

Механизм влияния глубины промерзания почв речных бассейнов на зимний сток

И.Л.Калюжный*, С.А.Лавров*

*ФГБУ “Государственный гидрологический институт”

199053, Санкт-Петербург, В.О., 2-я линия, 23

E-mail:hfl@mail.ru

Установлено, что глубина промерзания почвы речных водосборов является одним из факторов формирования зимнего стока. Глубина промерзания осуществляет регулирующую функцию перераспределения запасов почвенной влаги между талым и мерзлым слоем почвы. Запасы влаги в талом слое почвы расходуются на зимний сток; в мерзлой зоне – на формирование талого стока. Глубины промерзания почвы за период климатических изменений существенно уменьшились, что обуславливает увеличение зимнего стока и увеличение потерь талого стока.

Зимний сток, глубина промерзания почвы, талая и мерзлая зона почвы, стокоформирующая влага, потери стока.

Введение

В работах В.Ю.Георгиевского и И.А.Шикломанова [2], а также более поздних работ ряда авторов было показано влияние климатических изменений последних тридцатилетий на формирование водных ресурсов в различных регионах России. Установлено, что особенностью современных их изменений является увеличение меженного, особенно зимнего стока. Наиболее четко рост зимнего стока прослеживается на Европейской территории страны, от верхней части бассейна Северной Двины до низовьев Дона и Волги. Ряд исследователей отмечает влияние на зимний сток посредством увеличения количества и продолжительности оттепелей в период климатических изменений и фазовыми переходами влаги при повышении температуры почвы. Оценена также роль и механизм влияния климатических изменений на сток весеннего половодья [4,12]. Между тем механизм формирования зимнего стока в условиях климатических изменений далеко не ясен. Целью настоящей работы является установление механизма влияния климатических изменений, в частности, глубины промерзания, на формирование зимнего стока.

Глубина промерзания – как механизм перераспределения запасов стокоформирующей влаги

Установлено, что главным звеном воздействия климатических изменений на зимний сток является повышение температуры внешней среды, которая изменяет тепло-массообмен в деятельном слое почвы и уменьшает глубину промерзания [4,6]. При промерзании почвы определенный запас почвенной влаги консервируется в мерзлой зоне

и не принимает участия в формировании зимнего стока. Таким образом, глубина промерзания осуществляет регулирующую функцию в формировании зимнего стока.

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

$$V_L = (W - НВ)_L, \quad (1)$$

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

Стокоформирующая талая влага, содержащаяся в деятельном слое, при условии, если общий запас влаги W больше наименьшей полевой влагоемкости $НВ$, зависит от глубины промерзания почвы. Талая влага деятельного слоя, формирующая зимний сток V_C , равна сумме потоков от различных источников ее пополнения

$$V_C = (W - НВ)_h - (W - НВ)_L + V_{от} + V_{\Phi}, \quad (2)$$

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

$(W - НВ)_L$ – влага мерзлой зоны, которая участвует в формировании весеннего стока;

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

Целесообразно в качестве деятельного слоя толщиной h рассматривать слой почвогрунтов, в котором на сетевых подразделениях Росгидромета измеряют влагозапасы, т. е. слой 0 – 100 см.

Общая характеристика объектов и методика исследований

В основу материалов исследования положены многолетние материалы наблюдений Подмосковской ВБС, Валдайского филиала ФГБУ “ГГИ” и результаты наблюдений на реках бассейна р.Волга. Выбор этих объектов обусловлен наличием многолетних наблюдений за запасом влаги в почве, глубиной промерзания и стоком в каждом из них.

Детально рассматривался процесс формирования стока на водосборе р.Медвенка – выше устья р. Закзы (Подмосковской ВБС). Площадь бассейна, в которой развиты суглинистые дерново-слабоподзолистые, легко суглинистые и песчаные почвы, равна 21,5 км². Описание бассейна реки приведено в работе Субботина А.И. и Дыгало В.С. [8].

