметчино	81	115	61	65	149	3
Белинский	66	90	24	40	95	12
Кумены	78	168	38	34	95	8
Даровское	60	—	—	25	74	0
Уни	72	—	—	40	80	18
Яранск	77	145	38	40	104	10
Шахунья	68	150	38	46	97	10
Красные Баки	74	98	38	43	80	5
Арзамас	93	156	34	50	108	15
Порецкое	82	124	36	39	73	0
Красное Поселение	93	135	35	94	168	20
Владимир	79	114	44	30	86	0
Среднее значение	82	—	41	55	—	13

*Примечание.* \* Данные, приведенные в Справочнике по климату СССР (1964 г.). \*\* Данные наблюдений, полученные в период с 1977 г. по 2010—2012 гг.

верная, западная и северо-западная части бассейна, располагающиеся в лесной зоне, характеризуются близкими средними значениями глубины промерзания почвы (табл. 3), обусловленными мощным снежным покровом и большой влажностью почвы. Нередко высота снежного покрова достигает 80—100 см, а влажность почвы  $W$  близка к наименьшей полевой влагоемкости  $W_{нв}$  или больше нее [1]. За период с 1978 по 2012 г. наибольшие изменения глубины промерзания почвы в процентном отношении наблюдались в западной и северо-западной частях бассейна, где они достигали 50—60%, и несколько меньшие — в северной части лесной зоны.

Центральная часть бассейна (лесостепная зона) по сравнению с северной его частью характеризовалась относительно большой глубиной про-

Таблица 3

**Изменение глубины промерзания почвы в географических зонах бассейна р. Волга за период с 1978 по 2013 г.**

Географическая зона	Период наблюдений					Уменьшение глубины промерзания почвы	
	от начала наблюдений до 1977 г.				с 1978 по 2013 г.	см	%
	$\bar{H}_{пр}$ , см	высота снежного покрова (H), см		степень увлажнения	$\bar{H}_{пр}$ , см		
		средняя	экстремальная				
Лесная (северная часть бассейна)	71	50—65	H 80—100	$W > W_{нв}$	55	16	33
Лесная (западная часть бассейна)	74	50—65	H 100	$W > W_{нв}$	42	32	44
Лесостепная (центральная часть бассейна)	87	50—54	H = 30—35	$W > W_{нв}$	56	30	36
Степная (восточная часть бассейна)	100—115	40—60	H 30, H 70	$W < W_{нв}$	84	27	24
Степная (южная часть бассейна)	112	25—35	H 15	$W \ll W_{нв}$	71	41	37

*Примечание.* W — предзимняя влажность почвы;  $W_{нв}$  — влажность почвы, соответствующая наименьшей полевой влагоемкости.

мерзания почвы, в среднем — 87 см. За период с 1978 по 2012 г. она уменьшилась на 30 см, что составило 36% среднего значения этой величины в первом периоде. По мощности снежного покрова лесостепная зона была близка к южной части лесной зоны. В степной зоне (особенно в ее восточной части) наблюдалось промерзание почвы на большую глубину, обусловленное низкими значениями температуры зимой при относительно небольшой средней высоте снежного покрова (до 40 см) и слабом осеннем увлажнении почвы. В отдельные годы глубина промерзания почвы в степной зоне достигала 140—170 см. С 1978 по 2012 г. средняя глубина промерзания почвы уменьшилась в среднем на 27 см, что составило 24% от этой величины в первоначальный период, и достигла 84 см. Для южной части бассейна р. Волга (степная зона) характерны низкие значения температуры зимой и небольшая мощность снежного покрова (до 25—35 см). Средняя глубина промерзания почвы за период стабилизации климатических характеристик была равна 112 см, наибольшая глубина промерзания нередко превышала 140—150 см. За период с 1978 по 2012 г. средняя глубина промерзания почвы уменьшилась на 37% и составила 71 см.

Таким образом, в бассейне р. Волга в два рассматриваемых периода наблюдалось увеличение глубины промерзания почвы, а также уменьшение ее влажности и высоты снежного покрова в меридиональном направлении (с севера на юг). Это обусловило пространственную изменчивость глубины промерзания почвы в пределах всего бассейна р. Волга.

