

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-1-130-142>

УДК 631.432.2(571.51)

Влияние осеннего увлажнения почв на эрозионно-аккумулятивные процессы в Красноярской лесостепи

И.А. Голубев, А.В. Кожуховский, О.И. Иванова

ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»,

г. Красноярск, Россия

igor.gol1984@bk.ru, aleksey3312@yandex.ru, ivolga49@yandex.ru

Рассматриваются результаты полевых наблюдений за эрозионно-аккумулятивными процессами, вызванных талыми водами на территории северной зоны Красноярской лесостепи в период 2009–2017 гг. Анализируются гидрометеорологические условия формирования талого стока в исследуемый период и их влияние на величины смыва и аккумуляции. Производится сопоставление данных по снегозапасам, влажности почв в предзимний период, поступлению талой воды на поверхность почвы, весеннему и осеннему стоку. Внимание акцентируется на осеннем увлажнении почвенного покрова. Определены коэффициенты корреляции величин смыва и предшествующего осеннего увлажнения. При прочих равных условиях, среди всех гидрометеорологических факторов на территории Красноярской лесостепи предзимнее увлажнение почв оказывает значительное влияние на интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов.

Ключевые слова: смыв почв, эрозия, осеннее увлажнение, гидрометеорологические факторы, сток, снегозапасы, влажность, промерзание, водопроницаемость

Influence of autumn soil moisture on erosion-accumulation processes in the Krasnoyarsk forest-steppe

I.A. Golubev, A.V. Kozhukhovsky, O.I. Ivanova

Krasnoyarsk state agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

igor.gol1984@bk.ru, aleksey3312@yandex.ru, ivolga49@yandex.ru

The results of field observations of erosion-accumulation processes caused by meltwater in the northern zone of the Krasnoyarsk forest-steppe in 2009-2017 are discussed. Hydrometeorological conditions of melt runoff formation during the study period and their influence on the values of washout and accumulation are analyzed. Data on snow cover, soil moisture in the pre-winter period, meltwater flow to the soil surface, and spring and autumn runoff are compared. Attention is focused on the autumn soil moisture. The correlation between the values of washout and preceding autumn moisture is revealed. Other things being equal, among all hydrometeorological factors on the territory of the Krasnoyarsk forest-steppe, pre-winter soil moisture has a significant impact on the intensity of erosion-accumulation processes.

Keywords: soil washout, erosion, autumn moisture, hydrometeorological factors, runoff, snow cover, humidity, freezing, water permeability

Введение

Красноярская лесостепь по физико-географическим и климатическим условиям занимает срединное положение в пределах лесостепной зоны Красноярского края. Она занимает территорию Кеть-Енисейской высокой равнины и представлена аккумулятивными и денудационными формами рельефа. Площадь данной территории составляет примерно 770 тыс. км², протяженность с юга на север – 110 км, с запада на восток – 80 км [10, 15].

В период 2009–2017 гг. авторами выполнены полевые наблюдения за процессами смыва и аккумуляции почв, вызванными талыми водами, на сельскохозяйственных землях центральной и северной зон Красноярской лесостепи. Основные результаты были опубликованы в [2–4].

Характеристика сезонно-мерзлотного режима почв

Мерзлой является почва, которая содержит в себе часть воды в замершем состоянии и имеющая отрицательную или нулевую температуру. При этом температура почвы, при которой содержащаяся в ней влага переходит в состояние льда, различается для каждого типа почвенного покрова. Она зависит от следующих факторов:

- количества солей;
- прочности связи почвенной влаги со скелетом почвы.

Лед образуется в почвенном покрове при снижении температуры последовательно и постепенно, начиная от свободных форм содержащейся воды и заканчивая связанными. Например, гравитационная вода в незасоленных почвах замерзает при температуре около 0 °С, а максимально гигроскопическая – только при -78 °С [7].

Большое воздействие на глубину сезонного промерзания оказывают такие факторы, как степень залесенности, увлажнение почвенного покрова, высота снега и его распределение, экспозиция склонов. Чем больше влажность почвенного профиля и выше снежный покров, тем меньше значение глубин промерзания. Отметим, что на количественные характеристики поверхностного стока талых вод и эрозии почв оказывают прямое влияние глубина промерзания почвенного профиля и его температура. При переходе почвы в мерзлое состояние величина ее водопроницаемости уменьшается вследствие закупорки пор частицами льда [6].