Малые полевые и лесные бассейны в наших исследованиях представлены, соответственно, логами Усадьевский и Таежный (Валдайский филиала ГГИ). Описание их бассейнов приведено в [7,9]

В работе использованы результаты наблюдений по рекам (Белая, Ока, Сура, Ветлуга) приведенные в [3], а также по рекам Вятке и Самаре.

В основу методики исследования положена оценка разделения послыйных запасов почвенной влаги на влагу, принимающую участие в формировании зимнего стока, и ту часть общих запасов почвенной влаги, которая аккумулируется в мерзлой зоне и не принимает участия в формировании зимнего стока. Такое разделение позволяет установить зависимость зимнего стока от талых стокоформирующих запасов влаги, зависящих от глубины промерзания почв в конкретных бассейнах.

Результаты исследования и их обсуждения

В центральных районах лесной и лесостепной зонах ЕТР запасы влаги в метровом слое почвы достигают, а затем и превышают наименьшую влагоемкость в 95% случаев, в восточных, южных районах этих зон и степной зоны - в 50 – 80% [1].

Содержание аккумулированной мерзлой влаги, которая в талом состоянии может принимать участие в формировании стока, зависит от двух основных факторов: глубины промерзания почвы и степени ее переувлажнения выше НВ.

В таблице 1 приведены осредненные величины глубин промерзания, талой и мерзлой влаги зимнего периода по наблюдениям на Подмосковской ВБС с 1956 по 2010 год. Анализ таблицы показывает, что содержание влаги талой зоны за зимний период увеличивается пропорционально уменьшению глубины промерзания почвы.

Зависимость содержания талой влаги зимнего периода $V_{ТЗ}$ от глубины промерзания почвы в бассейне р. Медвенка – выше устья р. Закза (рис. 1) определяется уравнением вида

$$V_{C} = 0.068 L^2 - 7.382 L + 262 \quad (3)$$

Коэффициент корреляции этой зависимости равен 0.87.

Отсюда следует: чем меньше глубина промерзания, тем больше влаги, накопленной почвой в осенний период, участвует в формировании зимнего стока. Средняя глубина промерзания за период климатических изменений 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 аккумулированной в мерзлом слое влаги, полностью зависит от глубины промерзания, но имеет иную тенденцию: ее содержание увеличивается с увеличением глубины промерзания. На рис.2 приведена эта зависимость для водосбора р.Медвенка – ниже устья р. Закза по данным наблюдений с 1956 по 2010 год. За все годы наблюдений ее среднее содержание составляет 53 мм и изменяется от 3 – 7 мм в 2006 и 1983 г. до 164 мм в 1972 г.

За период относительно стабильных климатических характеристик, с 1956 по 1980 г, средняя величина слоя зимнего стока составила 23 мм при стокообразующих запасах влаги в талой зоне равных 68 мм. В среднем, не расходуется на зимний сток 45 мм влаги.

За период изменения климатических характеристик, с 1981 по 2010 г, стокообразующие запасы влаги существенно увеличиваются до 110 мм, зимний сток возрастает до 35 – 40 мм, а неизрасходованная на сток влага достигает 70 и более мм. Влага, которая не израсходована на формирование зимнего стока, по сравнению с первым периодом, возросла на 25 мм. В дальнейшем эта влага (т.е. 70 мм) принимает участие в формировании весеннего стока, пополняет грунтовые воды, а также может увеличивать и летний сток.

Таким образом, если запасы стокообразующей влаги талой зоны больше слоя зимнего стока, то должна происходить подпитка грунтовых вод, что и вызывает их подъем, а так же увеличение межлетнего стока. Наоборот если слой зимнего стока больше запасов стокообразующей влаги талой зоны, то должно происходить понижение уровня грунтовых вод вследствие их сработки.