На рис. 2 приведена пространственная корреляционная функция глубины промерзания почвы в лесной зоне и в северной части лесостепной

зоны, построенная по данным наблюдений на 18 пунктах за период с 1978 по 2012 г. Коэффициент корреляции функции  $r = f(L)$  для этих зон равен 0,53. Отклонение выборочных коэффициентов парной корреляции от осредненной линии  $r = f(L)$ , которую принимаем за истинную природную зависимость, объясняется изменчивостью факторов, влияющих на процесс промерзания почвы в пределах рассматриваемой зоны. В отдельных случаях этот коэффициент принимает отрицательные значения. Радиус положительной корреляции глубины промерзания почвы не превышает 290 км.

В табл. 4 приведены уравнения пространственных корреляционных функций глубины промерзания почвы, значения коэффициента корреляции  $r = f(L)$  и радиуса положительной корреляции ( $R_n$ ) для двух рассматриваемых периодов наблюдений в лесной и степной зонах бассейна. Как видно, в степной зоне теснота связи функции  $r = f(L)$  несколько больше, чем в лесной зоне, в период с 1950 по 1977 г. ( $r = 0,75$ ) и почти одинакова в период климатических изменений —  $r = 0,52$  и  $r = 0,53$  соответственно. Все парные коэффициенты корреляции в степной зоне имеют только положительные значения. Радиус положительной корреляции глубины промерзания почвы в этой зоне (более 1190 км) превышает расстояние между наиболее удаленными между собой пунктами наблюдений. Это объясняется тем, что в степной зоне изменчивость факторов, обуславливающих процесс промерзания почвы, значительно меньше.

В лесной зоне бассейна р. Волга радиус положительной корреляции не превышает 290 км, т. е. площадь, на которой будут наблюдаться только по-

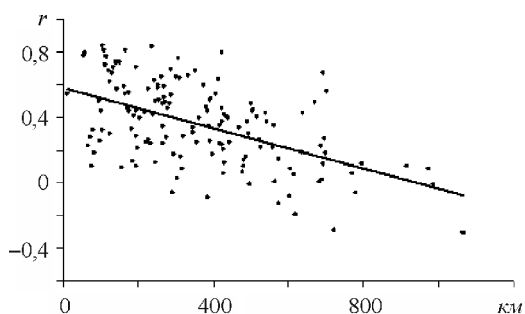


Рис. 2. Пространственная корреляционная функция глубины промерзания почвы в лесной зоне и северной части лесостепной зоны за период климатических изменений.

Таблица 4

**Уравнения пространственных корреляционных функций глубины промерзания почвы в лесной и степной зонах бассейна р. Волга**

Зона	Уравнение связи $r = f(L)$	Коэффициент корреляции	$R_n$ , км
1950—1977 гг.			
Лесная зона и северная часть лесостепной зоны	$r = -0,0004L + 0,559$	0,403	235
Степная зона	$r = -0,0006L + 0,879$	0,746	1190
1978—2012 гг.			
Лесная зона и северная часть лесостепной зоны	$r = -0,0006L + 0,582$	0,529	290
Степная зона	$r = -0,0003L + 0,653$	0,521	1190

ложительные значения парных коэффициентов корреляции, составляет 264 074 км<sup>2</sup>. Это значительно больше площади бассейна крупной речной системы (например, площадь бассейна р. Вятка 124 000 км<sup>2</sup>).

Пространственная изменчивость характеристик промерзания определяется местными физико-географическими условиями: типом почвы, формой макро- и микрорельефа, видом растительности и неравномерностью выпадения осадков. Изменения температуры воздуха — одного из основных факторов, обуславливающих глубину промерзания почвы, имеют зональный характер и в пределах средних по площади водосборов (до 50 тыс. км<sup>2</sup>) незначительны.

Оценка пространственной изменчивости глубины промерзания почвы на территории водосбора реки, расположенной в лесной зоне европейской территории России, была выполнена при проведении экспедиционных работ (1973—1979 гг.) в бассейне р. Вятка. Глубину промерзания почвы определяли в 15—20 пунктах по трехкилометровым маршрутам на полевых и лесных участках. При каждой съемке глубину промерзания почвы определяли по данным измерений в 180—200 точках в лесу и в 200 точках в поле. Это позволило оценить распределение по площади водосбора глубины промерзания и определить коэффициенты вариации  $C_v$  в зависимости от средних значений глубины промерзания в диапазоне от наименьшего значения до 100 см и более. Полученная зависимость аппроксимируется степенным уравнением вида

$$C_v = 5,57 \bar{H}_{\text{пр}}^{0,695},$$

где  $\bar{H}_{\text{пр}}$  — средняя глубина промерзания почвы, см.