Красноярская лесостепь расположена в зоне сезонной мерзлоты. Климатические условия указанной территории обуславливают ежегодное сильное и глубокое промерзание почв [11, 14].

Процесс промерзания почвенного покрова начинается с наступлением стабильных отрицательных температур воздуха в начале ноября. Средняя глубина промерзания в Красноярской лесостепи к первой декаде

декабря составляет около 40–50 см, далее, постепенно увеличиваясь, достигает наибольших значений к началу мая (170–220 см). После этого, с наступлением стабильных положительных температур воздуха, начинается уменьшение глубины промерзания почв. По данным метеостанции «Красноярск опытное поле», полное оттаивание почвенного профиля наступает к началу лета, средняя дата – 14 июня. В условиях климата Красноярской лесостепи средняя многолетняя глубина промерзания почв в конце зимы составляет 172 см, максимальная – 253 см, минимальная – 127 см [11]. По данным метеорологической станции Сухобузимское, наиболее близко расположенной к району авторских исследований, в период полевых наблюдений наибольшая глубина промерзания почвенного профиля достигала 205 см, максимальная высота снежного покрова – 42 см, температура воздуха зимой находилась в диапазоне от -11 до -25,5 °С. (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики средней температуры воздуха, высоты снега и глубины промерзания почвенного покрова в Красноярской лесостепи, ст. Сухобузимо (2007–2017 гг.)

Table 1. Characteristics of the average air temperature, snow height and freezing depth of the soil cover in the Krasnoyarsk forest-steppe, Sukhobuzimo station (2007-2017)

Период наблюдений	Средняя температура воздуха за зимний период, °С	Высота снега (1 декада марта), см	Глубина промерзания перед снеготаянием (1 декада марта), см
2007/2008	-17,3	25	161
2008/2009	-20,4	37	172
2009/2010	-25,5	42	203
2010/2011	-22,8	34	205
2012/2013	-13	24	155
2016/2017	-11	28	148

Исследования, выполненные В.Д. Комаровым, показали, что при фиксированной величине влажности почв потери стока снижаются с ростом глубины промерзания. Однако данная зависимость прослеживается только до глубины промерзания 60 см. При дальнейшем ее увеличении потери стока не изменяются. На территории Сибири ежегодно глубина промерзания превышает 60 см, что также подтверждается гидрометеорологическими данными в исследуемый период (см. табл. 1). В этих условиях потери стока и его влияние на смыв почв определяются в основном динамикой величин предшествующего осеннего увлажнения бассейнов [1, 8].

Методы исследования и характеристика осеннего увлажнения почв

Осеннее увлажнение почв характеризуется количеством воды, содержащейся в почве в октябре-ноябре, т.е. в период времени, предшествующий установлению стабильных отрицательных температур воздуха. Гидрометеорологические условия в осенний период влияют на количественные характеристики стока и смыва почв в последующий весенний период, насыщая почвенный профиль водой при выпадении осадков, что приводит к снижению его водонепроницаемости. Исследованиями процессов эрозии, выполненными А.А. Танасиенко для территории Западной Сибири [13, 14] установлено, что при достижении влажности почв значений 20 % и более все мерзлые грунты становятся почти водонепроницаемыми вне зависимости от их механического состава. Из этого следует, что степень водонепроницаемости мерзлых почв определяется степенью их насыщения водой перед наступлением стабильных отрицательных температур воздуха [1, 8, 14, 17]. С наступлением весны насыщенность влияет на величину потерь талого стока на впитывание и, соответственно, на интенсивность смыва, вызванного эрозионной работой потоков талых вод [6, 8, 16]. Для северной лесостепи Средней Сибири характерна высокая изменчивость осеннего увлажнения почвенного покрова из года в год при большой глубине его промерзания (более 1 м, см. табл. 1) [1, 14].

В табл. 2 представлены величины влажности почв, измеренные в 2009 г. на ключевом опытном участке Долгий Лог перед началом зимы. Видно, что наименьшая влажность (22,1 %) характерна для вершины склона. Затем вниз по склону величина влажности увеличивается, достигая максимума (47 %) у подножья в нижней части профиля склона. Соответственно, пропорционально уменьшается водопроницаемость почв и возрастает величина поверхностного стока талых вод в период снеготаяния. Отметим, что во всех взятых образцах на глубине до 30 см влажность превышает показатель 20 %.