Запасы стокообразующей влаги на речном водосборе будут определяться общим содержанием влагозапасов почвы с учетом наименьшей полевой влагоемкости. Временной ход общих влагозапасов и стокообразующей влаги в предзимний период в бассейне р.Медвенка (рис.3 и 4) свидетельствует о их увеличении за период наблюдений с 1957 по 2010 год. Средняя величина общих влагозапасов в почве за период относительной стабилизации климатических характеристик (с 1956 по 1977 г.) составила 332 мм, при их изменении за период с 1978 по 2010 г. увеличилась до 371 мм, т.е. на 12%. Уменьшение глубины промерзания за эти периоды с 48 до 30 см увеличило слой стокообразующей талой влаги зимнего периода с 63 мм до 110 мм и уменьшило аккумулируемую влагу в мерзлом слое с 56 мм до 48 мм. Разность средних величин аккумулированной влаги за два периода (с 1957 по 1977 г и с 1978 по 2010 г) является одним из источников увеличения зимнего стока за последний период.

Аккумулированная в мерзлом слое влага естественно не участвует в зимнем стоке, но при оттепелях, в ряде случаев, часть ее при фазовых превращениях может перейти в жидкую фазу и быть израсходованной в зимнем стоке. Однако величина влаги выделяемой при фазовых переходах не превышает $5 \div 7\%$ от ее содержания в мерзлом слое почвы.

Анализ процесса формирования талого стока на водосборе р.Медвенка однозначно показывает, что прямая зависимость слоя талого стока от глубины промерзания почвы, как от определяющего фактора, отсутствует. Эта зависимость косвенная, так как одним из

факторов формирования талого стока является аккумулярованная влага, которая зависит от глубины промерзания и запаса влаги в почве. Глубина промерзания почвы до 60 см предопределяет также талую долю площади водосбора которая формирует инфильтрационную составляющую, как при оттепелях, так и в процессе весеннего снеготаяния [6]. Аккумулярованная в мерзлом слое влага в период весеннего снеготаяния участвует в формировании половодья по мере оттаивания мерзлого слоя.

Помимо капиллярной влаги, аккумулярованной в мерзлом слое, здесь так же аккумуляруется влага, мигрирующая к фронту промерзания, которая в дальнейшем не участвует в формировании зимнего стока.

При миграции влаги могут наблюдаться два крайние случаи: грунтовые воды залегают далеко или близко к дневной поверхности.

В первом случае происходит перераспределение влаги вблизи фронта промерзания и вертикальный поток влаги не влияет на положение уровня грунтовых вод.

Если уровень грунтовых вод располагается близко к дневной поверхности, то поток мигрирующей влаги пополняется за счет грунтовых вод. Уровень грунтовых вод при этом снижается, уменьшая тем самым зимний сток.

Как в первом, так и во втором случае увеличение влаги в верхних слоях почвы на полевых водосборах ведет к образованию водонепроницаемого слоя и увеличивает сток весеннего половодья. В этих условиях коэффициент стока весеннего половодья возрастает до 0.80 – 0.90. Такое перераспределение влаги значительно влияет на формирование весеннего половодья на полевых водосборах и не оказывает существенного влияния на зимний сток [1].

Многолетние наблюдения за влажностью почвы в бассейне р.Медвенки показали, что зимняя миграция влаги изменяется в диапазоне от 9 мм до 106 мм. Временной ход зимних приращений влагозапасов за счет миграции свидетельствует об их явном уменьшении за период с 1956 по 1977 г.) от 55 – 106 мм до 20 – 40 мм за второй период с 1978 по 2010 г., т.е. на 30 – 38% . Отсюда следует, что влага, которая не мигрирует к фронту промерзания и не аккумуляруется в мерзлом слое, принимает участие в увеличении зимнего стока.

Учитывая, что глубины промерзания на полевых и лесных участках существенно отличаются [1, 6, 8], необходимо дать оценку содержания стокоформирующей влаги на этих участках. С этой целью, пренебрегая двумя последними членами в уравнении (2), произведена оценка стокоформирующей влаги в зимний период на водосборе логов Усадьевском и Таежном, приведенная в таблице 2.

Согласно таблицы следует, что стокообразующая талая влага зимнего периода на полевом водосборе лога Усадьевский за период наблюдения с 1957 по 1965 год составляет в среднем 13 мм или 32% от всей стокообразующей влаги (41 мм). На лесном водосборе (лог Таежный) эта влага составляет 15 мм или 58%. Таким образом, на лесном водосборе в среднем больше половины талой влаги расходуется в зимний период.