Анализ данных полевых исследований в бассейнах рек Вятка, Дон, Закавказья, в логах Тасжый и Усадьевский показал, что при промерзании почвы на глубину менее 60 см наблюдаются участки непромерзшей почвы, являющиеся очагами интенсивной инфильтрации талых вод в мерзлую почву.

### **Факторы, определяющие глубину промерзания почвы**

Промерзание почвы является достаточно сложным многофакторным процессом, изменяющим физические свойства деятельного горизонта речных водосборов [3]. При промерзании изменяются не только структура почвы и ее водно-физические свойства, но и пористость, плотность, водопроницаемость и теплофизические характеристики [3].

В течение зимнего сезона интенсивность промерзания почвы существенно изменяется. В первую половину зимы (декабрь, январь) процесс промерзания почвы происходит наиболее интенсивно. В этот период высота снежного покрова в бассейне р. Волга в среднем относительно невелика (например, в полях она составляет от 15 до 25 см) и не оказывает значительного влияния на глубину промерзания. Интенсивность промерзания в этот период прямо зависит от интенсивности нарастания отрицательной температуры воздуха. Анализ результатов наблюдений показывает, что глубина промерзания почвы в первую половину зимы определяется январскими морозами.

При достижении максимальных запасов воды в снеге, что, как правило, соответствует наибольшей теплоизоляционной возможности снежного покрова, процесс охлаждения почвы значительно замедляется, в результате



чего промерзание почвы в большинстве случаев практически прекращается или глубина ее промерзания изменяется крайне незначительно. Этому способствует то обстоятельство, что с увеличением глубины промерзания затрудняется отток тепла, выделяющегося при фазовых превращениях влаги.

При промерзании почвы ее плотность чаще всего уменьшается, а пористость увеличивается. Промерзание водонасыщенной песчаной почвы сопровождается отжатием влаги из ее промерзающей зоны в талую. Плотность почвы при этом незначительно увеличивается, а ее пористость уменьшается. Процесс промерзания суглинистой и супесчаной почвы при миграции влаги сопровождается уменьшением плотности [5]. В условиях речных водосборов промерзание почвы сопровождается миграцией влаги, изменением плотности и влажности почвы в ее промерзающей и талой зонах.

Согласно полученным авторами результатам [3], увеличение предзимнего увлажнения почвы приводит к увеличению влагонакопления в мерзлой зоне. При этом зависимость глубины промерзания почвы от ее влажности имеет неоднозначный характер. Это объясняется тем, что с увеличением влажности увеличивается теплопроводность почвы, но одновременно увеличиваются и затраты тепла на фазовые превращения вода — лед. Эти два фактора оказывают противоположное влияние на глубину промерзания — при большой влажности почвы процесс промерзания в основном замедляется, с увеличением ее плотности глубина промерзания, наоборот, увеличивается.

Несмотря на важность физических свойств почвы, при расчете глубины промерзания основными факторами, определяющими ее значение, являются температура воздуха в зимний период и высота снежного покрова.

Были проанализированы связи глубины промерзания с характеристикой  $\sqrt{|T|}$ , равной квадратному корню из суммы абсолютных значений отрицательной среднесуточной температуры за зимний период. В результате было получено соотношение следующего вида:

$$H_{\text{пр}} = a\sqrt{|T|} + b. \quad (1)$$

Значения параметров формулы (1) и коэффициента корреляции  $r$  для ряда пунктов наблюдений в бассейне р. Волга следующие:

Параметр	$a$	$b$	$r$
Киров	0,037	0,77	0,40
Елаьтама	0,031	0,57	0,50
Ершов	0,035	0,12	0,50
Астрахань	0,032	0,10	0,85
Пенза	0,016	0,01	0,40
Рязань	0,042	0,59	0,60
Безенчук	0,042	0,97	0,60
Среднее значение	0,036	0,45	0,55

Как видно, коэффициент корреляции между ежегодными значениями глубины промерзания почвы и суммой значений отрицательной температуры за зимний период для большинства пунктов наблюдения невысок. Это связано с тем, что на глубину промерзания почвы, кроме зимней темпера-



туры воздуха, в значительной степени влияют высота и плотность снежного покрова.