Для Красноярской лесостепи выполнен расчет показателя предшествующего осеннего увлажнения почв за период наблюдений 2009–2017 гг. Методика вычислений, используемая при составлении гидрологических прогнозов, представлена в [1, 9, 12]. Вычисление характеристики осеннего увлажнения рассчитывалась по сумме выпавших осадков в предзимний период за октябрь-ноябрь. Отметим, что октябре выпадают жидкие осадки, в ноябре некоторая их часть выпадает в виде снега, который растаивает при наступлении положительных температур воздуха. Слой растаявших и поступивших в почву осадков рассчитывался по коэффициенту стаивания (принят 5 мм/град. в сутки) и значениям среднесуточной положительной температуры воздуха. Расчетный показатель увлажнения почв определялся как сумма слоя растаявшего снега и выпавших жидких осадков за вышеуказанный период времени.

Таблица 2. Влажность почвы. Урочище Долгий Лог, ноябрь 2009 г.
Table 2. Soil moisture. Dolgiy Log natural area, November 2009

Глубина взятия образца, см	Номер бюкса	Вес пустого бюкса, г	Вес бюкса с влажной почвой, г	Вес бюкса с сухой почвой, г	Вес влаги, г	Вес сухой почвы, г	Влажность, %
Разрез I – северный массив (вершина склона)							
0–10	I - 0-10	5,78	43,50	35,02	8,48	29,24	29,00
10–20	I - 10-20	5,55	15,77	13,92	1,85	8,37	22,10
20–30	I - 20-30	6,18	24,50	20,96	3,54	14,78	23,95
Разрез II – южный массив (вершина склона)							
0–10	II - 0-10	5,51	29,36	24,03	5,33	18,52	28,78
10–20	II - 10-20	5,64	31,96	26,47	5,49	20,83	26,36
20–30	II - 20-30	5,47	33,68	27,86	5,82	22,39	25,99
30–40	II - 30-40	6,00	39,84	33,09	6,75	27,09	24,92
40–50	II - 40-50	6,18	29,07	22,75	6,32	16,57	38,14
Разрез III – северный массив (средняя часть склона)							
0–10	III - 0-10	6,15	29,93	24,90	5,03	18,75	26,83
10–20	III - 10-20	5,41	46,23	37,80	8,43	32,39	26,03
20–30	III - 20-30	6,25	50,70	40,27	10,43	34,02	30,66
Разрез IV – южный массив (средняя часть склона)							
0–10	IV - 0-10	6,50	34,47	27,11	7,36	20,61	35,71
10–20	IV - 10-20	5,60	29,37	23,47	5,90	17,87	33,02
20–30	IV - 20-30	5,66	35,60	27,78	7,82	22,12	35,35
Разрез V – южный массив (нижняя часть склона)							
0–10	V - 0-10	3,73	26,21	18,98	7,23	15,25	47,41
10–20	V - 10-20	4,49	30,82	23,41	7,41	18,92	39,16
20–30	V - 20-30	3,74	45,74	33,83	11,91	30,09	39,58

Анализ динамики осеннего увлажнения и стока рек-аналогов

Для оценки динамики рассчитанного показателя по годам наблюдений выполнено его сопоставление с величинами модуля осеннего стока ближайших рек-аналогов – р. Бузим и р. Нижняя Подъемная:

- река Нижняя Подъемная (гидрологический пост Большая Мурта) расположена в северной зоне Красноярской лесостепи. Длина реки – около 98 км, площадь водосбора – 788 км², средняя высота бассейна – 258 м;
- река Бузим (гидрологический пост Малиновка) расположена в центральной зоне. Исток реки находится в Кемчугской тайге. Длина реки – около 124 км, площадь водосбора – 2230 км², средняя высота бассейна – 259 м.

На рис. 1 представлено сравнение этих показателей. Видно, что косвенный показатель осеннего увлажнения почв коррелирует с модулем

стока рек-аналогов. При этом корреляция расчетного показателя с данными по стоку р. Бузим ($r=0,78$) выше, чем с р. Нижняя Подъемная ($r=0,55$). Это может быть связано с тем, что пост Большая Мурта располагается значительно севернее метеостанции Сухобузимское, величина общего увлажнения ее бассейна выше, в то время как пост Малиновка располагается значительно ближе.

