

## ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЗИМНЕГО СТОКА РАВНИННЫХ РЕК ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

И.Л. Калюжный<sup>1</sup>, С.А. Лавров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

## PROCESSES OF THE WINTER RUNOFF FORMING FOR LOWLAND RIVERS UNDER THE CHANGING CLIMATE

I.L. Kalyuzhny<sup>1</sup>, S.A. Lavrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

*В зимний период глубина промерзания почвы разделяет запасы почвенной влаги на две части: зону законсервированной влаги в мерзлом слое и зону, содержащую талую влагу, которая формирует зимний сток. Установлено, что при изменении климата в сторону потепления, глубина промерзания уменьшается. Как следствие, увеличивается содержание талой влаги и возрастает зимний сток. Показано, что за период с 1978 по 2012 гг. в бассейне р. Волга глубина промерзания изменяется в диапазоне от 28 до 49% от величин промерзания до 1978г. В бассейне р. Вятка глубина промерзания уменьшилась на 62,4%, зимний сток возрос на 55,1%. В зимний период, в почве происходит миграция влаги к фронту промерзания, которая уменьшает зимний сток. На водосборах с высокой степенью заболоченности, зимний сток увеличивается только в случае, когда глубина промерзания располагается выше нижней границы деятельного слоя болот.*

*During a winter season depth of soil freezing divides amount of soil water content into two parts: zone of "preserved" water into the frozen soil and zone of thaw water that forms value of winter runoff. It is determined that depth of soil freezing decreases under the climate warming. As the results, thaw water content increase and winter runoff value is going up as well. It is shown that depth of soil freezing within the Volga river basin varies during the period of 1978-2012 in the range of 28 to 49 % from the value of the freezing depth before 1978. Depth of freezing in the Vyatka river basin decreased at 62.4 %, and winter runoff value increased at 55.1 %. During a winter season soil moisture migration to the frost boundary occurs that decreases winter runoff value. For basins with a high degree of peat formation winter runoff increases only where depth of freezing locates above the lower limit of an active peat layer.*

В работах В.Ю.Георгиевского и И.А.Шикломанова [1] было показано влияние климатических изменений на формирование водных ресурсов в различных регионах России. Авторы показали, что особенностью современных изменений является увеличение меженного, зимнего стока. Ряд исследователей отмечает в период климатических изменений влияние на зимний сток оттепелей, их количество и продолжительность. Между тем процессы и механизм формирования зимнего стока в условиях климатических изменений далеко не ясны. Целью настоящей работы является установление механизма и процессов формирования зимнего стока в период климатических изменений.

В основу исследования положены многолетние материалы наблюдений на реках бассейна р. Волга и специализированных водно-балансовых и болотных станций Росгидромета. Выбор объектов обусловлен наличием многолетних наблюдений за всеми элементами водного баланса и основными факторами формирования стока.

Основным источником зимнего стока являются запасы влаги, сформированные осенними дождями. При промерзании почвы определенный запас почвенной влаги консервируется в мерзлой зоне и не принимает участия в формировании зимнего стока.

В первом приближении аккумулируемая влага в элементарной колонки мерзлой толщи  $V_L$  в зависимости от глубины промерзания почвы  $L$  равна:

$$V_L = (W - НВ), \quad (1)$$

где  $W$  и  $НВ$  – соответственно, общие влагозапасы и наименьшая полевая влагоемкость в слое почвы равной глубине промерзания.

Талая влага деятельного слоя, формирующая зимний сток  $ВС$ , равна сумме потоков от различных источников ее пополнения

$$ВС = (W - НВ)_H - V_L + В_{от} + В_{ф}, \quad (2)$$

где  $(W - НВ)_H$  – стокообразующая влага, содержащаяся в деятельном слое почвы мощностью  $H$  в его талой и мерзлой зоне;

$V_{от}$  и  $V_{ф}$  – влага, образованная за счет зимних оттепелей и фазовых превращений.