Для более детального анализа влияния физических факторов, которые обуславливают изменение глубины промерзания почвы при климатических изменениях, нами была использована физико-математическая модель тепло- и влагопереноса в промерзающей почве [3]. Модель позволяет учесть все физические свойства почвы, а также природное многообразие гидрометеорологических условий. В качестве исходной информации для математического моделирования использовались суточные значения метеорологических величин.

Сопоставление результатов математического моделирования и проведенных экспериментов по промораживанию и оттаиванию монолитов почвы ненарушенной структуры позволяет сделать вывод, что модель достаточно полно отражает реальные особенности процессов тепло- и влагопереноса в почве и может быть использована для расчета глубины ее промерзания [3]. Расхождение в данных расчета глубины промерзания почвы и ее физического моделирования составляет 1—3 см. Коэффициент корреляции между измеренными и рассчитанными значениями для периода 1961—1977 гг. равен 0,59, а для периода 1978—2006 гг. — 0,82. Неудовлетворительное совпадение некоторых результатов расчета и измерения (особенно в период с 1961 по 1977 г.) объясняется отсутствием полной информации о физических характеристиках и других параметрах экспериментальных площадок.

Анализ изменения метеорологических величин показал, что среднезимняя температура воздуха в период 1978—2006 гг. была выше, чем в предыдущий период. Кроме того, в конце 1970-х годов наблюдалось увеличение высоты снежного покрова. Все это привело к уменьшению глубины промерзания почвы.

Также были проведены численные эксперименты по оценке влияния снежного покрова на глубину промерзания с помощью представленной выше физико-математической модели. Установлено, что запасы воды в снежном покрове определяются в основном содержанием твердых осадков в зимний период (в отсутствие дней с оттепелью). При этом высота снежного покрова и его плотность являются расчетными характеристиками нашей модели. Ввиду значительной изменчивости характеристик снежного

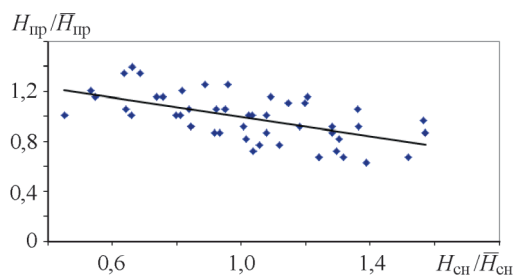


Рис. 3. Зависимость между относительными изменениями расчетных значений глубины промерзания почвы  $H_{пр}/\bar{H}_{пр}$  и относительными изменениями запасов воды в снеге  $H_{сн}/\bar{H}_{сн}$ .

покрова и глубины промерзания почвы в бассейне р. Волга была определена зависимость между относительными изменениями расчетных значений глубины промерзания и относительными изменениями запасов воды в снеге от их средних значений для выбранного пункта (рис. 3). Коэффициент корреляции этой зависимости равен 0,65.

В результате моделирования получено соотношение

максимальных запасов воды в снежном покрове и глубины промерзания в виде обобщенной формулы для оценки влияния снежного покрова на глубину промерзания за многолетний период

$$H_{\text{пр}}/\bar{H}_{\text{пр}} = 1,39 - 0,39H_{\text{сн}}/\bar{H}_{\text{сн}}, \quad (2)$$

где  $H_{\text{пр}}$  и  $H_{\text{сн}}$  — соответственно глубина промерзания и максимальные снегозапасы на водосборе за расчетный период;  $\bar{H}_{\text{пр}}$  и  $\bar{H}_{\text{сн}}$  — среднемноголетняя глубина промерзания и средние многолетние максимальные снегозапасы за рассматриваемый период времени.