Зависимость слоя аккумулированной влаги мерзлой зоны от глубины промерзания в зимний период на логах Усадьевский и Таежный имеет вид

$$V_L = 0.0053 L^2 + 0.9835 L - 4.26 \quad (4)$$

Коэффициент корреляции этой зависимости 0.90 свидетельствует об устойчивой тенденции увеличения аккумулированной влаги от глубины промерзания.

За период наблюдения на логе Усадьевском содержание стокообразующей влаги в среднем составило 65% от общего содержания влаги предзимнего периода. Содержание аккумулированной влаги в условиях леса значительно меньше и в среднем составляет 42%. Установлено, что по отношению к полевой части переувлажненных водосборов в лесной части слой этой влаги практически всегда меньше, что и обусловлено разностью в глубинах промерзания. Понятно, что с увеличением глубины промерзания переувлажненной почвы увеличивается и содержание аккумулированной влаги.

Для оценки зависимости запасов воды в талой и мерзлой зоне деятельного слоя почвы от глубины ее промерзания использованы результаты наблюдений и расчетов приведенные в работе [3]. В качестве показателя влажности почвы рассматриваются осредненные по водосборам предзимние продуктивные запасы влаги метрового слоя почвы за период с 1936 по 1957 год. В этом случае запасы влаги, аккумулированные в мерзлом слое почвы ($V_{\text{АКК}}$, мм) рассчитывались, согласно выражения

$$V_{\text{АКП}} = (V_{\text{П}}L)/100, \quad (5)$$

где $V_{\text{П}}$ - продуктивные запасы влаги метрового слоя почвы, мм; L – глубина промерзания, см. Влага талого слоя ($V_{\text{ТАЛ}}$) при промерзании почвы определяется по разности $V_{\text{П}} - V_{\text{АКП}}$.

Результаты расчета зависимостей аккумулированной в мерзлой почве влаги от глубины промерзания почвы [$V_{\text{АКК}} = F(L)$] и зависимость запасов влаги талой зоны от глубины промерзания [$V_{\text{ТАЛ}} = F(L)$] приведены в таблице 3. Ее анализ показывает, что теснота связи аккумулированной в мерзлом слое влаги от промерзания почвы увеличивается в зависимости от уменьшения площади водосбора и степени изменчивости его ландшафтного строения. Так, на водосборе р.Белая, где присутствуют равнинные (полевые), лесные и горные ландшафты, коэффициент корреляции зависимости $V_{\text{АКК}} = F(L)$ равен 0.38 при площади бассейна 121000 км². Но при близкой площади водосбора р.Вятка в 129000 км², где он представлен равнинными полевыми и лесными ландшафтами,

коэффициент корреляции возрастает до 0.69. В бассейне р.Сура, где господствуют полевые равнинные ландшафты он равен 0.83.

В таблице 3 на примере р.Ока показано, что в значительном по площади равнинном бассейне (244000 км²) теснота связи зависимости $V_{AKK} = F(L)$ отдельных частных территорий (бассейнов ее притоков) определяется близкими коэффициентами корреляции от 0.82 до 0.91, но каждая из них определяется индивидуальными выражениями этой зависимости. В целом в пределах общего бассейна р. Ока он равен 0.79, т.е. несколько меньше слагающих отдельных территорий.

Запасы влаги талого слоя, которые расходуются в процессе формирования зимнего стока, имеют высокую степень связанности с наибольшей за зиму глубиной промерзания почвы.

Эта зависимость $V_{ТП} = F(L)$ для рассматриваемых бассейнов, выражена в виде отдельных аналитических уравнений, так же приведена в таблице 3. Коэффициенты корреляции изменяются в диапазоне от 0.68 до 0.97. Наибольшая теснота связи наблюдается в бассейне р.Сура (0.97); наименьшая – в бассейне р.Ветлуга (0.68) и на территории Окско-Клязьминского междуречья (0.66). В речных бассейнах больших рек, (Вятка, Белая) коэффициент корреляции не ниже 0.93; в бассейне Оки он равен 0.79. Но в частных бассейнах ее притоков он также значителен.