Анализ полевых наблюдений показывает, что чем меньше глубина промерзания, тем больше влаги, накопленной почвой в осенний период участвует в формировании зимнего стока. Средняя глубина промерзания за период климатических изменений в бассейне р. Медвенка – выше устья р. Заказа уменьшилась от 50 до 23 см, увеличивая при этом содержание талой влаги зимнего периода от 52 до 132 мм. Ее среднее содержание составляет 89 мм.

В увлажненной до НВ или переувлажненной почве, содержание аккумулятивной влаги в мерзлом слое влаги, полностью зависит от глубины промерзания, но имеет иную тенденцию: ее содержание увеличивается с увеличением глубины промерзания. За все годы наблюдений с 1956 по 2010 год ее среднее содержание в бассейне р. Медвенка составляет 53 мм и изменилось от 164 мм в 1972 г. до 3 – 7 мм в 1983 и 2006 г.

За период относительно стабильных климатических условий до 1980 г. средняя величина слоя зимнего стока в бассейне р. Медвенка составила 23 мм при стокообразующих запасах влаги в талой зоне, равных 68 мм. Изменение климатических условий (1980 – 2010 гг.) вызвало увеличение стокообразующих запасов влаги до 110 мм и зимнего стока до 35–40 мм. Влага, не израсходованная на формирование зимнего стока, достигла при этом 70 мм. В дальнейшем она принимает участие в формировании весеннего стока, пополняет грунтовые воды и вызывает их подъём дополнительно на ~ 1,0 м, по сравнению с первоначальным периодом.

Глубины промерзания полевых и лесных водосборов существенно отличаются, что и обуславливает запас зимней стокообразующей влаги. По данным наблюдений, с 1957 по 1965 год, на полевом водосборе лога Усадьевском и лесном лога Таежного, оценена стокоформирующая влага зимнего периода. На полевом водосборе она составляет в среднем 13 мм, или 32% всей стокообразующей влаги (41 мм). На лесном эта влага составляет 15 мм или 58% от стокообразующей (25,9 мм). На лесном водосборе больше половины талой влаги расходуется на сток зимнего периода.

На крупных речных бассейнах также отчетливо наблюдается реакция зимнего стока на уменьшение глубины промерзания. В бассейне р. Вятка (площадью 124000 км<sup>2</sup>), за период с 1936 по 1980 г. средняя глубина промерзания была равна 89 см. При климатических изменениях с 1981 по 2010 г. она уменьшилась до 33,5 см (на 62,4%). Средняя величина зимнего стока при этом возросла от 278,2 до 431,6 м<sup>3</sup>/с, т.е. на 55,1%.

Для степной реки Самары (створ р. Самара – пос. Ельшанка), в период стабильного климата, при значительных глубинах промерзания (средняя 86 см), средний 30-суточный сток не выходил за пределы 11 м<sup>3</sup>/с, а при их уменьшении (средняя 32 см) он возрос до 17 – 19 м<sup>3</sup>/с.

Анализ данных многолетних измерений промерзания почвы в бассейне р. Волга, на 61 метеостанции, позволил установить, что потепление климата обуславливает уменьшение глубины промерзания почвы во всех климатических зонах её бассейна. Эта тенденция наблюдается с 1977 - 1978 года, что тесно связано с увеличением количества зимних оттепелей, температуры воздуха зимнего периода года, уменьшением его продолжительности, а также теплоизолирующими свойствами снежного покрова. Тренд глубины промерзания индивидуален для каждой из климатических зон бассейна. Карты глубины промерзания почв для двух периодов: в условиях стабильных климатических характеристик, до 1977 г., и в период их изменений, с 1978 по 2012 г., полностью подтверждают эти тенденции. В северной части бассейна, в период с 1978 по 2012 год, средняя глубина промерзания сократилась на 38 см и составила 39 см, т.е. уменьшилась на 49% от средней глубины первоначального периода. В северо-западной и западной части изменение температуры воздуха на 1,1 °С, вызвало уменьшение глубины промерзания на 27 – 28 см, при средней глубине промерзания в первом периоде 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 этой части бассейна наблюдалась несколько меньшая средняя толщина снежного покрова, которая 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.