### Влияние глубины промерзания почвы на зимний сток

При формировании зимнего стока существенную роль играют изменения влажности и температуры почвы зимой. Для этого периода характерно наличие сложных процессов перераспределения влажности в почве, связанных с замерзанием свободной и способной к передвижению влаги в верхних слоях почвы и ее миграцией к фронту промерзания из нижних слоев. Все эти процессы определяются температурным режимом почвы на водосборе и, в конечном итоге, глубиной ее промерзания. Повышение зимней температуры приводит к уменьшению не только глубины промерзания почвы, но и зимней миграции влаги и общей аккумуляции влаги в мерзлой зоне. Наиболее ярко этот процесс проявляется в случае высокого залегания грунтовых вод, при наличии верховодки, а также в прирусловой части водосбора. Установлено [4], что на величину зимнего стока наибольшее влияние оказывают глубина промерзания почвы на водосборе в зимний период, степень предзимнего увлажнения почвы и число дней с оттепелью. Для исследования были выбраны следующие речные водосборы: 1 — р. Самара — с. Елшанка, 2 — р. Ока — г. Муром, 3 — р. Ока — г. Калуга, 4 — р. Ока — г. Белев, 5 — р. Медвенка — Подмосковная воднобалансовая станция (ВБС), 6 — р. Кострома — п. Буй, 7 — р. Белая — г. Стерлитамак, 8 — р. Вятка — г. Вятские Поляны, 9 — р. Дема — д. Бочкарева. Данные за период с 1978 по 2004 г. по сравнению с периодом с 1952 по 1977 г. об увеличении зимнего стока только из-за уменьшения глубины промерзания почвы на этих водосборах бассейна р. Волга, полученные по результатам работы [4], приведены ниже:

Речной водосбор	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Увеличение стока, %	4	15	17	19	42	19	25	16	3

По нашим оценкам, уменьшение глубины промерзания почвы приводит к увеличению зимнего стока в среднем на 17%. На рис. 4 приведен график связи глубины промерзания почвы с величиной зимнего стока для р. Медвенка (Подмосковная воднобалансовая станция), при построении которого использовали результаты наблюдений за суточным расходом воды и расчетные значения глубины промерзания в тот же период. Для анализа использовали данные за безоттепельные начальные периоды в разные годы. Наиболее значительно величина стока изменяется в начальный период промерзания (до глубины порядка 30 см), далее процесс замедляется. Это

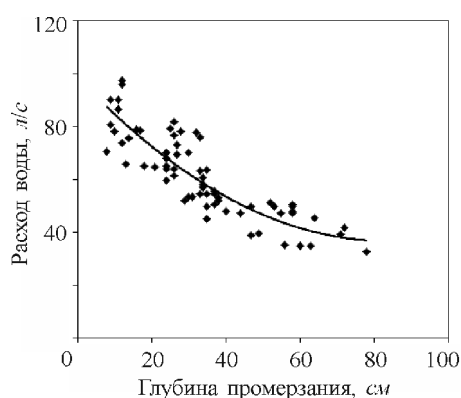


Рис. 4. Зависимость суточных значений зимнего стока р. Медвенка в районе выше устья р. Закса от расчетных значений глубины промерзания почвы.

можно объяснить тем, что формирование зимнего стока на водосборе р. Медвенка в значительной степени обусловлено увлажненностью верхних слоев почвы. В северо-западной части бассейна р. Волга почва промерзает на значительно большую глубину, чем на Подмосковной ВБС. Это обуславливает более слабую зависимость зимнего стока от зимней температуры, поэтому увеличение стока в результате повышения температуры зимой наблюдается гораздо реже. Однако зависимость увеличения зимнего стока от уменьшения глубины промерзания почвы прослеживается во всех климатических зонах бассейна р. Волга. В табл. 5 приведены некоторые зависимости зимнего стока от глубины промерзания почвы в разных климатических зонах бассейна. Как видно, наиболее тесная связь между этими характеристиками наблюдается в бассейнах рек степной зоны.

#### Влияние глубины промерзания почвы на сток в период весеннего половодья

Анализ процесса формирования талого стока показывает, что практически отсутствует прямая зависимость слоя талого стока от глубины промерзания почвы. Эта зависимость косвенная, так как одним из важнейших факторов формирования талого стока является аккумулированная в мерзлом слое влага, а объем стока определяется в основном запасами влаги в снежном покрове.

В бассейне р. Вятка достаточно хорошо прослеживается динамика потерь талого стока и глубины промерзания в период климатических изменений с 1980 по 2010 г. Средняя величина потерь талого стока в створе р. Вятка — г. Вятские Поляны за период стабилизации климатических характеристик (с 1936 по 1980 г.) составила 76 мм при глубине промерзания 79 см. Запасы воды в снеге и осадки периода снеготаяния ( $S + x$ ) были равны 197 мм, слой талого стока — 141 мм. За период климатических изменений потери талого стока составили 86 мм при глубине промерзания 37 см, приходной части ( $S + x$ ), равной 221 мм, и талом стоке 134 мм.