С увеличением продуктивных запасов влаги талого слоя $V_{ТП}$ происходит и увеличение зимнего стока. Для р.Вятка – г.Вятские Поляны средний расход стока за февраль ($Y_{фев}$ м³/с) выражается аналитическим уравнением

$$Y_{фев.} = 0.015 V_{ТП}^2 - 0.105 V_{ТП} + 170 \quad (6)$$

при коэффициенте корреляции равном 0.80.

Зависимость среднемесячного расхода стока в январе ($Y_{январь}$) в створе р.Ветлуга – д.Дубники от продуктивных запасов талого слоя выражается уравнением

$$Y_{январь} = 0.397 V_{ТП}^2 + 13.6 \quad (7)$$

при $R = 0.64$.

Аналогичная зависимость для створа р.Ока – Нижний Избылиц для стока в феврале –

$$Y_{фев.} = 0.043 V_{ТП} + 4.34 V_{ТП} + 467 \quad (8)$$

при $R = 0.67$.

Зависимость для речных систем, состоящих из нескольких разновидностей ландшафтов и почвенных разностей, такая зависимость не наблюдается. В бассейне р.Белая коэффициент корреляции этой зависимости равен 0.24.

Реакция зимнего стока на изменение глубины промерзания наблюдается и на крупных реках. В лесной зоне, в частности в бассейне р.Вятка ($F = 124000$ км²)

уменьшение глубины промерзания и соответствующее увеличение зимнего стока происходит с 1980 г. За период с 1936 по 1980 г. средняя глубина промерзания, определенная по 7 пунктам наблюдений, была равна 89 см. При климатических изменениях с 1981 по 2010 г. она уменьшилась до 33.5 см, т.е. на 62.4%. За эти два периода по створу р. Вятка – г.Вятские Поляны средняя величина зимнего стока возросла от 278.2 до 431.6 м³/с, т.е. на 55.1 %.

Наблюдается устойчивая зависимость между глубиной промерзания почвы и зимним минимальным стоком. С уменьшением глубины промерзания зимний минимальный сток ($Y_{\text{зм}}$, м³/с) увеличивается. Для бассейна р.Вятка зависимость имеет вид:

$$Y_{\text{зм}} = 0.018 L^2 - 4.25 L + 413 \quad \text{при } R = 0.66 \quad (9)$$

Уравнение (5) справедливо до глубин промерзания 110 – 120 см. В среднем величина зимнего стока увеличивается на 2.76 м³/с при уменьшении глубины промерзания на 1 см. Динамика уменьшения глубин промерзания и возрастания зимнего стока в бассейне р.Вятка приведена в таблице 4.

Для оценки влияния глубины промерзания на зимний сток р. Вятка – г.Вятские Поляны весь диапазон глубины промерзания, от 10 до 90 см и более, был разбит на интервалы по 10 см. В каждом из этих интервалов определялась средняя измеренная глубина, наименьший и средний зимний сток (таблица 4). В диапазоне глубин от 61 до 90 см и глубже средний зимний сток изменяется в относительно небольшом диапазоне, от 226 до 260 м³/с. Это объясняется тем, что при глубинах промерзания более 61 см в формировании зимнего стока участвует стокоформирующая влага только талой зоны. А при глубинах от 10 до 60 см в формировании стока участвует также и влага, образующаяся при оттепелях, свободно инфильтрующаяся в почву на площадях водосбора с малыми глубинами промерзания. Понятно, что при глубинах промерзания 10 - 60 см, запас влаги в талой зоне значительно больше, чем при промерзании 61 – 80 см и более. При относительно небольших глубинах промерзания зимний сток значительно возрастает до 361 – 493 м³/с, т.е. в 1.76 раза.

Аналогичная зависимость, для рек степной зоны, на примере р.Самара – п.Ельшанка ($F = 22800\text{км}^2$), также приведена в таблице 5. В этом бассейне при значительных глубинах промерзания средний 30-и суточный сток не выходит за пределы 11 м³/с, а при небольших глубинах промерзания он возрастает до 17 – 19 м³/с.