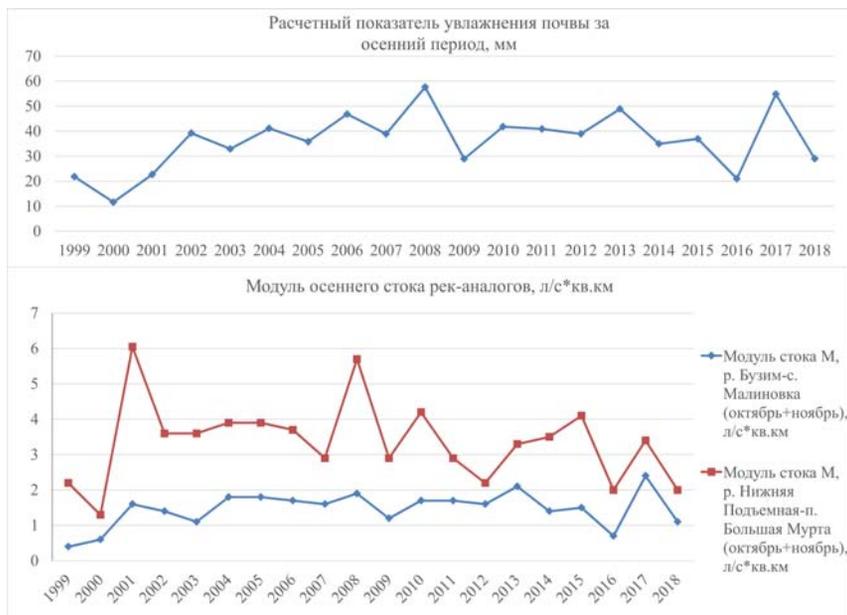


Рис 1. График динамики расчетного показателя осеннего увлажнения и модуля осеннего стока рек-аналогов в Красноярской лесостепи (1999–2018 гг.).
Fig. 1. Graph of the dynamics of the calculated indicator of autumn moistening and the module of autumn runoff of analogous rivers in the Krasnoyarsk forest-steppe (1999–2018).

Анализ динамики величин расчетного показателя осеннего увлажнения (рис. 1) показывает, что для территории Красноярской лесостепи характерна высокая изменчивость его значений. Амплитуда колебаний данной величины за двадцатилетний период составляет 46 мм. Наименьшее значение зафиксировано в 2000 г., наибольшее – в 2008 г. Для рек-аналогов амплитуда колебаний модуля осеннего стока по годам составляет: р. Нижняя Подъемная – 5 л/с×км², р. Бузим – 2 л/с×км². Видно, что для водосбора р. Бузим амплитуда колебаний величин осеннего стока выражена меньше и количественные значения стока в целом ниже, чем у р. Нижняя Подъемная. Это может быть связано с тем, что р. Нижняя Подъемная расположена в 45–50 км севернее, общее увлажнение ее бассейна заметно выше.

Проанализируем репрезентативность годов полевых наблюдений (2009–2011, 2013, 2017) за эрозионно-аккумулятивными процессами в контексте влияния изменчивости характеристик осеннего увлажнения. Из данных рис. 1 видно, что для 2009 г. предшествующее осеннее увлажнение было наибольшим за двадцатилетний период (расчетный показатель –57,6 мм), это могло существенно снизить потери стока на впитывание и увеличить интенсивность процессов смыва, среднее значение которого было максимальным за годы исследований (15,5 мм). Наименьшими значениями характеризовались 2010 и 2017 гг., в 2011 и 2013 гг. были величины, близкие к средним.

Из вышеприведенных данных можно заключить, что выбранные годы полевых исследований эрозионно-аккумулятивных процессов охватывают широкий спектр значений осеннего увлажнения, процессы смыва и аккумуляции от талых вод развивались в различных условиях водопроницаемости почв и потерь талого стока на впитывание.

Для лесных и лесостепных районов Средней Сибири О.И. Ивановой были выполнены исследования факторов формирования стока весеннего половодья и его прогноза. В качестве примера приведем данные, полученные для бассейна р. Большая Уря (гидрологический пост Малая Уря), протекающей в лесостепной зоне в схожих с Красноярской лесостепью физико-географических и гидрометеорологических условиях. [5].

Было проанализировано значительное количество параметров (предикторов), влияющих на величину весеннего стока талых вод. Отобраны такие факторы, как сумма среднемесячных расходов воды и сумма осадков за сентябрь–октябрь, продуктивная влажность почвы перед началом зимнего периода, уровни воды в весенний период, сумма среднемесячных температур воздуха за зимний период, среднемесячная температура воздуха за время формирования снежного покрова, высота снега в конце периода формирования устойчивого снежного покрова (октябрь–ноябрь), температура почвенного покрова на глубине 20 см за третью декаду апреля.