Таким образом, в период климатических изменений приходная часть ( $S + x$ ) увеличилась на 24 мм по сравнению с периодом стабилизации климатических характеристик, а при уменьшении глубины промерзания почвы на 42 см потери стока увеличились в среднем на 10 мм. Возросшая приходная часть баланса не компенсирует уменьшение талого стока на 7 мм. Полученные результаты не противоречат выводу о том, что с уменьшением глубины промерзания увеличиваются потери талого стока.

Содержание аккумулированной в мерзлом слое влаги полностью зависит от глубины промерзания почвы и ее влажности. Аккумулированная в

Таблица 5

**Зависимость зимнего стока от глубины промерзания почвы на территории водосборов рек в бассейне р. Волга**

Река — пункт наблюдения	Период наблюдений	Зависимость зимнего стока ( $I_3, м^3/с$ ) от глубины промерзания ( $H_{пр}, см$ )		
		сток	уравнение	$r$
Лесная зона				
р. Молога — д. Устюжна	1970—2008	1	$I_3 = 110,3H_{пр}^{0,32}$	0,67
р. Вятка — г. Вятские Поляны	1945—2010	2	$I_3 = 1058H_{пр}^{0,37}$	0,64
р. Ока — г. Муром	1961—2010	1	$I_3 = 932,9H_{пр}$	0,44
Лесостепная зона				
р. Кострома — г. Буй	1961—2010	1	$I_3 = 29,6H_{пр}^{0,24}$	0,54
р. Цивиль — д. Тувси	1961—2010	1	$I_3 = 159,3H_{пр}^{0,53}$	0,62
р. Дема — д. Бочкарева	1961—2010	1	$I_3 = 209,6H_{пр}^{0,58}$	0,68
Степная зона				
р. Самара — д. Ельшанка	1961—2010	1	$I_3 = 83,3H_{пр}^{0,40}$	0,71
р. Малый Черемшан — с. Абалдуевка	1961—2010	1	$I_3 = 13,7H_{пр}^{0,68}$	0,70
<i>Примечание.</i> Характеристика стока: 1 — 30-суточный зимний; 2 — наименьший зимний.				

мерзлом слое влага в период весеннего снеготаяния, с одной стороны, регулирует фильтрационные свойства почвы, а с другой — участвует в формировании половодья по мере оттаивания мерзлого слоя. Установлено [6], что водопроницаемость мерзлой почвы речных водосборов определяется в основном двумя факторами: запасами влаги в верхнем слое почвы (0—20 см) и термическим режимом почвы в течение зимы. По данным работы [3] водопроницаемость (коэффициент фильтрации) мерзлой почвы зависит как от исходной льдистости почвы до начала весеннего половодья, так и от приращения льдистости в процессе впитывания талой влаги в мерзлую почву.

Для песчаных и супесчаных почв это выражение имеет вид

$$K_{0м} = K_0 \cdot 1 - \frac{L}{P}^{2,8} \cdot 1 - \frac{L}{P}^5, \quad (3)$$

где  $K_0$  и  $K_{0м}$  — коэффициенты фильтрации талой и мерзлой почвы соответственно;  $L$  — величина льдистости до начала весеннего половодья;  $L$  — приращение льдистости при инфильтрации воды в мерзлую почву;  $P$  — пористость почвы.

Исходную величину льдистости определяет влажность почвы в конце зимнего периода, а приращение льдистости — глубина промерзания. Попадая в верхний слой почвы, часть талой влаги замерзает из-за так называемого запаса холода, зависящего от теплоемкости и величины отрицательной температуры почвы этого слоя, а также из-за потока холода, идущего из нижних слоев почвы, который существенно зависит от глубины ее промерзания. Исходя из уравнения (3) даже небольшое приращение льдистости во время половодья приводит к заметному уменьшению водопроницаемости почвы.

При небольшой глубине промерзания повышение температуры почвы в предвесенний и частично в весенний период не сопровождается существенным изменением ее инфильтрационной способности. При повышении температуры почвы до  $0^{\circ}\text{C}$  сначала оттаивает влага в мелких порах (связанная и малоподвижная вода). Поэтому до полного оттаивания почвы ее водопроницаемость практически не изменяется. Например, в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве при повышении температуры от  $-5$  до  $-0,5$   $^{\circ}\text{C}$  содержание незамерзшей воды увеличивается от 17 до 22%, т. е. на 5%. Очевидно, что в этом случае не может произойти заметного изменения водопроницаемости. Исходя из этого за показатель водопроницаемости обычно принимают сумму отрицательных значений температуры почвы за зимний период на глубине 20 см. Для полевых, не облесенных водосборов Подмосковной ВБС, в частности лога Полевой, установлена зависимость коэффициента стока половодья от интегрального показателя  $B$  в виде [6]

$$= 0,13B^{0,29}, \quad (4)$$

где  $B = (W_{0-20}^2 H_{\text{пр}})/1000$ ;  $W_{0-20}$  — запас влаги в предвесенний период в слое почвы 0—20 см, мм. Коэффициент корреляции зависимости (4) равен 0,87.