Зависимость увеличения зимнего стока от уменьшения глубины промерзания прослеживается во всех климатических зонах бассейна р. Волга. Установлено, что уменьшение глубины промерзания в бассейне р.Волга приводит к росту зимнего стока в

среднем на 17 %, при наименьшем увеличении в 3 % и наибольшем – 42 %. Коэффициент корреляции зависимости зимнего стока от глубины промерзания для рек лесной и лесостепной зоны в среднем равен 0.60, изменяясь при этом от 0.44 до 0.68. В бассейнах рек степной зоны он равен 0.70.

Возрастание зимнего стока влечет за собой уменьшение талого стока. Увеличение зимнего стока при уменьшении глубины промерзания и уменьшения слоя стока весеннего половодья обусловлено не только увеличением запаса стокоформирующей влаги в талой зоне, но и увеличением инфильтрационной способности мерзлого слоя. Ранее было установлено, что последняя наблюдается при увеличении доли площади водосбора с глубинами промерзания от 1 ÷ 10 см до 50 ÷ 60 см [1,6]. При этих глубинах промерзания значительно возрастает инфильтрационная способность водосбора. В зимний период при оттепелях, талые воды могут увеличивать зимний сток. При снеготаянии, глубины промерзания в диапазоне от 1 ÷ 10 см до 60 см, существенно увеличивают потери талого стока в весенний период.

На рис. 5 приведена динамика потерь талого стока и глубин промерзания в бассейне р.Вятка – г.Вятские Поляны за период наблюдений с 1936 по 2010 год. Анализ временного хода потерь талого стока и глубин промерзания убедительно свидетельствует, что на протяжении последнего 30-летия значительно уменьшилась средняя глубина промерзания почвы (на 62,4% по отношению к периоду с 1936 по 1980 г.) и возросли средние потери талого стока, за два рассматриваемых периода, с 76 мм до 86 мм. Но расходная часть периода снеготаяния (запасов воды в снеге + осадки периода половодья), увеличилась с 197 мм до 221 мм, что и обусловило возрастание слоя стока весеннего половодья за последний период с 1981 по 2010 г., т.е. на 7 мм.

Отсюда, реакция водосбора на уменьшение глубины промерзания почвы при климатических изменениях проявляется в виде увеличения потерь стока как в зимний период, так и при снеготаянии в весенний период.

Выводы

Промерзание почвы является фактором, осуществляющим разделение общих запасов почвенной влаги на два зоны: талую и мерзлую. Влага мерзлой зоны аккумулируется в зимний период и не участвует в формировании стока. Влага талой зоны, если ее значения превышают наименьшую полевую влагоемкость, участвует в формировании зимнего стока. С увеличением глубины промерзания запасы стокоформирующей влаги уменьшаются, запасы влаги, аккумулированной в мерзлом слое, увеличиваются. Если зимний сток меньше запасов стокообразующей влаги талой

зоны, то должна происходить подпитка грунтовых вод, наблюдаться их подъем и увеличение меженного стока.

При климатических изменениях за последний тридцатилетний период существенно уменьшилась глубина промерзания почвы. Как следствие, увеличиваются запасы стокоформирующей влаги и возрастает зимний сток. В бассейнах рек лесной зоны зависимость между запасами стокоформирующей влаги и зимним стоком достаточно высокая, коэффициентами корреляции в бассейне р.Вятка – 0.80, для рек Ветлуги и Оки – соответственно, - 0.64 и 0.67. Для рек имеющих сложное ландшафтное строение, например р.Белая, эта зависимость менее выражена. Таким образом, влияние глубины промерзания почвы в речном бассейне на зимний сток осуществляется путем воздействие ее на запасы почвенной влаги. Отсюда наблюдается достаточно устойчивая зависимость зимнего стока от глубины промерзания.

В бассейне р.Вятка средняя глубина промерзания уменьшилась на 62.4%, что вызвало увеличение зимнего стока по створу р. Вятка – г.Вятские Поляны на 55.1 %. Таким образом, уменьшение глубины промерзания почвы на 1% в этом бассейне, вызывает увеличение зимнего стока на 0.9 %.