Определённый вклад во временную изменчивость глубин промерзания вносят увеличение числа оттепелей 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 суток за год. В северной части бассейна Волги число оттепелей возросло до 3–5 суток в год, в центральной – до 6–9 суток, на юге – до 10 и более. Синхронно с увеличением числа оттепелей уменьшается продолжительность холодного периода года. В северной части бассейна продолжительность уменьшилась на 5–7 суток, в центральной – на 10–15 и на юге – до 20 и более. Совокупное воздействие этих факторов обуславливает повышение среднесуточной температуры и увеличивает продолжительность её воздействия на деятельный слой почвы, что способствует уменьшению глубины промерзания.

При оттепелях, часть аккумулятивной влаги в мерзлом слое путем фазовых превращений может перейти в жидкую фазу и быть израсходованной в зимнем стоке. Однако величина этой влаги не превышает 5–7% от ее содержания в мерзлом слое почвы.

Пространственная изменчивость глубин промерзания в пределах речного бассейна обусловлена неоднородностью характеристик макрорельефа его поверхности и растительного покрова. Коэффициент вариации глубины промерзания почвы возрастает с уменьшением глубины промерзания. При глубинах промерзания менее 60 см наблюдаются участки талой почвы, что увеличивает ее инфильтрационную способность. В зимних условиях при глубоких оттепелях талые воды увеличивают зимний сток. При весеннем снеготаянии эти же глубины промерзания существенно увеличивают потери талого стока.

Содержание аккумулятивной мерзлой влаги, которая в талом состоянии может принимать участие в формировании стока, зависит от двух основных факторов: глубины промерзания и степени переувлажнения почвы выше НВ. В центральных районах лесной и лесостепной зонах ЕТР запасы влаги в метровом слое почвы достигают, а затем и превышают НВ в 95% случаев, в восточных, южных районах этих зон и степной зоны - в 50–80%.

В почве в зимний период существует два вертикальных потока влаги: первый, нисходящий – происходит путем оттока влаги, накопившейся при выпадении осенних дождей до влажности почвы выше НВ; второй, восходящий, происходит за счет миграции с талой зоны к фронту промерзания с последующим накоплением в твердой фазе на границе раздела. Интенсивность миграции влаги и ее накопление зависит от многих факторов: от механического состава почвы или грунта, начального увлажнения почвы, интенсивностью и продолжительностью промерзания, глубиной залегания грунтовых вод и температурного режима верхних горизонтов. Наиболее изменчивые влагозапасы в течении зимы в слое 0–50 см, они могут как увеличиваться, так и уменьшаться. В ниже расположенном слое 50–100 см их изменчивость составляет  $5 \div 10$  мм. По данным стационарных и экспедиционных исследований в бассейне р.Вятка наиболее интенсивно миграция к фронту промерзания происходит в диапазоне влажности от 0,75 до 1,1 НВ и зависит от глубины промерзания. При этих значениях НВ, для слоя 0–50 см, легкой суглинистой почвы, средняя для водосборов рек этого бассейна (реки Чепца, Кильмезь, Молома, Ярань) величина мигрирующей влаги  $\Delta W$  (в мм слоя воды) в зависимости от глубины промерзания  $L$  (см), определяется уравнением  $\Delta W = 10,64 \ln(L) - 30,98$  при коэффициенте корреляции  $R = 0,781$ . Слой мигрирующей влаги в конце зимы, который исключается из формирования зимнего стока, в зависимости от глубины промерзания равен  $10 \div 35$  мм и больше. Предельные значения на супесчаных почвах развитых на суглинках, по данным полевых измерений здесь, составляют 60–90 мм.

В переувлажненных почво-грунтах ( $> 1,1$  НВ) миграция влаги относительно небольшая или вовсе не наблюдается, т.к. в почве преобладает отток влаги к грунтовым водам, которые и формируют зимний сток. Возникающий в переувлажненных почвах “поршневой эффект”, обусловленный отжатием свободной влаги растущими кристаллами льда в талую зону [2], наоборот, увеличивает зимний сток.