Анализ уравнения (4) показывает, что при увеличении глубины промерзания почвы увеличивается коэффициент стока половодья. Уменьшение глубины ее промерзания обуславливает уменьшение миграции влаги к фронту промерзания. В связи с этим уменьшаются вероятность образования, мощность и продолжительность существования водонепроницаемого слоя. Потери талого стока возрастают, что ведет к его уменьшению. В качестве примера приведем зависимость потери талого стока ( $P_m$ , мм) от приращений влаги  $W$  зимой для р. Медвенка в районе, расположенном выше устья р. Зака:

$$P_m = 0,0059 W^2 - 1,369 W + 115. \quad (5)$$

Коэффициент корреляции равен 0,66, что свидетельствует о значимости этого фактора.

На больших реках зависимость потери талого стока выражена слабо. Для бассейна р. Вятка — г. Вятские Поляны в годы, когда величина стока составляла от 41 до 60 мм, зависимость потери талого стока от глубины промерзания почвы аппроксимируется следующим уравнением:

$$P_m = -0,54H_{\text{пр}} + 106. \quad (6)$$

Коэффициент корреляции равен 0,60, что подтверждает наличие зависимости потери талого стока от глубины промерзания почвы.

### Заключение

Потепление климата обуславливает уменьшение глубины промерзания почвы во всех климатических зонах бассейна р. Волга. Анализ пространственной и временной изменчивости глубины промерзания почвы показал, что средняя глубина ее промерзания в этих зонах уменьшилась в широких пределах — от 10—20 до 90—100 см. Установлено, что уменьшение глубины промерзания в бассейне р. Волга приводит к увеличению зимнего

стока на 3—42% (в среднем на 17%). Коэффициент корреляции зависимости зимнего стока от глубины промерзания почвы в водосборах рек лесной и лесостепной зон в среднем равен 0,60, изменяясь при этом от 0,44 до 0,68. В бассейнах рек степной зоны он равен 0,70. Прямую зависимость объема талого стока от глубины промерзания почвы выявить часто сложно, так как важным фактором формирования талого стока является аккумулярованная в мерзлом слое влага, которая регулирует фильтрационные свойства почвы и участвует в формировании половодья по мере оттаивания мерзлого слоя почвы. Однако на отдельных водосборах бассейна р. Волга выявлена зависимость потери талого стока от глубины промерзания. На примере бассейна р. Вятка показано, что в период климатических изменений приходная часть водного баланса во время половодья увеличилась на 24 мм, а при уменьшении глубины промерзания почвы на 42 см потери стока увеличились на 10 мм. Возросшая приходная часть водного баланса не компенсирует увеличение потерь талого стока.

## Литература

- 1. Вершинина Л. К., Крестовский О. И., Калюжный И. Л. и др.** Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья. — Л., Гидрометеоздат, 1985, 189 с.
- 2. Водные ресурсы России и их использование.** — СПб, ГГИ, 2008, 598 с.
- 3. Калюжный И. Л., Лавров С. А.** Гидрофизические процессы на водосборе. — СПб, Нестор-История, 2012, 616 с.
- 4. Калюжный И. Л., Лавров С. А.** Основные физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек в условиях потепления климата. — Метеорология и гидрология, 2012, № 1, с. 68—81.
- 5. Калюжный И. Л., Лавров С. А., Штыков В. И.** О влиянии промерзания почвы на ее плотность. — Метеорология и гидрология, 2001, № 3, с. 91—102.
- 6. Калюжный И. Л., Павлова К. К.** Формирование потерь талого стока. — Л., Гидрометеоздат, 1981, 159 с.
- 7. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным.** — СПб, ГГИ, 2010, 162 с.
- 8. Шерстюков А. Б.** Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России. — Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 1, с. 79—87.