Литература

- 1.Вершинина Л.К., Крестовский О.И., Калюжный И.Л., Павлова К.К. Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 189 с.
- 2.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.
- 3.Змиева Е.С. Прогнозы притока воды к Куйбышевскому и Волгоградскому водохранилищам. М.: Гидрометеиздат, 1964. 256 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., Павлова К.К. Формирование потерь талого стока. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 159 с.
6. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Гидрофизические процессы на водосборе. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2012.616 с.
7. Корзун В.И. Сток и потери талых вод на склонах полевых водосборов. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 168 с.

8. Субботин А.И., Дыгало В.С. Многолетние характеристики гидрометеорологического режима в Подмосковье, часть I. М.:1982. 158 с.

9. Урываев В.А. Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. Л.: Гидрометеоздат, 1953. 230 с.

Таблица 1. Осредненные величины запасов влаги зимнего периода по данным наблюдений на Подмосковской ВБС с 1956 по 2010 год.

Период, годы	Общие предзимние влагозапасы, мм	Зимние стокообразующие влагозапасы, мм	Влагозапасы зимнего периода, мм		Глубина промерзания, см
			аккумулированные в мерзлой толще	расходуемые на зимний и весенний сток	
1956–1960	301	87	35	52	47
1961–1965	326	112	58	54	50
1966–1970	319	105	40	65	38
1971–1975	371	160	87	73	55
1976–1980	369	155	82	73	40
1981–1985	370	156	43	113	29
1986–1990	363	149	65	84	43
1991–1995	398	184	52	132	28
1996–2000	355	142	34	108	23
2001–2005	369	155	40	115	26
2006-2010	369	155	48	107	30
Среднее	355	142	53	89	33

Таблица 2. Распределение общих предзимних запасов влаги деятельного слоя почвы (0-50 см) в зимний период на водосборах логов Усадьевском и Таежном по данным наблюдений 1957-1965 года.

Запас влаги	Общие предзимние влагозапасы W, мм	влага деятельного слоя почвы (0-50 см), мм		Стокообразующая влага мерзлого слоя, мм	Глубина промерзания почвы, см
		стокообразующие зимние влагозапасы	формирующие зимний сток влагозапасы талой зоны		
Лог Усадьевский (поле)					
Наибольший	214	77	25	66	58
Наименьший	152	15	0	4	9
Средний	178	41	13	26	26
Лог Таежный (лес)					
Наибольший	206	70	26.5	57.4	41.0
Наименьший	144	8	9.6	0.40	1.0
Средний	162	26	15	11	13
(НВ слоя 0 – 50 см в логге Усадьевском равна 137 мм, в логге Таежном-136 мм)					

Таблица 3. Зависимости запасов воды (мм) в талой ($V_{ТАЛ}$) и мерзлой ($V_{АКК}$) зоны деятельного слоя от глубины промерзания почвы (L , см) для ряда рек бассейна Волги