В процессе их анализа О.И. Ивановой было установлено, что наиболее тесные корреляционные связи наблюдаются с участием косвенных показателей осеннего увлажнения и промерзания бассейнов. С помощью способа множественной регрессии были получены результаты, показывающие, что в весенний период на потери талого стока влияют **условия промерзания почвенного покрова в начале зимы**. Чем меньше выпадает осадков в переходный период от осени к зиме и ниже значения температур воздуха в данное время, тем быстрее и глубже промерзает почвенный профиль, и тем большее количество воды подтягивается к фронту промерзания при достаточном увлажнении почв в осенний период. В процессе этого увеличивается степень закупорки почвенных пор частицами льда (льдиность). Это приводит к повышению водонепроницаемости почв и снижает потери талых вод на впитывание.

В результате обработки и анализа вышеприведенного данных был установлен обобщенный показатель потерь стока талых вод:

$$A_0 = \sqrt{K_{Q_{9+10}}} \cdot \frac{K_{10-T}}{K_{h+100}}, \quad (1)$$

где $K_{Q_{9+10}} = \frac{Q_{9+10}}{Q_{9+10}}$, $K_{10-T} = \frac{10-T}{10-T}$, $K_{h+100} = \frac{h+100}{h+100}$ представляют собой

модульные коэффициенты (черта сверху над значением означает среднюю многолетнюю величину); $K_{Q_{9+10}}$ – модульный коэффициент, который

характеризуется суммой среднемесячных расходов воды за сентябрь и октябрь; T – средняя месячная температура воздуха для бассейнов рек в степной и лесостепной зонах в ноябре; h – высота снега за третью декаду ноября для бассейнов в степи и лесостепи.

Установленный коэффициент корреляции между комплексной характеристикой A_0 и величиной талого стока в бассейне р. Большая Уря составляет 0,41 [5].

Комплексный показатель m характеризует предзимнее увлажнение и промерзание водосбора и рассчитывается от комплексной характеристики потерь талых вод:

$$m = A_0 + 0,04\Delta H, \quad (2)$$

где ΔH – разница между уровнем воды на момент начала ледостава ($H_{л}$) и минимальным зимним уровнем воды (H_{\min}); A_0 – комплексная характеристика потерь стока талых вод.

Вышеприведенные результаты подтверждается установленными О.И. Ивановой зависимостями для прогноза стока талых вод (Y) с учетом суммы снегозапаса и осадков в весенний период ($S+X$), а также комплексной характеристики промерзания и осеннего увлажнения почв m (рис. 2) [4, 5]. Верхняя кривая на графике (рис. 2) соответствует высоким величинам комплексного показателя и, соответственно, низкой водопроницаемости почв. Нижняя кривая отражает наименьшее значение этой величины и высокую водопроницаемость почв. Таким образом, изменения осеннего увлажнения и промерзания по годам оказывают существенное влияние на количественные значения стока весеннего половодья рек исследуемой территории, значения которого по вышеуказанной причине может изменяться в три и более раза [4, 5].

Учитывая территориальную близость и общую схожесть гидрометеорологических и физико-географических условий для р. Большая Уря – п. Малая Уря, р. Бузим – с. Малиновка, р. Нижняя Подъемная – п. Большая Мурта, можно заключить, что для территории Красноярской лесостепи вышеуказанные зависимости также могут быть в полной мере актуальны.

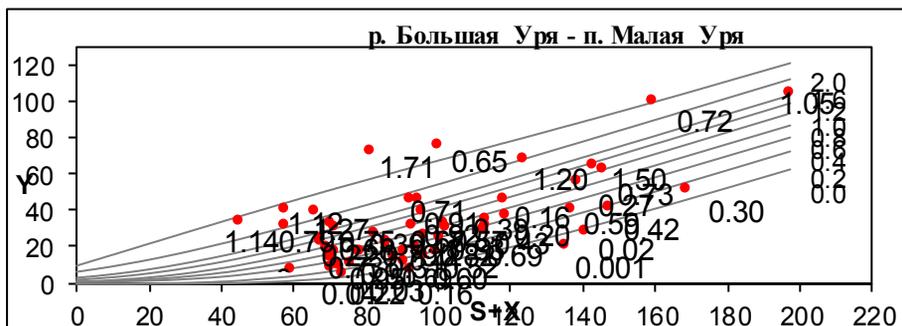


Рис. 2. Зависимость величины стока талых вод (Y , мм) от запаса воды в снежном покрове и осадков за период снеготаяния ($S+X$, мм). У точек в поле графика выписаны значения комплексной характеристики осеннего увлажнения и промерзания почвы ($Y = f(S+X, m)$) [5].