Таким образом, при уменьшении глубины промерзания в диапазоне влажности почвы от 0,75 до 1,1 НВ, зимний сток уменьшается на величину мигрирующей влаги. Поршневой эффект при влажности больше 1,1 НВ незначительно увеличивает зимний сток. По данным экспедиционных наблюдений в бассейне р. Дон и в Подмосковной воднобалансовой станции при влажности почвы менее 0,75 НВ и ниже зимние приращения влаги крайне малы или их вовсе нет. Отсюда влияние на зимний сток они не оказывают.

За многолетний период наблюдений зимняя миграция влаги в бассейне р. Медвенки изменялась от 9 мм до 106 мм. Анализ зимних приращений влагозапасов свидетельствует об их явном уменьшении от 55 – 106 мм до 20 – 40 мм, т.е. на 30 – 38%. Аналогично им возрастает зимний сток. Отсюда следует, что влага, которая не мигрирует к фронту промерзания, принимает участие в увеличении зимнего стока.

Вне зависимости от того, залегают ли грунтовые воды далеко от дневной поверхности или близко к ней, существенное увеличение влаги в верхних слоях почвы на полевых водосборах ведет к образованию водонепроницаемого слоя и увеличивает сток половодья.

Анализ рядов стоковых наблюдений на заболоченных реках Западной Сибири и Севера ЕТР показывает полное или частичное отсутствие реакции зимнего стока на изменение климатических характеристик. На основании наблюдений специализированных болотных станций Росгидромета был проанализирован процесс формирования стока при климатических изменениях за последний 30-летний период. Было установлено, что запас влаги аккумулированный в мерзлом слое олиготрофных болот Иласское и Ламмин-Суо до 1979 г, соответственно составлял 300 и 142 мм. За период изменения климатических характеристик, с 1980 по 2009 г. он уменьшился, так как уменьшилась глубина промерзания, и, соответственно, составил в среднем 190 и 119 мм. Таким образом, 116 и 23 мм воды дополнительно высвобождались для увеличения зимнего стока. Но это пополнение могло наступить только в том случае, если глубина промерзания деятельного слоя болот меньше толщины деятельного слоя [3]. Последнее обусловлено тем, что нижняя граница этого слоя олиготрофных болот (38 - 45 см от поверхности болота) имеет коэффициенты фильтрации близкие к 0,002 см/сек., т.е. является своеобразным водупором. При понижении уровня болотных вод до этой границы сток с болота прекращается. Сток с болотного массива в зимний период возможен только в том случае, если существует проточная зона между относительным водупором и границей промерзания.

На болотном массиве Иласское глубина промерзания за последний тридцатилетний период с 1980 по 2009 г. значительно изменилась по сравнению с предшествующим. При относительно стабильном климате предшествующего периода, до 1980 г, наибольшая годовая глубина промерзания в среднем составляла 39 см (наибольшая 62 и наименьшая 21 см). Увеличение среднегодовой температуры (с 1981 по 2009 г.) вызвало уменьшение глубины промерзания в среднем до 26 см (наибольшая 47 и наименьшая 11 см), что обусловило увеличение проточной зоны от нулевых значений до 12 см в период климатических изменений. За период с 1963 по 1980 г. глубина промерзания в 10 случаях превышала нижнюю границу деятельного слоя, в последующий период – только в 3 случаях (зимой 1985, 1995 и 2001г.). За эти два периода зимний сток (январь-февраль месяцы) на р. Черная, которая дренирует болото, возрос от 3,69 л/с до 14,4 л/с., т.е. в 3,9 раза.

Таким образом, установлено, что процесс промерзания почвы осуществляет регулирующую функцию в формировании зимнего стока речных бассейнов равнинных рек.

### Литература

1. Георгиевский В.Ю., Шикломанов И.А. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 89 – 99.
2. Калюжный И.Л., Павлова К.К. Формирование потерь талого стока. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 159 с.
3. Калюжный И.Л., Лавров С.А., Романюк К.Д. Изменение водного режима болот севера и северо-запада России под влиянием климатических факторов//Водные ресурсы. 2012.Том 39, №1. С.13 – 25.