Пункт наблюдений	Зависимость $V_{АКК} = F(L); R$	Зависимость $V_{ТАЛ} = F(L); R$
р.Вятка-Вятские Поляны, $F = 124000 \text{ км}^2$	$V_{АКК} = 2.004 L^{0.93}$ $R = 0.69$	$V_{ТАЛ} = -1.56 L + 156$ $R = 0.93$
р.Ветлуга-д.Дубники, $F = 28600 \text{ км}^2$	$V_{АКК} = 0.439 L^{1.27}$ $R = 0.68$	$V_{ТАЛ} = 173e^{-0.021 L}$ $R = 0.68$
р.Белая – г.Бирск, $F = 121000 \text{ км}^2$	$V_{АКК} = 14.6 L^{0.47}$ $R = 0,38$	$V_{ТАЛ} = 0.023 L^2 - 5.26 L + 300$ $R = 0.94$
Бассейн р.Сура, $F = 47790 \text{ км}^2$	$V_{АКК} = 1.11L + 15.1$ $R = 0.83$	$V_{ТАЛ} = 0.0071L^2 - 2,27 L + 163$ $R = 0.97$
р.Ока до устья, Нижний Избылиц; $F = 244000 \text{ км}^2$	$V_{АКК} = 0.568 L^{1.18}$ $R = 0.79$	$V_{ТАЛ} = 0.0054L^2 - 1.69 L + 128$ $R = 0.79$
р.Ока до Половского, $F = 99000 \text{ км}^2$	$V_{АКК} = 1.53 L^{0.997}$ $R = 0.91$	$V_{ТАЛ} = 0.006 L^2 - 2.06 L + 159$ $R = 0.94$
Правобережье Оки от Половского до устья, $F = 80000 \text{ км}^2$	$V_{АКК} = 1.46 L^{0.97}$ $R = 0.91$	$V_{ТАЛ} = 0.007L^2 - 2.11 L + 152$ $R = 0.94$
Левобережье Клязьмы, $F = 37000 \text{ км}^2$	$V_{АКК} = 0.034 L^2 - 2.22 L + 71.9$ $R = 0.84$	$V_{ТАЛ} = -0.0044 L^2 - 0.47 L + 90.6$ $R = 0.97$
Окско-Клязьминское междуречье, $F = 28000 \text{ км}^2$	$V_{АКК} = 0.212 L^{1.339}$ $R = 0.82$	$V_{ТАЛ} = 998 L^{-0.997}$ $R = 0.66$

Таблица 4. Характеристики зимнего стока р.Вятка – г.Вятские Поляны за период наблюдений с 1936 по 2010 г. (данные осредненные за каждые 5 лет).

Годы	Глубина промерзания, см	Характеристики зимнего стока, м ³ /с	
		наименьший	средний зимний
1936-1940	81	124.2	174.9
1941-1945	74	171.6	217.1
1946-1950	63	192.8	259.8
1951-1955	75	160.3	219.0
1956-1960	84	173.2	242.7
1961-1965	90	172.4	238.3
1966-1970	99	170.0	262.5
1971-1975	70	226.4	325.9

1976-1980	76	203.0	285.1
1981-1985	48	316.2	483.3
1986-1990	28	265.4	360.7
1991-1995	28	356.5	436.7
1996-2000	28	265.4	360.7
2001-2005	27	284.6	364.8
2006-2010	42	393.0	583.2

Таблица 5. Зависимость осредненных величин характеристик зимнего стока от глубины промерзания для рек Вятка и Самара

Интервал глубин, см	р.Вятка – Вятские Поляны			р.Самара – п.Ельшанка		
	Измеренное промерзание, см	Зимний сток, м ³ /с		Измеренное промерзание, см	Зимний сток, м ³ /с	
		наименьший	средний		наименьший	средний 30-и сут
10 – 20	17	304	361	12	14.0	19.0
21 – 30	27	344	453	26	16.5	18.4
31 – 40	36	314	401	37	15.6	17.2
41 – 50	45	230	308	44	14.9	16.9
51 – 60	56	303	493	57	10.5	12.3
61 – 70	64	178	253	68	13.4	14.4
71 – 80	76	176	226			
81 – 90	87	185	257	84	8.8	10.6
> 91 см	106	186	260	116	8.3	9.0

Подписи к рисункам статьи Калужного и Лаврова “Механизм влияния глубины промерзания почв речных бассейнов на зимний сток”

Рис.1. Зависимость содержания стокообразующей талой влаги зимнего периода на водосборе р.Медвенка – ниже устья р. Закса от глубины промерзания почвы.

Рис.2. Зависимость величины аккумулированной стокообразующей влаги от глубины промерзания почвы на водосборе р.Медвенка – выше устья р.Закса

Рис.3. Временной ход общих влагозапасов, стокообразующей влаги и глубин промерзания почвы на водосборе р.Медвенка – ниже устья р. Закса.

Рис.4. Временной ход глубин промерзания почвы, стокообразующей влаги зимнего периода и аккумулированной влаги в мерзлом слое на водосборе р.Медвенка – ниже устья р. Закса.

Рис.5. Динамика потерь талого стока(1) и глубин промерзания (2) в бассейне р.Вятка - г.Вятские Поляны за период наблюдений с 1936 по 2010 год.