Fig. 2. Dependence of the melt water runoff (Y , mm) on the water supply in the snow cover and precipitation during the snowmelt period ($S+X$, mm). The points in the graph field have the values of the complex characteristics of autumn moisture and soil freezing ($Y = f(S+X, m)$) [5].

Влияние осеннего увлажнения на эрозионные процессы от талых вод

Сравнение величин предшествующего осеннего увлажнения со средними измеренными значениями смыва почв в динамике по годам исследований показывает, что присутствует корреляция значений смыва как с расчетным показателем осеннего увлажнения, так и с величинами модуля осеннего стока рек-аналогов: чем выше осеннее увлажнение, тем интенсивнее эрозия от талых вод. Заметно, что со значениями стока р. Нижняя Подъемная корреляция заметно слабее по причине большей удаленности данной реки от опытных участков, где измерялись величины смыва, а также от метеорологической станции Сухобузимское.

Анализ влияния осеннего увлажнения и других гидрометеорологических факторов на интенсивность процессов смыва и аккумуляции в динамике за отдельные годы показывает, что величины запаса воды в снеге, максимального суточного поступления воды на поверхность почвы, слоя поверхностного стока не показывают прямой корреляции с величинами смыва почв. Например, в 2010 году при максимальных за период исследований значениях снегозапаса (154,9 мм, табл. 3) и слоя поверхностного талого стока, но невысоком предшествующем осеннем увлажнении (28,9 мм) средняя величина смыва была одной из наименьших. Это может быть связано с тем, что талые воды, впитываясь в почвенную поверхность, не успевали проделать значительную эрозионную работу. В 2011 г. величины слоя стока и запаса воды в снеге характеризовались средними значениями, суточное поступление воды было минимальным, однако высокое

предшествующее осеннее увлажнение определило значительные величины смыва почв (10,6 мм). Из этого можно заключить, что, при прочих равных условиях, из всех вышеприведенных гидрометеорологических факторов эрозии в Красноярской лесостепи предшествующее осеннее увлажнение почв оказывает наиболее заметное влияние на интенсивность смыва от талых вод.

Таблица 3. Динамика значений гидрометеорологических факторов и смыва почв, Красноярская лесостепь (2009–2017 гг.)

Table 3. Dynamics of hydrometeorological factors and soil washout, Krasnoyarsk forest-steppe (2009-2017)

Год	Максимальное суточное поступление воды на поверхность почвы, мм	Средний запас воды в снеге и осадки (S+X), мм (ст. Сухобузимское)	Слой поверхностного стока весеннего половодья (Y), мм		Предшествующее осеннее увлажнение			Средний смыв, мм
			р. Бузим – с. Малиновка	р. Нижняя Подъемная-п. Большая Мурта	Расчетный показатель, мм	Модуль стока М, р. Бузим-с. Малиновка (октябрь+ноябрь, за предшествующий год), л/с*км ²	Модуль стока М, р. Нижняя Подъемная-п. Большая Мурта (октябрь+ноябрь, за предшествующий год), л/с*км ²	
2009	42,9	123,4	37,5	80,4	57,6	1,9	5,7	15,5
2010	30,0	154,9	64,1	107,3	28,9	1,2	2,9	4
2011	25,7	105,3	32,1	56,7	41,8	1,7	4,2	10,6
2013	40,0	87,6	43,6	79,4	38,9	1,6	2,2	5,4
2017	31,9	70	16,9	71,2	21	0,7	2	3,0

Основные результаты и выводы

В результате выполненных работ можно заключить следующее.

1. Подтверждены данные о существенных (более 60 см) глубинах промерзания почвенного покрова на территории Красноярской лесостепи в период исследований процессов смыва и аккумуляции. В результате этого, согласно В.Д. Комарову [8], значение глубины промерзания почвенного профиля практически не влияет на потери талого стока на впитывание.

2. Установлено, что в 2009 г. влажность верхнего горизонта почвы на территории опытного участка Долгий Лог в предзимний период составила от 26 до 47 %. Таким образом, согласно исследованиям А.А. Танасиенко [14], почвенный покров перед снеготаянием был практически водонепроницаемым. В данном году интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов, вызванных тальми водами, была максимальной за период авторских полевых наблюдений (см. табл. 3).

3. Для исследуемой территории характерна значительная изменчивость величин осеннего стока и увлажнения по годам. За выбранный двадцатилетний период (1999–2018) наименьшие значения зафиксированы для 2000 г., максимальные – для 2008 г. (см. рис. 1). Показатели осеннего увлажнения почв 2008 г. в последующий период снеготаяния уменьшили потери талого стока на впитывание и во многом определили высокую интенсивность эрозионных процессов.

4. Выявлена корреляция значений расчетного показателя осеннего увлажнения почв и осеннего стока рек-аналогов по годам. Наибольшим образом расчетный показатель коррелирует с осенним стоком р. Бузим.

5. Установлено, что из всех гидрометеорологических факторов на территории Красноярской лесостепи величина предшествующего осеннего увлажнения при прочих равных условиях оказывает наибольшее влияние на интенсивность эрозионно-аккумулятивных процессов в весенний период.

Мы благодарим д-ра геогр. наук Д.А. Буракова, кафедру природообустройства Красноярского государственного аграрного университета за обсуждение и советы.

We thank Dr D.A. Burakov, Department of Environmental Engineering, Krasnoyarsk State Agrarian University, for the discussion and advices.

Список литературы

1. Бураков Д.А., Иванова О.И. Анализ формирования и прогноз стока весеннего половодья в лесных и лесостепных бассейнах рек Сибири // Метеорология и гидрология. 2010. № 6. С. 87-100.

2. Голубев И.А. Применение модернизированного метода шпилек для оценки смыва пашни тальми водами (на примере Красноярской лесостепи) // Вестник Томского государственного университета. 2011. № 347. С. 170-173.

3. Голубев И.А. Смыв почв тальми водами в центральной части Красноярской лесостепи // Инновации молодых ученых аграрных вузов агропромышленному комплексу Сибирского региона: материалы IX региональной научно-практической конференции молодых ученых вузов Сибирского федерального округа – Омского государственного аграрного университета, 2-3 июня 2011. Омск: ИПК Макшеевой Е.А., 2011. С. 279-282.

4. Голубев И. А. Смыв почв тальми водами на пашне северной части Красноярской лесостепи // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 360. С. 172-175.

5. Иванова О.И. Гидрологический анализ и прогноз весеннего половодья лесных и лесостепных рек Средней Сибири: автореферат дис. ... канд. географ. наук: 25.00.27. Иркутск, 2011. 24 с.
6. Калюжный И.Л., Павлова К.К. Формирование потерь талого стока. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 159 с.
7. Качинский Н.А. Физика почвы. Часть II. Водно-физические свойства и режимы почв: Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1970. 359 с.
8. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек Европейской части СССР. – М.: Гидрометеоздат, 1959. 295 с.
9. Попов Е.Г. Гидрологические прогнозы. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 256 с.
10. Природные условия Красноярского края. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т.16. Ангаро-Енисейский район. Вып. 1. Енисей / Под ред. Г.С. Карабаева. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 823 с.
12. Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 1. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 358 с.
13. Танасиенко А.А., Путилин А.Ф., Артамонова В.С. Экологические аспекты эрозионных процессов: Аналит. обзор. – Новосибирск, 1999. 89 с.
14. Танасиенко А.А. Специфика эрозии почв в Сибири. Новосибирск: Из-во СО РАН, 2003. 176 с.
15. Топтыгин В.В., Крупкин П.И., Пахтаев Г.П. Природные условия и природное районирование земель сельскохозяйственной части Красноярского края: Учеб. Пособие. Красноярск, 2002. 144 с.
16. Grawford N.H., Linsley R.K. A conceptual model of hydrologic cycle // IAHS Publication. 1963. No. 63. P. 573-587.
17. Hayashi M., Van der Kamp G., Schmidt R. Focused infiltration of snowmelt water in partially frozen soil under small depressions // J. Hydrol. 2003. Vol. 270. P. 214-229.

References

1. Burakov D.A., Ivanova O.I. Analysis of formation and forecast of spring snowmelt flood runoff in forest and forest-steppe basins of Siberian rivers. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, pp. 421-431. DOI: 10.3103/S1068373910060099.
2. Golubev I.A. Pins modernized method application for estimation of arable land soil washout by meltwater (by example of Krasnoyarsk forest-steppe). *Tomsk State University Journal*, 2011, vol. 347, pp. 170-173. [in Russ.].
3. Golubev I.A. Smyv pochv talymi vodami v central'noj chasti Krasnojarskoj lesostepi [Soil washout by melt water in the central part of the Krasnoyarsk forest-steppe]. *Proc. of the 9th Regional Sci. Prac. Conf. of Young Scientists of Universities of the Siberian Federal District «Innovations of young scientists of agricultural universities, agro-industrial complex of Siberian region»*. Omsk State Agrarian University, IPK Makshevoi E.A., Omsk, 2011, pp. 279-282. [in Russ.].
4. Golubev I.A. Soil washout by thawed snow on arable lands of northern Krasnoyarsk forest-steppe. *Tomsk State University Journal*, 2012, vol. 360, pp. 172-175. [in Russ.].
5. Ivanova O.I. Gidrologicheskij analiz i prognoz vesennego polovod'ja lesnyh i lesostepnyh rek Srednej Sibiri [Hydrological analysis and forecast of spring flood of forest and forest-steppe rivers of Central Siberia], *abstract of the Candidate of geographical sciences Thesis*, Institute of geography SB RAS, Irkutsk, 2011. [in Russ.].

6. *Kalyuzhny I.L., Pavlova K.K.* Formirovanie poter' talogo stoka [Formation of melt runoff losses]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1981, 159 p. [in Russ.].
7. *Kachinsky N.A.* Fizika pochvy. Chast' II. Vodno-fizicheskie svoystva i rezhimy pochv [Soil physics. Part II. Water-physical properties and soil regimes.], Textbook. Moscow, Higher School, 1970, p. 26. [in Russ.].
8. *Komarov V.D.* Vesennij stok ravninnyh rek Evropejskoj chasti SSSR [Spring flow of flat rivers of the European part of the USSR]. Moscow, Gidrometeoizdat publ., 1959, 295 p. [in Russ.].
9. *Popov E.G.* Gidrologicheskie prognozy [Hydrological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1979, 256 p. [in Russ.].
10. Prirodnye usloviya Krasnojarskogo kraja [Natural conditions of Krasnojarsk region]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1961. [in Russ.].
11. Resursy poverhnostnyh vod SSSR: Gidrologicheskaja izuchennost'. T.16. Angaro-Enisejskij rajon [Surface water resources of the USSR: a Hydrological study. T. 16. Angaro-Yenisei region]. Vol. 1 Yenisei, in G. S. Karabaev (ed.). Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1973, 823 p. [in Russ.].
12. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam [Guide to hydrological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, no. 1, 358 p. [in Russ.].
13. *Tanasiyenko A.A., Putilin A.F., Artamonova V.S.* Ekologicheskie aspekty erozionnyh processov: Analit. obzor [Ecological aspects of erosion processes: analit. Review], in Gadzhiev, I.M. (ed.), Novosibirsk, GPNTB SB RAS, Institute of soil science and Agrochemistry SB RAS, 1999. [in Russ.].
14. *Tanasienko A.A.* Specifika erozii pochv v Sibiri [the Specificity of soil erosion in Siberia]. Novosibirsk, Publishing house SB RAS, 2003. [in Russ.].
15. *Toptygin V.V., Krupkin P.I., Pakhtaev G.P.* Prirodnye usloviya i prirodnoe rajonirovanie zemledeľcheskoj chasti Krasnojarskogo kraja [Natural conditions and natural zoning of the agricultural part of the Krasnojarsk Territory]. Textbook. Krasnojarsk, Krasnojarsk state agrarian university, 2002, 144 p. [in Russ.].
16. *Crawford N.X., Linsley R.K.* A conceptual model of the hydrological cycle. IAHS Publication, 1963, no. 63.
17. *Hayashi M., Van der Kamp G., Schmidt R.* Focused infiltration of snowmelt water in partially frozen soil under small depressions. *J. Hydrol.*, 2003, vol. 270, pp. 214-229.

*Поступила 12.01.2021; одобрена после рецензирования 02.03.2021;
принята в печать 23.03.2021.*

*Submitted 12.01.2021; approved after reviewing 04.12.2020;
accepted for publication 23.03.2021.*